

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างใยแก้วและยางธรรมชาติ



นายปริญญา เลิศสถิตย์พงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

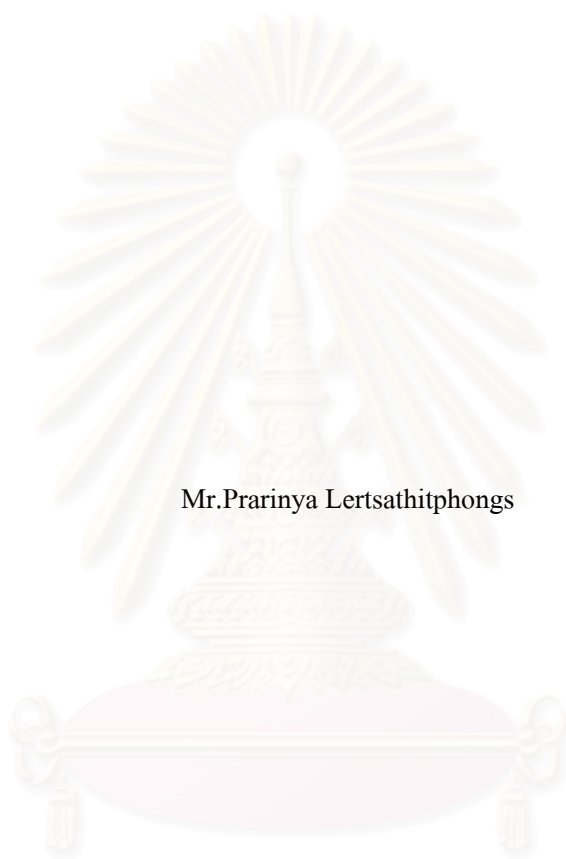
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1168-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF FIBERGLASS/NATURAL RUBBER COMPOSITES



Mr.Prarinya Lertsathitphongs

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirments
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1168-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างใยแก้วและยางธรรมชาติ
โดย นายปริญญา เลิศสถิตย์พงษ์
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เพ็ชรพรรค ทศกร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. เพ็ชรพรรค ทศกร)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาคล)

ปริญา เลิศสถิตย์พงษ์ : การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างใยแก้วและยางธรรมชาติ

(PREPARATION OF FIBERGLASS/NATURAL RUBBER COMPOSITES)

อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.เพียรพรศ ทศคร 95 หน้า. ISBN 974-53-1168-5.

ความมุ่งหมายของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง ความสามารถในการทนความดันสูงและมีค่าการนำความร้อนต่ำโดยเป็นวัสดุที่ทำมาจากใยแก้วและยางธรรมชาติ กระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบใช้วิธีการจุ่มซึ่งไม่ได้ควบคุมความหนาและวิธีการหล่อที่ควบคุมความหนา ปัจจัยที่ส่งผลถึงสมบัติของวัสดุที่ได้คือ ขนาดของใยแก้ว ปริมาณไซเลนที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้ว และ ความหนาของชิ้นงานด้วย ผลการวิจัยพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ใช้การจุ่มใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม. ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของใยแก้ว มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ส่วนค่าความดันที่ทนได้กลับน้อยกว่าการไม่ใช้ไซเลนเพราะสารไซเลนจะตรึงเนื้ออย่างกับใยแก้วทำให้เสียความยืดหยุ่น ความดันที่จุดวิบัติจะบอกถึงขนาดของใยแก้วที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน พบว่าใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม. เหมาะกับการใช้งานที่ต้องรับความดัน ปัจจัยที่ผลต่อค่าความดันที่ทนได้คือขนาดของใยแก้ว ปริมาณไซเลนที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิว ความหนา และอันตรกิริยาของขนาดของใยแก้วและความหนา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ได้มีผู้ศึกษามาแล้วพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า PVC PE PS และ PP ค่าการนำความร้อนต่ำกว่า PVC และ หากนำไปทำท่อน้ำความสามารถในการทนความดันสูงกว่า ท่อPVC และ ใกล้เคียงกับท่อทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....

สาขาวิชา.เคมีเทคนิค.....

ปีการศึกษา.2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

##4572368423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD : NATURAL RUBBER/ FIBERGLASS/ COMPOSITES/

PRARINYA LERTSATHITPHONGS : PREPARATION OF FIBERGLASS /

NATURAL RUBBER COMPOSITES. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASAKORN,

Ph.D., 95 pp. ISBN 974-53-1168-5

The purpose of this study is to prepare a composite from natural rubber and fiberglass having high tensile strength, withstanding high pressure and low heat conductivity. Two preparation method were adopted ; a dipping process without thickness-controlled and casting process with thickness-controlled. The factors influencing the properties of the composite are the size of fiberglass, quantity of silane used for fiberglass surface treatment and the thickness of the composite sheet. The results showed that a 200 g/m² fiberglass treated with 5%wt silane then dipped in the compounded latex yielded the highest tensile strength. However, it could withstand a lower pressure than the untreated one due to the rigid binding of fiber to rubber by silane leaving less flexibility. A bursting pressure indicates an applicability of the fiber. It was found that 100 g/m² fiberglass is the most suitable for high bursting pressure. Factor affecting a pressure resistance are fiberglass size, quantity of silane used for surface treatment, and the combined effect of fiberglass size and thickness. A comparison of properties with other materials, studied in previous researches, shows that the composite has a tensile strength higher than PVC, PE, PS and PP; and its heat conductivity is lower than PVC. If made into water pipe, it can withstand a higher pressure than PVC and a similar level of pressure to a copper pipe.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department....Chemical Technology.....

Student's signature.....

Field of study....Chemical Technology...

Advisor's signature.....

Academic year...2004.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.เพ็ชรพรุค ทศกรที่ให้คำปรึกษา แนวคิด วิธีการมองถึงการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงความช่วยเหลือในทุกด้านจึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อ.มณูญ จิตต์ใจกล้า และ อ.โอภาส เขาวานานนท์ สาขาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมสิ่งทอ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำในการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของผ้าใยแก้ว

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ และ ผศ.ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุชญา นิตวิฒนานนท์ และ ผศ.ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี ในการดูแลและคำปรึกษาต่างๆ ในขณะที่ศึกษาที่ภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทรสินี ภัทร โกศล ภาควิชาคณิตศาสตร์ที่ดูแลให้คำปรึกษาและให้โอกาสในการเป็นผู้ช่วยสอนวิชาธรรมชาตวิทยา

ขอขอบคุณ บริษัท คอบราอินเตอร์ จำกัด ในการสนับสนุนวัสดุคิบบใยแก้วที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณชาวไซเบอร์เนติกส์ เพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยทางธรรมชาติและเพื่อนที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์สาขาวิชาเทคโนโลยีทางเซรามิกส์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วีระ สัจกุล และ น้องสโมสร โรตาเรคท์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับกำลังใจในการเรียนและทำงานวิจัยที่มีให้ตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนและพี่ คณะกรรมการบัณฑิตจุฬาฯ และ เจ้าหน้าที่ฝ่ายบริการวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ ที่ให้ความสะดวกในการทำเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ทนุ.จิรพร จารุติลลและครอบครัว และครอบครัวชูประเสริฐโชค ที่ให้ความดูแลและกำลังใจในการทำศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวที่ดูแลและให้กำลังใจรวมถึงความช่วยเหลือและการสนับสนุนต่างๆตลอดมา จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความมุ่งหมาย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนองานวิจัย.....	3
2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 วัสดุเชิงประกอบ.....	4
2.2 เส้นใยเสริมแรง.....	4
2.3 การใช้งานของคอมโพสิต.....	4
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ.....	5
2.5 น้ำยางข้น.....	9
2.6 น้ำยางคงรูปหรือวัลคาไนซ์.....	13
2.7 การผลิตน้ำยางคงรูป.....	13
2.8 วัตถุประสงค์และสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางคงรูป.....	14
2.9 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง.....	16
2.10 ภาชนะบรรจุน้ำยางผสม.....	16
2.11 การกวนและระยะเวลากวนน้ำยางผสม.....	17

บทที่		หน้า
2	2.12 การกำจัดฟองอากาศ.....	17
	2.13 วิธีการทดสอบน้ำยางคงรูป.....	18
	2.14 การใช้ประโยชน์จากน้ำยางคงรูป.....	20
	2.15 ท่อยาง.....	21
	2.16 เส้นใยและเมตริกซ์.....	22
	2.17 เส้นใยแก้ว.....	22
	2.18 วัสดุเมตริกซ์.....	23
	2.19 สารประสานกู่ควบ.....	24
	2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	27
	3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	27
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
	3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	30
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	37
	4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดิบ.....	37
	4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	41
	4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	49
	4.4 การประยุกต์การใช้งาน.....	72
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
	5.1 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดิบ.....	75
	5.2 สรุปผลการศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	76
	5.3 สรุปผลการศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	76
	5.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	78
	5.5 ข้อเสนอแนะ.....	78
	รายการอ้างอิง.....	79
	ภาคผนวก.....	81
	ภาคผนวก ก. ผลการทดลองของวัสดุดิบ.....	82
	ภาคผนวก ข. ผลการทดลองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	86
	ภาคผนวก ค. ผลการทดลองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	89

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณ.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การประยุกต์การใช้งานคอมโพสิต.....	5
2.2	ชนิด, ลักษณะการใช้งาน และ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของท่อยาง.....	21
3.1	รายละเอียดของวัสดุคิบัที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2	สูตรการเตรียมซิงค์ออกไซด์.....	30
3.3	สูตรการเตรียมกำมะถันและZDEC.....	31
3.4	สูตรการเตรียมสารละลายไซเลน.....	31
3.5	องค์ประกอบของน้ำยางคงรูป	32
4.1	แสดงผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุของใยแก้วเทียบกับใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน.....	40
4.2	ผลทดสอบแรงยึดเกาะต่อพื้นที่ของใยแก้วกับยาง.....	41
4.3	ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	48
4.4	ระดับตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง	49
4.5	ค่าตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึง ความดันที่ทนได้ และ ความดันที่วิบัติ.....	49
4.6	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึง.....	51
4.7	ค่าตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงด้วยวิธีรากที่สอง.....	53
4.8	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลง	54
4.9	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความดันที่ทนได้.....	59
4.10	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความดันที่วิบัติ.....	63
ก.1	ผลค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคิบั.....	82
ก.2	ค่าการนำความร้อนของวัสดุคิบั.....	82
ก.3	ค่าแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วและยาง.....	82
ก.4	ผลการวิเคราะห์ของใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวเทียบกับใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธี XRF.....	83
ก.5	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.	83
ข.1	ค่าความหนาของวัสดุเชิงประกอบ(cm)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	86
ข.2	ค่าความต้านทานแรงดึง(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	86

ตารางที่	หน้า
ข.3	ค่าอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการ จุ่ม..... 87
ข.4	ค่าความดันที่ทนได้(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม..... 87
ข.5	ค่าความดันที่วิบัติ(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม..... 87
ข.6	ค่าการนำความร้อน(Watt/mK)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม..... 88
ค.1	ค่าอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วย วิธีการหล่อ..... 89
ค.2	ค่าความต้านทานแรงดึง(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.. 89
ค.3	ค่าความดันที่ทนได้(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 90
ค.4	ค่าความดันที่วิบัติ(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 90
ค.5	ค่าการนำความร้อน(Watt/mK) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.... 91

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติ.....	6
2.2	ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ.....	6
2.3	ภาพหน้าตัดตามยาวของเครื่องปั่นน้ำยางขึ้น.....	11
2.4	กลไกการดูดซับหมู่ไฮดรอกซีกับหมู่ไฮไลนอล.....	24
2.5	กลไกการสร้างพันธะระหว่างใยแก้วกับสายโซ่ยางด้วย TESPT.....	25
3.1	ขั้นตอนการผสมสารเคมีเพื่อเตรียมน้ำยางคงรูป.....	33
3.2	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วและยาง.....	33
3.3	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการจุ่ม.....	34
3.4	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อ.....	35
4.1	ค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติและใยแก้วขนาดต่างๆ.....	38
4.2	ค่าการความร้อนของยางธรรมชาติและใยแก้วขนาดต่างๆ.....	38
4.3	กราฟแสดงผลวิเคราะห์ด้วย XRF.....	39
4.4	กราฟระหว่างอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	42
4.5	กราฟค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	43
4.6	กราฟระหว่างอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	44
4.7 ก.	ความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	45
4.7 ข.	ความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มในการทดสอบความดัน.....	45
4.8	กราฟระหว่างอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	46
4.9	กราฟความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	46
4.10	ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานแรงดึงกับความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	47
4.11	กราฟการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	48
4.12	กราฟ Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	50

ภาพที่	หน้า
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าเศษเหลือของค่าความ ต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 52
4.14	กราฟ Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูก แปลงด้วยวิธีรากที่สองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 54
4.15	กราฟ Normal Probability Plot ของค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงด้วยวิธีราก ที่สองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 55
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าเศษเหลือของค่าความ ต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 56
4.17	กราฟปัจจัยระดับสูงค่าของขนาดใยแก้วที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูก แปลงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 57
4.18	กราฟปัจจัยระดับสูงค่าของความหนาที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลง ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 57
4.19	กราฟ Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิง ประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 58
4.20	กราฟ Normal Probability Plot ของความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่ เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 60
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าเศษเหลือของความดันที่ทน ได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 60
4.22	กราฟปัจจัยระดับสูงค่าของขนาดใยแก้วที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิง ประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 61
4.23	กราฟปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุ เชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 61
4.24	กราฟปัจจัยระดับสูงค่าของความหนาที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิง ประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 62
4.25	กราฟ Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิง ประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 63
4.26	กราฟ Normal Probability Plot ของความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียม ด้วยวิธีการหล่อ..... 64
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าเศษเหลือของความดันที่ วิกฤติได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ..... 65

ภาพที่	หน้า
4.28 กราฟปัจจัยระดับสูงต่ำของขนาดใยแก้วที่มีผลต่อค่าความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	66
4.29 กราฟปัจจัยระดับสูงต่ำของความหนาที่มีผลต่อค่าความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	66
4.30 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	67
4.31 กราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	68
4.32 กราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	69
4.33 กราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความดันที่วิกฤติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	70
4.34 กราฟระหว่างค่าความดันที่ทนได้กับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	70
4.35 กราฟระหว่างค่าความดันที่วิกฤติกับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	71
4.36 กราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	72
4.37 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุชนิดต่างๆ.....	73
4.38 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ.....	73
4.39 ความดันที่ทนได้ของท่อ 3 นิ้วที่ความหนาต่างๆ.....	74
ก.1 ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.....	84
ก.2 ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.....	84
ก.3 ใยแก้วตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง.....	84
ก.4 วิธีใส่ใยแก้วตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง.....	85
ก.5 ชิ้นงานทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยาง.....	85
ข.1 วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม.....	88
ค.1 วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ.....	91

บทที่ 1

บทนำ

การแบ่งวัสดุนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ วัสดุทางพอลิเมอร์ วัสดุทางเซรามิกส์ และ วัสดุทางโลหะ โดยจะแบ่งตามลักษณะของพันธะภายในโมเลกุล ได้มีการทำวิจัยในการนำวัสดุแต่ละประเภทมารวมกันเพื่อเสริมคุณสมบัติกันดังเช่น การนำพลาสติกอีพอกซีมาเสริมความแข็งแรงเพื่อใช้เป็นกั้นกันไฟฟ้าได้ทะเลในประเทศนอร์เวย์[1] การใช้เส้นคาร์บอนเสริมความแข็งแรงในอุปกรณ์กีฬาเช่น โครงจักรยาน[2] ไม้เทนนิส โดยอุปกรณ์กีฬานั้นจะมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา หรือการใช้หินขนาดต่างๆผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้หินเป็นตัวรับแรง การที่นำวัสดุมารวมกันเพื่อให้ได้วัสดุถูกเตรียมขึ้นมาได้จะเรียกว่าวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)

วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งได้หลายแบบ ถ้าแบ่งตามลักษณะการเตรียมจะแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย วัสดุเชิงประกอบแบบเคลือบ[3] โดยการจะเลือกวัสดุเพื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบนั้นจะเลือกตามคุณสมบัติที่ต้องการปรับปรุงหรือเลือกตามคุณสมบัติการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ อย่างธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์โดยมีคุณสมบัติเด่นคือมีความยืดหยุ่นสูง เป็นฉนวนกันความร้อน มีการกระดอนสูง ทนสารพวกกรดและด่าง และสารละลายที่มีขี้ แล้วอย่างธรรมชาติสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงได้โดยใส่สารตัวเติมเช่นกำมะถัน หรือเขม่าดำ และยังมีพันธะอยู่ในโมเลกุลซึ่งเหมาะสมกับการปรับปรุงโครงสร้าง ส่วนใยแก้วเป็นวัสดุทางเซรามิกส์โดยมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ CaO_2 มีคุณสมบัติในการทนแรงดึงสูง โดยปกติใยแก้วมักจะถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกแต่พลาสติกนั้นคุณสมบัติในการยืดหยุ่นต่ำและความแข็งแรงสูงจึงไม่สามารถพับหรืองอได้ต่างจากยางธรรมชาติ ดังนั้นการที่จะทำวัสดุเชิงประกอบที่มีความต้านทานแรงดึงสูง และมีความสามารถในการยืดหยุ่นนั้นยางธรรมชาติกับใยแก้วเป็นวัสดุหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ต้องกรคุณสมบัติดังกล่าว

1.1 ความมุ่งหมาย

ความมุ่งหมายในการวิจัยคือการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง สามารถทนความดันได้สูงและมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนโดย ใช้ยางธรรมชาติและใยแก้วเป็นวัสดุในการทำวัสดุเชิงประกอบ รวมไปถึงศึกษาถึงการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วโดยใช้สารประสานคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วและยางธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและใยแก้ว
2. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงและทนความดันมากกว่าพีวีซีและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนเหมาะสำหรับทำป็นภาชนะบรรจุน้ำหรือท่อน้ำ

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1. ในการทำวัสดุเชิงประกอบสามารถใช้ใยแก้วเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติได้
2. ในการทำวัสดุเชิงประกอบจำเป็นต้องใช้สารเคมีเชื่อมระหว่างยางกับใยแก้วโดยสารดังกล่าวคือสารในกลุ่มไซเลนซึ่งปลายข้างหนึ่งสามารถจับกับซิลิกาตรงหมู่ไซเลนอลและปลายอีกข้างจับกับยางตรงพันธะคู่

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยจะศึกษาถึงสองกระบวนการที่ใช้เตรียมวัสดุเชิงประกอบคือ

1. กระบวนการเตรียมด้วยวิธีจุ่ม
2. กระบวนการเตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ขนาดของใยแก้วที่ใช้ในการวิจัย

- กระบวนการเตรียมด้วยวิธีการจุ่ม ใช้ใยแก้วขนาด 60 100 160 200 และ 300 กรัมต่อตร.ม.
- กระบวนการเตรียมด้วยวิธีการหล่อ ใช้ใยแก้วขนาด 60 และ 300 กรัมต่อตร.ม.

ความเข้มข้นของไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว

- กระบวนการเตรียมด้วยวิธีการจุ่มจะใช้ความเข้มข้น 0% 1% 3% 5% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว
- กระบวนการเตรียมด้วยวิธีการหล่อจะใช้ความเข้มข้น 0% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว

ความหนาของชนิดวัสดุเชิงประกอบ

- กระบวนการเตรียมด้วยการหล่อ 0.7 และ 1.5 มม.

1.6 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและการทดลองต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
3. เตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการจุ่ม
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา
- ขนาดใยแก้ว คือ 60 100 160 200 และ 300 กรัมต่อตร.ม.
- ปริมาณไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว 1% 3% 5% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว
4. เตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการเคลือบ
ตัวแปรที่ต้องการศึกษา
- ขนาดของใยแก้ว คือ 60 และ 300 กรัมต่อตร.ม.
- ปริมาณไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว 0% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว
- ความหนาของวัสดุเชิงประกอบคือ 0.7 และ 1.5 มม.
5. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ได้แก่
- การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง
- การทดสอบความดันที่ทนได้
- การทดสอบค่าการนำความร้อน
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 วัสดุเชิงประกอบ (composites)[3]

วัสดุเชิงประกอบถูกผลิตโดยการนำวัสดุสองชนิดมารวมกันและได้คุณสมบัติที่ไม่สามารถได้มาจากวัสดุต้นแบบ วัสดุเชิงประกอบทำขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างเช่น คุณสมบัติในด้านความเหนียว แข็งแรง น้ำหนัก นำไปใช้ได้ ในอุณหภูมิสูง การทนต่อการกัดกร่อน ความแข็ง หรือ การนำความร้อน

วัสดุเชิงประกอบมี 3 ประเภท โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุดิบเช่น คอนกรีตคือของผสมระหว่างซีเมนต์กับหินเป็นวัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค ใยแก้วที่ฝังลงในพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใยและไม้อัดที่ประกอบมาจากชั้นไม้บางๆเป็นวัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นบาง วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาคจะมีคุณสมบัติทางไอโซโทรปิก วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใยจะแสดงคุณสมบัติไอโซโทรปิกหรือแอนไอโซโทรปิก และวัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นบางจะแสดงพฤติกรรมแบบแอนไอโซโทรปิกเสมอ

2.2 เส้นใยเสริมแรง

วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใยส่วนใหญ่จะปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งแรง ความต้านทานต่อการล้า ความเหนียวและความแข็งแรงต่ออัตราส่วนของน้ำหนัก โดยการรวมความแข็งแรงของเส้นใยที่เปราะลงในเมตริกซ์ที่นุ่มและมีความยืดหยุ่น วัสดุเมตริกซ์จะถ่ายแรงไปยังเส้นใยโดยเส้นใยจะเป็นส่วนที่รับแรงเกือบทั้งหมด การนำเส้นใยเสริมแรงมาใช้ประโยชน์เช่น ในสมัยโบราณได้ใช้ฟางเป็นเส้นใยในการเสริมแรงอิฐที่ทำมาจากโคลน การใช้เหล็กเป็นเส้นใยในการเสริมแรงคอนกรีต การใช้ใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนในเครื่องกีฬาต่างๆ

2.3 การใช้งานคอมโพสิต[4]

การใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิต สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลัดกันซ์

คอมโพสิตมีชั้นส่วนน้อยชั้น ไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์การใช้งานคอมโพสิต

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้า ก่อสร้างคอมพิวเตอร์

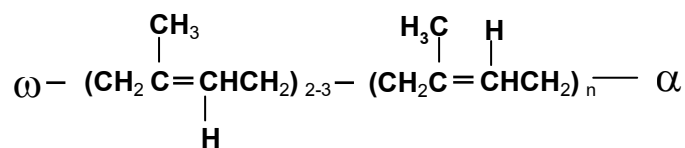
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ[5]

น้ำยางธรรมชาติเป็นของเหลวที่ได้มาจากต้นยางพาราซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea Brasiliensis* เป็นต้นไม้ที่เจริญงอกงามได้ดีในประเทศแถบร้อนที่มีดินดี น้ำยางที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารา ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวที่ซ้ำๆกันเป็นจำนวนมาก มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอมและไฮโดรเจน 8 อะตอม C_5H_8 มีชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุลจะเรียงตัวกันในแบบ Cis-configuration เรียกชื่อโมเลกุลยางว่า cis-1,4-polyisoprene โดยจะแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 2.1 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งล้าน น้ำยางที่ได้จากต้นยางพาราจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้น มีความถ่วงจำเพาะ 0.98 มีค่า pH ประมาณ 6.8 ส่วนประกอบน้ำยางธรรมชาติที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

ปริมาณเนื้อยาง	25 -45	%
สารจำพวกโปรตีน	1.5	%
สารจำพวกเรซิน	2.0	%
คาร์โบไฮเดรต	1.0	%
สารอนินทรีย์	0.5	%

ผิวของอนุภาคยางมีเยื่อหุ้ม (membrane) ที่ประกอบด้วยไขมันและโปรตีนโดยแต่ละอนุภาคมีอนุภาคของโปรตีนอยู่รอบนอก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง ซึ่งส่งผลให้น้ำยาง

สามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ ดังนั้นเมื่อมีการทำลายเชื้อหุ้มอนุภาคหรือมีการสะเทินอนุภาค จะทำให้อนุภาคยาง แขนงลอยอยู่ในตัวกลาง เกิดการรวมตัวเป็นก้อน

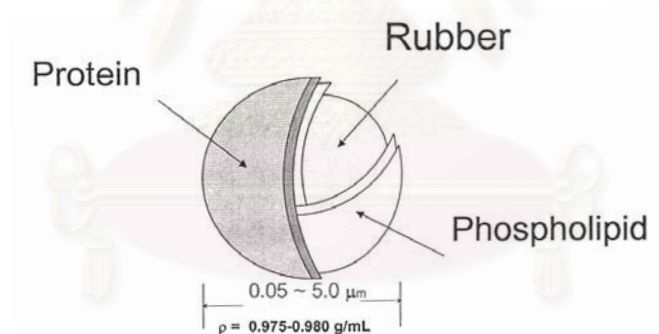


รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

โดย ω และ α เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปลายโมเลกุลที่มีสมมติฐานว่าเป็นโปรตีนและกรดไขมันตามลำดับ

เมื่อนำน้ำยางธรรมชาติมาปั่นด้วยเครื่อง Centrifuge ความเร็วสูงพบว่าน้ำยาง จะแยกออกเป็นส่วนๆ ดังรูปที่ 2.2 แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง เป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยาง เป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีความหนาแน่น 0.92 กรัม/มิลลิลิตร อนุภาคของเนื้อยางมีทั้งรูปทรงกลมและรูปรี คล้ายลูกแพร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 - 0.03 ไมครอน ไม่ละลายน้ำ ในสภาพน้ำยางสดถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารจำพวกไขมันและสารจำพวกโปรตีน นอกจากสารดังกล่าวแล้วยังมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียมและทองแดง ปนอยู่ในส่วนของยางประมาณ 0.05%



Surface protein and fats make rubber particles suspense in liquid form.

รูปที่ 2.2 ลักษณะอนุภาคของยางธรรมชาติ

2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือที่เรียกว่าซีรัมของน้ำยาง มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่างดังนี้[6]

- คาร์โบไฮเดรต เป็นสารจำพวกแป้งและน้ำตาล สารต่างๆเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกรดเช่น กรดฟอร์มิก กรดแอซิติค และกรดโพพิโอนิก ทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพคงตัวและจับตัวเป็นก้อน

- โปรตีนและกรดอะมิโน อยู่ในส่วนที่เรียกว่า C-Serum ที่สำคัญได้แก่ แอลฟาไกลูโคบินและอีวีน แอลฟาไกลูโคบินเป็นส่วนที่พบมากในน้ำยางสด มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในสารละลายของกรดและด่าง

2.2 ส่วนของลูทอยด์

ลูทอยด์หรือที่เรียกว่า วิสคอยด์ เป็นส่วนประกอบในน้ำยางสดที่ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Homan และ Van Gils(1948) พบว่าน้ำยางแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งมีสีขาว ประกอบด้วยอนุภาคของยางเป็นส่วนมาก และอีกส่วนหนึ่งเป็นสีเหลืองแยกอยู่ชั้นล่างปริมาตรของส่วนที่เป็นสีเหลืองประมาณ 25% ของปริมาตรทั้งหมด ในส่วนชั้นล่างนี้จากการศึกษาพบว่าอนุภาคที่ไม่ค่อยเกาะกันแน่น มีความแตกต่างจากอนุภาคของยางและเหตุที่ถูกเรียกว่าลูทอยด์เพราะเข้าใจว่าเป็นตัวกระทำให้เกิดสีเหลืองในส่วนนี้

ลักษณะของลูทอยด์เป็นอนุภาคมีเยื่อบางหุ้มห่ออยู่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 ไมครอน ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคยาง ภายในเยื่อบางมีส่วนที่เรียกว่า B-Serum ที่มีส่วนของสารละลายกรด กลีเซอรีน โปรตีน น้ำตาลและพอลิฟีนอลออกซิเดสซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ของเหลวในลูทอยด์มี pH 5.5 โดยประมาณปริมาณของลูทอยด์ในน้ำยางมีเพียงพอที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อความหนืดและเสถียรภาพของน้ำยางสด ลูทอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในอุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงอันดับแรกคือของเหลวในลูทอยด์จะหยุดการเคลื่อนไหว เนื่องจากการขยายตัวของเยื่อบางที่หุ้มอยู่หลังจากนั้นเนื้อเยื่อบางจะแตกตัวออกและของเหลวภายในจะออกมาอยู่ภายในส่วนของ serum เยื่อบางที่แตกออกเกิดการจับตัวกันเองและติดอยู่ภายในก้อนของอนุภาคสารอื่น

ลูทอยด์มีสมบัติที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางมีผลทำให้ลูทอยด์เกิดการบวมและพองตัวแล้วแตกออก ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น อนึ่งในการแปรรูปน้ำยางเป็นยางแท่ง ยางแผ่นได้รวมเอาชั้นตอนในการเจือจางน้ำยางด้วยวิธีการเติมน้ำลงไปก่อนการทำให้น้ำยางจับตัว หมายความว่าได้ทำให้ลูทอยด์แตกออกก่อนการเติมกรดเพื่อให้น้ำยางจับตัว และส่วนของลูทอยด์จะต้องติดอยู่ภายในก้อนยางที่มีการจับตัวด้วย และส่วนของลูทอยด์ที่ติดอยู่ในก้อนยางนี้จะมีผลกระทบต่อสมบัติยางด้วย เนื่องจากมีสารพวกโลหะละลายอยู่ในของเหลว

ในการกรีดยางจะทำให้น้ำยางในท่อยางเกิดการเจือจางเมื่อน้ำยางไหลได้สักพัก ซึ่งจะยังผลให้ลูทอยด์เกิดการพองตัวและแตกออกในเวลาต่อมา จะมีผลทำให้น้ำยางจับตัวอุดท่อน้ำยาง ทำให้น้ำยางหยุดไหล และอีกกรณีหนึ่งขณะที่กรีดยาง คมมีดจะเสียดหรือกระทบกับลูทอยด์ทำให้ลูทอยด์แตกออก ซึ่งจะยังมีผลทำให้น้ำยางหยุดไหลได้เช่นกัน

ในส่วนของชั้นล่างนี้ นอกจากจะมีสารพวกลูทอยด์แล้ว ยังมีสารอีกพวกหนึ่งที่เรียกว่า “อนุภาคฟรี-วิสลิง” (Frey wyssing) ซึ่งมีสีเหลืองเข้ม มีอนุภาคใหญ่กว่ายางและมีความหนาแน่น

มากกว่ายางเล็กน้อย มีคาโรตีนอยด์ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสีเหลือง โดยสีเหลืองจะเข้มมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาโรตีนอยด์เหล่านี้ ฟริวติลิ่งมีส่วนประกอบของไขมัน อนุภาคเหล่านี้จะรวมตัวอยู่ในแอมโมเนีย และแยกตัวออกจากยางอยู่ในส่วนของซีรัม เมื่อมีการเติมแอมโมเนีย

การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ

การเริ่มต้นนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมานานกว่า 100 ปีแล้ว ซึ่งมีจากรายงานของ Charle de la Condamine ในปี 1736 แจ้งว่าชาวพื้นเมืองแถบลุ่มน้ำ Amazon ได้ผลิตรองเท้ายาง ขวดยาง จากน้ำยางของต้นยางพารา นักเทคโนโลยีสมัยแรกๆ เช่น Hancock ก็เริ่มงานเทคโนโลยีทางการศึกษาวิจัยกับน้ำยางพาราสดที่ได้มาจากประเทศบราซิล จนกระทั่งได้ทำการจดทะเบียนการทำผลิตภัณฑ์พวกใช้ผ้าเคลือบยาง การทำด้ายยืด อย่างไรก็ตาม แม้ว่าได้มีการเริ่มต้นของการใช้ประโยชน์จากน้ำยางธรรมชาติแล้วก็ตาม ปัญหาในขณะนั้นก็คือ แหล่งวัตถุดิบน้ำยางนั้นอยู่ห่างไกลจากแหล่งที่นำน้ำยางไปใช้งาน ดังนั้นจึงได้เกิดแนวความคิดการศึกษาวิจัยการรักษาสภาพของน้ำยาง ตลอดจนกระบวนการปั่นเพื่อผลิตน้ำยางขึ้นขึ้น น้ำยางที่ผ่านกระบวนการนั้นจะมีลักษณะเหมาะสมในการที่จะขนส่งเคลื่อนย้ายไปที่ไกลๆ

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติได้เกิดขึ้นตามลำดับในปี 1923 Jacques ได้จดลิขสิทธิ์เกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบจุ่ม (dipping process) และการใช้ Sulphur monochloride เป็นสารเคมีสำหรับทำให้ยางคงรูป (Vulcanization) การผลิตยางฟองน้ำ โดยอาศัยวิธีการปั่นกวนน้ำยางด้วยระบบทางเคลื่อนมือกล (mechanical agitation) เป็นผลงานของ F.H. Utiadt ในปี ค.ศ.1930 และต่อมาอีกราวๆ 35ปีวิธีการนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการผลิตยางฟองน้ำรองพรอม (tufted carpet) โดยใช้กระบวนการผลิตว่า “no-gel process” การพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตยางฟองน้ำได้พัฒนามาจนถึงปัจจุบัน กรรมวิธีผลิตยางฟองน้ำส่วนใหญ่จะใช้วิธีการของดันลอป (Dunlop sodium silicofluride gelling) และวิธีการของ Talalay บริษัทดันลอปจะนอกจากจะพัฒนาการผลิตยางฟองน้ำแล้ว ยังได้พัฒนาเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตด้ายยืดโดยใช้วิธี extrusion จนสามารถทำการค้าได้ภายในปี ค.ศ.1930 และช่วงนี้ก็พัฒนาผลิตภัณฑ์อื่นๆจากน้ำยางได้แก่ ผลิตภัณฑ์ใช้น้ำยางเคลือบเส้นใยต่างๆ

ในปัจจุบันการนำผลผลิตจากต้นยางพาราไปใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ในรูปของยางแห้ง (dry rubber) ได้แก่ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง และบางเครพ และน้ำยางข้น (Concentration latex) เป็นผลผลิตที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพราะเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นถุงมือยาง

2.5 น้ำยางข้น[7]

1) การผลิตน้ำยางข้น

ปกติน้ำยางที่มากสวน จะมีปริมาณยางแห้งเพียง 25-45 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นน้ำและมีสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางบ้าง ฉะนั้นหากต้องการนำน้ำยางไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ไกลสวนยางหรือจากแหล่งยางธรรมชาติ จึงเป็นการไม่สะดวก นอกจากนั้นสารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยาง ยังอาจมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีคุณภาพไม่ดี ด้วยเหตุผลเหล่านี้คือที่มาของการทำน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางที่มีความข้นคือมีปริมาณน้ำยางแห้งเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

วิธีการผลิตน้ำยางข้นที่ทำกันในเชิงการค้ามี 3 วิธีคือ วิธีระเหยน้ำ วิธีทำให้เกิดครีม วิธีปั่นและอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถทำการค้าได้เพราะไม่สะดวกและลงทุนสูง คือการใช้กระแสไฟฟ้าแยก สำหรับในประเทศไทย ปัจจุบันทำการผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการปั่นเพียงอย่างเดียว รายละเอียดของแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

1.1 วิธีการระเหยน้ำ

น้ำยางสดจากสวนก่อนการทำให้ข้น โดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (stabilizers) เช่น potassium soap เสียก่อน การระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือภาชนะที่หมุนได้รอบๆ แกน ตามแนวนอนและถังนี้ถูกให้ความร้อนรอบๆถึง การระเหยน้ำจากน้ำยางจะทำให้ได้น้ำยางข้นซึ่งมีปริมาณเนื้อยาง 60% น้ำยางข้นที่ได้จากวิธีนี้มีความคงสภาพเป็นน้ำยางดีมาก จึงเหมาะสำหรับการที่จะต้องขนย้ายน้ำยางไปไกลๆ และเหมาะกับการนำไปผลิตวัตถุสำเร็จรูปประเภทที่ต้องใส่พวกสารเพิ่ม (filler) จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตกาว (latex cement) น้ำยางนี้เหมาะหรือใช้ได้ผลดี กรณีต้องการนำไปทำกาว ประเภทที่วาสารอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำยางและความคงตัวของน้ำยางเป็นข้อได้เปรียบกับการทำกาวนั้นๆ

1.2 วิธีทำให้เกิดครีม

น้ำยางธรรมชาติไม่ว่าอยู่ในสถานะสด หรือสถานะที่มีการใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (preserved latex) ประกอบด้วยระบบของสารคอลลอยด์แบบอิมัลชัน (Colloidal emulsion) ของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่า serum อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรัมแสดงการเคลื่อนไหวแบบ Brownian (คือการเคลื่อนไหวทุกทิศทางอย่างไม่มีระเบียบ) และการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางสดจะรวดเร็วกว่าการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางที่ใส่สารเคมี

รักษาสภาพ เนื่องจากอนุภาคของยางมีความหนาแน่นน้อยกว่า serum ดังนั้นอนุภาคยางเหล่านี้จึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำยางได้และตามกฎของ Stokes อาจคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางตามสูตรต่อไปนี้

$$V = \frac{2/9g(d-d_1)r^2}{m}$$

เมื่อ	V	=	อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาง (มม./วินาที)
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (ชม./วินาที ²)
	d	=	ความหนาแน่นของซีรัม (1.021 กรัม/ชม. ³)
	d ₁	=	ความหนาแน่นของอนุภาคยาง (0.91 กรัม/ชม. ³)
	r	=	รัศมีของอนุภาค (เฉลี่ย 0.5 ไมครอน)
	m	=	ความหนืดของซีรัม (ประมาณ 0.02 พอยส์)

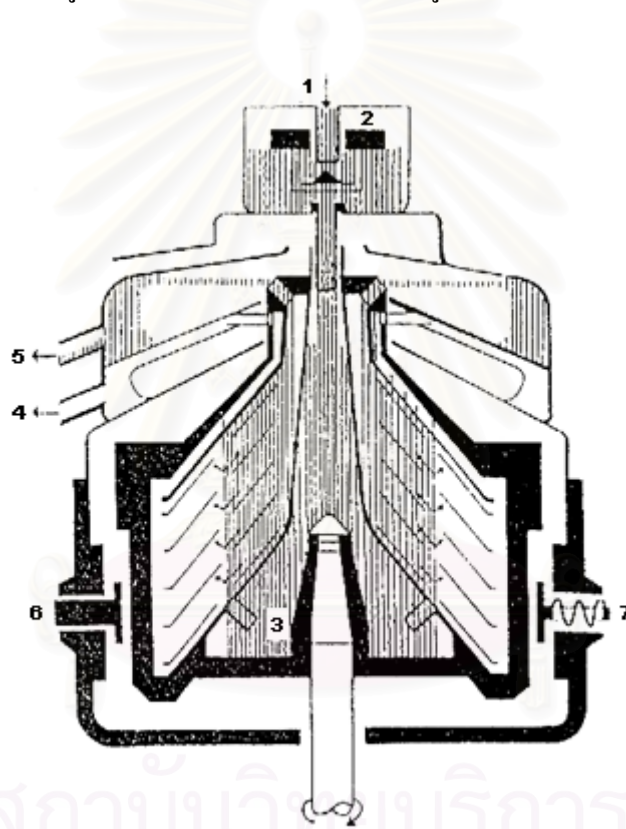
จากสูตรดังกล่าวอาจคำนวณได้ว่าอนุภาคยางเคลื่อนที่ได้(ตามทฤษฎี)ประมาณเดือนละ 6 ชม. และเนื่องจากว่าความเร็วของเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับกำลังสองของรัศมีของอนุภาค ดังนั้นการแยกตัวของอนุภาคเกิดเป็นลักษณะครีมอยู่ผิวหน้ายางจะรวดเร็วขึ้นถ้าอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น และอนุภาคยางจะใหญ่โตขึ้นได้เมื่อเติมสารคอลลอยด์ที่จะไปทำหน้าที่พอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง สารนี้จึงเรียกว่าเป็นตัวการทำให้เกิดครีม(creaming agent) ตัวอย่างสารพวกนี้ได้แก่ sodium alginate, locust bean gum, gum karaya, gum tragacanth เป็นต้น อนึ่งการผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีทำให้เกิดครีมยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา แต่เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิธีนี้คือสามารถทำให้น้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธีนี้บริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านกรรมวิธีการทำให้เกิดครีมซ้ำหลายๆครั้ง

1.3 วิธีการปั่น

เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารละลายที่จัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ (Colloid system) ที่ประกอบด้วยส่วนของอนุภาคยาง (rubber particle) แขนงลอยกระจัดกระจายอยู่ในซีรัม อนุภาคยางเหล่านี้เคลื่อนไหวแบบไร้ทิศทาง(Brownian movement) และเนื่องจากอนุภาคยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีรัม ดังนั้นอนุภาคยางจึงมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสู่ผิวหน้าของน้ำยาง อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลก ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดึงดูดได้เป็น 2000 ถึง 3000 เท่าของแรงดึงดูดของโลก จึงสามารถเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางได้ จากหลักการนี้จึงถูกนำมาพิจารณาสร้างเครื่องปั่นน้ำยางเพื่อการผลิตน้ำยางข้น

เครื่องผลิตน้ำยางข้น ผลิตจำหน่ายโดยหลายบริษัทเช่นบริษัท Alfa-Laval ประเทศสวีเดน บริษัท Westfalia Separatro Co., ประเทศเยอรมัน และอีกสองบริษัทในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะหน้าตัดภายในของถังปั่นแบบ Alfa-Laval

น้ำยางจะไหลเข้าทาง (1) ซึ่งอยู่ส่วนบนสุดของตัวเครื่อง ระดับของน้ำยางจะปรับให้คงที่ โดย (2) น้ำยางไหลโดยแรงโน้มถ่วง (gravity) ไปที่จุดกลางของถังปั่นและแรงปั่นของเครื่องจะปั่นให้น้ำยางไหลไปตามรูของชุดจานแยก (3) จากนั้นน้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีน้ำหนัก (heavy phase) คือหางน้ำยาง (skim) ไหลออกสู่รอบนอกของถังปั่นและไปตามทางด้านบนของถังผ่านสกรู ปรับสู่ที่เก็บแยกหางน้ำยาง (4) ส่วนของน้ำยาง (concentration or cream) ซึ่งเป็นส่วนที่มีเนื้อยางจะไหลเข้าสู่กลางถังปั่น ไปยังด้านบนถึงเข้าสู่ที่เก็บ (5)



รูป 2.3 ภาพหน้าตัดตามยาวของเครื่องปั่นน้ำยางข้น

ปกติน้ำยางข้นที่ได้จากเครื่องปั่นจะมีความเข้มข้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง เครื่องปั่นน้ำยางขนาดเล็กๆ สามารถแยกน้ำยางสดได้ประมาณ 15 ลิตร/ชั่วโมง และเครื่องขนาดใหญ่แยกน้ำยางสดได้ 400-600 ลิตร/ชั่วโมง และปกติการเดินเครื่องปั่นจะสามารถเดินติดต่อกันได้อย่างมากครั้งละไม่เกิน 3 ชั่วโมง เพราะจำต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดล้างพวกตม (studge) ที่ติดอยู่ในเครื่อง

1.4 วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

จากการที่ในสถานะของน้ำยาง อนุภาคแขวนลอยอยู่ในซีรัมต่างถูกห่อหุ้มด้วยคาร์บอกซิเลทไอออน(carboxylate ion, RCO_2^-) ที่เป็นประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถที่จะอาศัยไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของซีรัมได้ โดยการวิธีการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่ได้เติมสารเคมีช่วยทำให้น้ำยางคงตัวไว้ แล้วอนุภาคยางจะค่อยๆเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ทางขั้วบวกและลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำยางในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคยางต่ำกว่าความหนาแน่นของซีรัม อย่างไรก็ตามวิธีการทำน้ำยางข้นโดยใช้ไฟฟ้านี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและไม่ประหยัดจึงไม่เป็นที่นิยม

2) การรักษาสภาพน้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ผลิตได้ต้องเติม หรือปรับแอมโมเนียรักษาสภาพน้ำยาง ปกติมีวิธีการรักษาน้ำยางข้นจะมี 2 วิธี

2.1 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ต่อ น้ำหนักยาง เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (high ammonia)

2.2 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียต่ำ ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักยาง และมีสารบางชนิด TMTD/ ZnO ในอัตราส่วน 0.025% หรือ ZDEC 0.01% จะเรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (Low ammonia)

3) สมบัติน้ำยางข้น

สมบัติที่ใช้ระบุน้ำยางข้น คือ

3.1 ปริมาณสารของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)

3.2 ปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC)

3.3 สภาพความเป็นด่าง (alkalinity, $\% \text{NH}_3$)

3.4 เวลาความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability time, MST)

3.5 จำนวนกรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acid number, VFA No.)

3.6 จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide number, KOH No.)

3.7 ปริมาณก้อนยางจับตัว (coagulum content)

3.8 ปริมาณตะกอน (sludge content)

3.9 กลิ่นและสี

2.6 น้ำยางคงรูปหรือวัลคาไนซ์

น้ำยางคงรูป หรือน้ำยางวัลคาไนซ์ หรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised latex) หมายถึง น้ำยางที่โมเลกุลยางได้เกิดพันธะเคมี (chemical crosslink) อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนกับ น้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นแล้วน้ำยางผสมสารเคมี (compounded latex) หมายถึงน้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีต่าง ๆ แล้ว และส่วนใหญ่จะใช้สารเคมีช่วยเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) พวก dithiocarbamate อยู่ด้วย โดยปกติ จะทำการผสมสารเคมีกับยางแล้วบ่มหรือเก็บไว้ (maturation) ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องด้วย น้ำยางผสมสารเคมีส่วนใหญ่จะผสมสารในระบบการทำน้ำยางคงรูป (เช่น S+ZDEC+ZnO) ไว้แล้ว ดังนั้นขณะการบ่มหรือเก็บน้ำยางจึงอาจเกิดปฏิกิริยายางคงรูป-โมเลกุลยางเกิดพันธะเคมีขึ้นได้ ซึ่งการเกิดยางคงรูปจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการเก็บน้ำยาง และความว่องไวของสารช่วยเร่งยางคงรูป สำหรับการทำน้ำยางคงรูปหรือน้ำยางวัลคาไนซ์อาจพิจารณาว่าเป็นวิธีการพิเศษวิธีหนึ่งของ การบ่มน้ำยางผสมสารเคมี

น้ำยางคงรูปมีบทบาทสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทจุ่มแบบพิมพ์ (dipping) และประเภทหล่อเข้าพิมพ์ (casting) เพราะน้ำยางคงรูปมีข้อได้เปรียบคือขณะที่นำไปใช้อาจมีการเติมสารเคมีบ้างอีกเพียงเล็กน้อย เช่น พวกสารป้องกันยางเสื่อมหรือพวกสีต่าง ๆ และไม่จำเป็นต้องทำให้น้ำยางคงรูป ภายหลัง (post-vulcanisation) การขึ้นรูปคือจุ่มแบบพิมพ์หรือหล่อเข้าพิมพ์

2.7 การผลิตน้ำยางคงรูป

วิธีการผลิตน้ำยางคงรูปมีหลักการที่สำคัญคือ ผสมสารเคมีที่จำเป็นในการเกิดยางคงรูป ซึ่งได้แก่ สารในระบบให้เกิดยางคงรูป (vulcanising system=sulphur+accelerator+activator)กับน้ำยางที่ได้ผ่านการเติมสารช่วยความคงตัวที่เป็นของเหลว แล้วให้ความร้อนประมาณ 50C- 70C. หรืออาจทำน้ำยางคงรูปโดยไม่ใช้สารซัลเฟอร์ คือ เป็นระบบ "sulphurless" หรืออาจทำน้ำยางคงรูปที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 28C – 30C ซ. โดยใช้สารเร่งยางคงรูประบบที่ว่องไวมากเช่น sodium or zinc salt of dibutyldithiocarbamates นอกจากนี้ น้ำยางคงรูปยังอาจทำได้โดยให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เช่น กิวมิวไฮโดรเปอร์ออกไซด์

2.8 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางคงรูป

วิธีการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบไปด้วยการนำน้ำยางข้น หรือน้ำยางสดมาผสมกับสารเคมีในระบบทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) ซึ่งประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยาเช่น Zinc diethyl dithiocarbamate(ZDEC)และกำมะถัน พร้อมทั้งสารระบบช่วยความคงตัว

1. น้ำยางข้น (Concentration Latex) นิยมใช้น้ำยางข้น 60%DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยการหมุนเหวี่ยง ซึ่งอาจจะมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียแบบต่ำ(LA-TZ, low ammonia-tetramethyl thiuram disulphide/zinc oxide) หรือ แบบรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียแบบสูง(HA) ก็ได้
2. สารเคมีที่เป็นส่วนผสมซึ่งประกอบไปด้วย

2.1 สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer)

โดยทั่วไปเป็นด่างและสบู่ของกรดไขมัน ด่างที่ใช้จะใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์เพราะอนุมูลของโพแทสเซียมมีผลต่อการลดความคงตัวของน้ำยางน้อยกว่า อนุมูลของโซเดียมปริมาณการใช้ด่างจะอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้น้ำยางโดยการช่วยรักษาความเป็นด่างของน้ำยางเพราะแอมโมเนียอาจจะหายไปบ้าง นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดคริมที่ผิวน้ำยางอีกด้วย ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบไปด้วยคาร์บอน 8-12 อะตอม เช่น โพแทสเซียมแคปรีเลต (potassium caprylate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$) และโพแทสเซียมลอเรต (potassium laurate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$) สบู่ของกรดไขมันจะช่วยให้น้ำยางมีความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability) ดีขึ้น แต่ไม่ควรใส่สารนี้มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดฟองได้ โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 0.2-0.4 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

2.2 สารในระบบการคงรูป (vulcaning system)

ใช้ระบบการคงรูปที่ประกอบด้วยกำมะถันเป็นสารทำให้เกิดการคงรูป (Vulcanizing agent) ซิงค์ออกไซด์(ZnO) เป็นสารกระตุ้น(activator) และใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (accelerator) ชนิดเดียวหรือสองชนิดขึ้นไปสามารถใช้สารเร่งชนิดไวต่อปฏิกิริยา (ultra accelerator) เช่นกลุ่ม dithiocarbamate ได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องปัญหายางเกิดคงรูปก่อนกำหนด เช่น ที่เกิดในกรณีใช้กับยางแห้ง

ปริมาณการใช้ซัลเฟอร์อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน แปรตามอัตราความเร็วที่จะเกิดการคงรูปและ โมดูลัส (modulus) ของยางที่ต้องการ และขึ้นกับปริมาณสารอื่นๆ ที่เติมลงในน้ำยางด้วย หากต้องการให้ฟิล์มทนความร้อนได้ดีที่สุดต้องใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณที่ใช้จำเป็นต้องสอดคล้องกับ โมดูลัสที่ต้องการด้วย ในการใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำต้องใช้ร่วมกับ สารเร่งชนิดไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้มีอัตราเร็วของการเกิดยางคงรูป (rate of vulcanization) เพียงพอ

สารเร่งปฏิกิริยาของยางคงรูปที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl-dithiocarbamate, ZDEC) ปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ZDEC จะเพิ่มอัตราเร็วของการคงรูปขึ้นอย่างเด่นชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ZDEC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการคงรูปก่อน (pre-vulcanization) ถ้าเก็บน้ำยางที่ผสม ZDEC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้น้ำยางที่ผสม ZDEC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ การใช้ ZDEC ในยางที่ไม่เติมสารเพิ่ม (filler) จะได้อย่างที่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงจนขาดและความยาวที่ยืดจนขาดและความยาวที่ยืดจนขาดดีเยี่ยม โมดูลัสปานกลาง

หากต้องการที่โมดูลัสสูงขึ้นไปให้ใช้ ZDEC ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาของยางคงรูป กลุ่มไทอาโซล (thiazole) เช่นซิงค์เมอแคปโทเบนซไทอาโซล (zinc-mercaptobanzthiazole, ZMBT) การใช้ ZDEC ร่วมกับ ZMBT นอกจากทำให้น้ำยางมีโมดูลัสเพิ่มขึ้นแล้ว ยังมีผลในการเสริมประสิทธิภาพการคงรูปให้เร็วขึ้นแล้วยังมีผลในการเสริมประสิทธิภาพการคงรูปให้เร็วขึ้นมากกว่าการใช้แต่ละตัวตามลำพัง สารกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตตัวอื่นๆ ซึ่งนำมาใช้แทน ZDEC เพื่อให้ได้สมบัติบางอย่าง เช่น ซิงค์ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dibutyl dithiocarbamate, ZBDC) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเร็วกว่า ZDEC จึงง่ายต่อการที่จะเกิดการคงรูปขึ้นก่อนอย่างช้าๆ ขณะบ่มน้ำยางผสมสารเคมีไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2.3 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antioxidant)

สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามี 2 กลุ่มคือ

2.3.1 เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (amine/amine derivative)

2.3.2 ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol/ phenol derivative)

กลุ่มแรกมีข้อเสียคือทำให้น้ำยางเปลี่ยนสี (staining) ส่วนกลุ่มที่สองจะไม่ทำให้น้ำยางเปลี่ยนสี (non-staining) ถึงแม้ประสิทธิภาพด้อยกว่ากลุ่มแรก ความนิยมในการผลิตสูงมีอย่างนิยมใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลมากกว่าปริมาณการใช้ประมาณ 1 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

สารทุกกลุ่มดังกล่าวข้างต้นเมื่อจะใช้ผสมกับน้ำยางจะต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลว เช่น สารละลาย สารแขวนลอยหรืออิมัลชันเสียก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะใช้ว่าสามารถเตรียมให้อยู่สถานะใดได้

2.9 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง

ข้อที่ควรนำมาพิจารณาในการผสมสารเคมีต่างๆ กับน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังผสมเสร็จแล้ว(latex compounded) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่างๆ ได้อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ

สารเคมีที่ได้เตรียมให้อยู่ในสถานะต่างๆคือสารละลาย, สารแขวนลอย หรืออิมัลชันแล้วนั้น ควรต้องมีความตรวจสอบความเข้มข้น คือ ตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดพอเพียงหรือไม่ (ปกติควรมีความละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร ตลอดจนต้องตรวจสอบความเป็นกรดต่างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยควบคุมเกี่ยวกับสถานะความคงตัวของน้ำยางเสียคือจับตัวง่าย และ สถานะเป็นต่างมากเกินไปน้ำยางมีความคงตัวมากไปก็จะมีปัญหา คือน้ำยางไม่ยอมฟอรั่มยางเกาะแบบพิมพ์ในขณะที่ถึงขั้นตอนที่ต้องการให้ยางจับพิมพ์เป็นต้น

ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยาง

1. เติมน้ำลงในน้ำยางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ
2. เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว (stabilizer)
3. เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป (Vulcanizing system)*
4. เติมสารป้องกันยางเสื่อม
5. เติมสารสี(pigment)(ถ้าต้องการ)

*ควรเติม ZnO หลังสุดเพื่อกันน้ำยางหนืด (zinc oxide thickening)

แต่ละกลุ่มหรือแต่ละอย่างของสารที่เติมลงไปในน้ำยางจะต้องผสมเข้ากับน้ำยางเป็นอย่างดีเสียก่อนจึงเติมสารตัวต่อไปลงไป ในการกวนผสมน้ำยางจะใช้เครื่องกวนคิดใบกวนใบใหญ่ ความเร็วของการกวนประมาณ 5-60 รอบ/นาที

2.10 ภาชนะบรรจุน้ำยางผสม

ภาชนะที่จะใช้บรรจุน้ำยางผสมควรทำมาจากสแตนเลส หรือ epoxy-lined mild steel หรือ glass-fiber reinforce plastics เป็นต้น ไม่แนะนำให้ใช้ภาชนะที่ทำด้วยอลูมิเนียมและไม่ควรใช้ทองเหลืองในส่วนใดๆของภาชนะ

ขนาดของภาชนะขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตและความถี่ของการผสมน้ำยาง รูปร่างของภาชนะควรเป็นทรวงระบอกอ้วน คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความลึก ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการล้างทำความสะอาดและมีฝาปิดได้สนิท

2.11 การกวนและระยะเวลากวนน้ำยางผสม

ภาชนะบรรจุน้ำยางควรมีอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำยางซึ่งควบคุมความเร็วการกวนภาชนะได้ในช่วง 5-60 รอบต่อนาที ใบกวนควรมีขนาดใหญ่ (เช่น 3/4 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ) เพื่อให้ได้การกวนในช่วงความเร็วต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ แกนของใบพัดควรเป็นส่วนที่จะต้องสัมผัสกับน้ำยาง ต้องทำจากสแตนเลส ถ้าหากภาชนะมีความลึก ควรมีใบพัดกวนมากกว่า 1 ชุด เพื่อให้กวนได้อย่างสม่ำเสมอ

ระยะเวลาที่จะกวนน้ำยางผสมกับสารเคมีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบกวนและปริมาณของน้ำยางผสม อย่างไรก็ตามควรกวนน้ำยางให้น้อยที่สุด แต่ขณะเดียวกันการกวนต้องพอเพียงมราจะให้น้ำยางมีความสม่ำเสมออย่างทั่วถึง ระยะเวลากวนผสมอาจประมาณ 30-60 นาที ถ้าจะเก็บน้ำยางผสมไว้เพื่อการบ่ม หรือเพื่อการทำให้เกิดพรีวัลคาไนซ์ก็ควรกวนน้ำยางต่อไปซึ่งอาจกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ (5-10 รอบต่อนาที) หรือกวนเป็นครั้งคราวด้วยความเร็วสูงเล็กน้อย (20-30 รอบต่อนาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันสารเคมีต่างๆ ตกตะกอนลงก้นภาชนะ

จุดประสงค์ของการกวนน้ำยางด้วยความเร็วต่ำและจำกัดระยะเวลาเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดน้ำยางผสมเสียความคงตัว

2.12 การกำจัดฟองอากาศ

ในขณะที่กวนผสมน้ำยางหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีฟองอากาศเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฟองอากาศจะเกิดมากถ้ากวนน้ำยางด้วยความเร็วสูง การเติมสบู่ของกรดไขมันในปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ ซึ่งยากแก่การกำจัดออกจากน้ำยาง อย่างไรก็ตามเมื่อนำน้ำยางไปใช้งานจะต้องกำจัดฟองอากาศออกเสียก่อน โดยปกติแล้วฟองอากาศมักจะลอยสู่ผิวหน้า เมื่อตั้งทิ้งไว้ การกวนเบาๆ ขณะเก็บน้ำยางจะช่วยเร่งการลอยของฟองอากาศสู่ผิวหน้าน้ำยาง แต่ถ้าการกวนเร็วและมากเกินไปก็จะกลับทำให้ฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าช้าลง นอกจากนี้อัตราการเคลื่อนที่ของฟองอากาศสู่ผิวหน้ายังขึ้นอยู่กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศและความหนืดของน้ำยางถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กมากหรือถ้ามีน้ำยางมีความหนืดสูง อาจต้องกำจัดฟองอากาศโดยใช้ระบบสูญญากาศ โดยใช้วิธีลดความดันบรรยากาศที่เหนือผิวหน้าน้ำยางลงเหลือประมาณ 200 มิลลิเมตร

ปรอท จะช่วยกำจัดฟองอากาศออกได้ได้ภายในเวลา 12-16 ชั่วโมง การลดความดันดังกล่าวมีผลในการเพิ่มขนาดของฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น

2.13 วิธีทดสอบน้ำยางคงรูป

เนื่องจากน้ำยางคงรูปมีลักษณะที่มองด้วยสายตาไม่ค่อยแตกต่างไปจากน้ำยางชั้นธรรมดา ดังนั้นวิธีการที่จะตรวจสอบว่าน้ำยางเป็นน้ำยางคงรูป หรือไม่นั้นจึงต้องอาศัยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และวิธีการที่จะกล่าวต่อไปนี้ยังสามารถใช้ตรวจสอบระดับสถานะของการคงรูป (degree of vulcanisation) ของน้ำยางผสมสารเคมี

1. ทดสอบโดยใช้คลอโรฟอร์ม (chloroform test) หลักการของวิธีนี้คือ ทำให้น้ำยางจำนวนเล็กน้อยจับตัวด้วยการหยดคลอโรฟอร์ม หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbontetrachloride) ปริมาณที่เท่ากับปริมาณน้ำยาง (เช่น 10 มล.) และกวนด้วยแท่งแก้ว ลักษณะก้อนยางที่จับตัวในเวลา 2-3 นาที จะบ่งแสดงสถานะของการคงรูปนั้นคือ :

สถานะ ลักษณะยางจับตัว

No. 1 ยังไม่คงรูป (unvulcanised)

เป็นก้อนเดี่ยวเหนียว

No. 2 คงรูปบ้างเล็กน้อย (lightly vulcanised) เป็นก้อนนุ่มหยวบๆ

No. 3 คงรูปปานกลาง (moderately vulcanised) เป็นเม็ดร่วนไม่เหนียว

No. 4 คงรูปเต็มที่ (fully vulcanised) เป็นเม็ดแห้งๆ และละเอียด

2. ทดสอบการบวมของยาง (equilibrium swelling) วิธีนี้จะทดสอบโดยเทน้ำยางคงรูปทำเป็นแผ่นฟิล์ม อบแห้ง แล้วตัดฟิล์มยางเป็นสี่เหลี่ยมเล็กๆ นำไปแช่ในตัวทำละลาย เช่น toluene, xylene, cyclohexane ภายหลังการแช่ยางในตัวทำละลายประมาณ 30 นาที จึงวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยการทำให้ชุ่มเพื่อประเมินหาสถานะของการคงรูป ซึ่งระบุเป็นสัดส่วนการบวม (swelling ratio) ที่คำนวณมาจากเส้นผ่าศูนย์กลาง ของชิ้นตัวอย่าง ยางภายหลังการแช่ในตัวทำละลาย 30 นาทีหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางก่อนการแช่ในตัวทำละลาย และสัดส่วนที่ได้มีความหมายดังนี้ :

มากกว่า 2.6 = unvulcanised

2.0 - 2.6 = lightly vulcanised

1.8 - 2.0 = moderately vulcanised

น้อยกว่า 1.75 = fully vulcanised

3. ทดสอบโดยใช้เครื่องดึงยาง (tensile test) โดยการทำให้แผ่นฟิล์มแห้งจากน้ำยางคงรูปแล้วนำไปทดสอบการดึงหรือยืดตามความยาวกำหนด (modulus) หรือดึงยางจนขาด (tensile strength) จากผลของค่าเหล่านี้สามารถจะประเมินหาระดับการคงรูปของยางได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยหาแรงที่ดึงยางออกยาง 100% ของความยาวเดิม นาน 1 นาที (หรือคือ MR 100) เป็นวิธีการที่ให้ผลในการตรวจสอบการคงรูปของยางที่น่าเชื่อถือมาก

ทดสอบโดยวิธี Prevulcanisate Relaxed Modulus (PRM) ซึ่ง MRPRA (Malaysian Rubber Producers Research Association) เป็นผู้กำหนดขึ้น โดยวิธีการนี้จะใช้พื้นฐานจากวิธีทดสอบ MR 100 แต่มีวิธีเตรียมชิ้นทดสอบภายในเวลาอันสั้นคือประมาณ 10 นาที ในขณะที่วิธีการทดสอบหา MR 100 ต้องใช้เวลาเตรียมชิ้นทดสอบ ประมาณ 24 ชั่วโมงการเตรียมชิ้นทดสอบโดยวิธี PRM ประกอบด้วยการจุ่มหลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ยาว 10.5 ซม. ลงในน้ำยางที่ทำให้เจือจางเป็น 50% TSC ด้วยน้ำแล้วทำให้ยาง ที่จับหลอดแก้วแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 70C. นาน 4 นาที นำหลอดแก้วออกจากตู้อบ เช็จุดขาวที่อาจมีในฟิล์มยางบนหลอดแก้วออกไป รูดฟิล์มยางเป็นวงออกจากหลอดแก้วและทำให้เย็นใน desiccator (ประมาณ 2 นาที) นำวางยางไปชั่งน้ำหนัก แล้วทดสอบโดยเครื่อง MR 100 modulus tester หรือเครื่องวัดแรงดึงยางชนิดที่มีความสามารถวัดหาค่าแรง ให้ละเอียดในช่วง 100-300 กรัมได้ โดยอ่านค่าแรงหลังจากยืดยาง 100% ของความยาว เดิมเป็นเวลา 1 นาที การคำนวณค่า PRM ตามสูตรต่อไปนี้

$$PRM (kg/cm^2)* = (Fd)/2W$$

F = แรง, เป็นกิโลกรัม อ่านภายหลังจากยืดยางนาน 1 นาที

d = ความหนาแน่นของยาง, กรัม/ตารางเซนติเมตร

l = เส้นรอบวงภายนอกของหลอดแก้ว, เซนติเมตร

W = น้ำหนักของชิ้นทดสอบ, กรัม

$$(* kg/cm^2 = 0.098 MPa)$$

แฟกเตอร์ 2 ในสูตรมาจากการที่ชิ้นทดสอบเป็นวง สำหรับยางที่ไม่มีสารเพิ่มเจือปน (pure gum vulcanisate) ความหนาแน่นคือ 0.94 กรัม/ตารางเซนติเมตร และหลอด แก้วซึ่งเป็นหลอดสำหรับปั่นแยก (centrifuged tube) ที่ MRPRA ใช้มีขนาดยาว 12.57 เซนติเมตร ดังนั้นสูตรนี้จึงอาจปรับเป็น $PRM = (5.9F)/W kg/cm^2$

อนึ่งค่า PRM ที่คำนวณโดยวิธีดังกล่าวไม่ใช่ค่า modulus ที่แท้จริง เพราะไม่ได้คำนวณจากค่าพื้นที่หน้าตัดจริง ๆ อย่างไรก็ตามค่า PRM นี้จะไม่แตกต่างจากค่า modulus แท้จริง มากนัก ถ้าหากวงยางที่วัดจากหลอดแก้วหนาไม่เกิน 0.2 มม.

2.14 การใช้ประโยชน์จากน้ำยางคงรูป[8]

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยางคงรูปในปัจจุบันมีหลายอย่างเช่น ถูมมือยาง ถูยางอนามัย หรือฟิล์มยาง โดยการผลิตถูมมือยางจะมีขั้นตอนดังนี้

1. การสารเคมีผสมกับน้ำยาง

ในการผสมสารเคมีกับน้ำยางต้องผสมตามลำดับและต้องผสมกันเป็นอย่างดีก่อนจึงเติมสารตัวต่อไปลงไป

2. การจุ่มแบบ (dipping)

เมื่อผสมน้ำยางและบ่มจนได้อายุที่เหมาะสมแล้ว โดยก่อนจุ่มต้องทำความสะอาดพิมพ์ก่อนเพราะสิ่งสกปรกจะทำให้เกิดรอยตำหนิต่างๆบนถูมมือได้

เทคนิคที่ใช้การจุ่มมีหลายวิธีเช่น การจุ่มน้ำยางโดยตรง, การจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัว, การจุ่มโดยใช้พิมพ์ร้อนและการจุ่มโดยใช้ขี้ผึ้งช่วย

3. การล้าง (leaching)

การล้างยางเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของสารที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ตกค้างบนยางและยังเป็นการลดการระคายเคืองต่อผิวหนังเมื่อใช้ถูมมือยาง ในการล้างถูมมือยางนิยมล้างด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

4. การอบแห้งและการทำให้ยางคงรูป (drying and vulcanizing)

อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อให้ยางคงรูป

5. การม้วนขอบ (beading)

การม้วนขอบถูมมือยางเพื่อให้มีความแข็งแรง ในการม้วนจะม้วนขณะที่ยางเกาะบนพิมพ์แห้งและยังไม่ผ่านการทำให้ยางคงรูป

6. การถอดถูมมือออกจากพิมพ์

การถอดถูมมือออกจากพิมพ์จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต โดยทั่วไปมักใช้มือถอดและอาศัยแป้งเช่นแป้งข้าวโพด, แป้งทาลัส และ เกลย์

2.15 ท่อยาง

ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขนถ่ายของไหลโดยจะมีลักษณะภาพตัดขวางเป็นวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาที่แตกต่างกัน ท่อจะทำมาจากวัสดุต่างๆชนิดกันเช่น พีวีซี (Polyvinyl chloride) โลหะ, โลหะผสมหรือแก้ว โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมจะเป็นท่อที่ทำมาจากเหล็กคาร์บอนต่ำ, ท่อเหล็กแอส, ท่อพีวีซีและท่อยาง

การใช้เลือกใช้ท่อยางจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเช่น ชนิดของของไหลที่ใช้ในการขนถ่าย ช่วงอุณหภูมิ คุณสมบัติทางด้านความทนทาน

ตารางที่ 2.2 ชนิด, ลักษณะการใช้งานและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของท่อยางชนิดต่างๆ

ชนิดของยาง	ลักษณะการใช้งาน	ช่วงอุณหภูมิ
นีโอพรีน (Neoprene)	ทนต่อสารเคมี, โอโซน, ไขมัน, สารไฮโดรคาร์บอนจากปิโตรเลียม แต่ไม่ทนต่อตัวทำละลายคลอรีน, ตัวทำละลายมีขี้ผึ้ง และกรด	-40 C – 115 C
ไอโซบิวทีลีน ไอโซพรีน (Isobutylene Isoprene, IIR)	ทนต่อการขีดถู มีการยืดหยุ่นดี ทนต่อสภาพอากาศ และการทนต่อการใช้งาน แต่ไม่ทนต่อสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนและไม่ทนต่อไฟ	-46 C - 148 C
อครีโลไนไตรด์บิวทาไดอีน (Acrylonitrile Butadiene, NBR)	ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม, สารเคมี, ไฮโดรคาร์บอนและกรด มีสมบัติในการยืดดี และทนทานต่อสภาพอากาศ	-51 C – 148 C
ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomer)	ทำมาจากฟลูออโรโพลีเมอร์ โดยมีคุณสมบัติในการทนอุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมี	-23 C – 260 C
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	สมบัติการกระดอนสูง ทนต่อการฉีกขาด และค่าความต้านทานแรงดึงสูง สามารถยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ไม่ทนต่อการติดไฟและไม่ทนต่อสารจำพวกปิโตรเลียม	-51 C – 82 C

การออกแบบท่อน[9]

การเลือกใช้ท่อนนอกจากเลือกจากชนิดของของไหลที่ใช้ภายในท่อแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดจากภาระ(Load)ของท่อที่ต้องรับ

ชนิดของภาระที่ท่อจะต้องรับ

1. ความเค้นจากภาระยั่งยืน เช่น ความดัน น้ำหนัก
2. ความเค้นจากภาระบางครั้งบางคราว เช่น ลม การสั่นสะเทือน
3. ความเค้นจากการขยายตัว เช่น การขยายตัวเพราะความร้อน

2.16 เส้นใยและเมตริกซ์[3]

เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรง(strength) และโมดูลัสสูง อาจอยู่ในรูปเส้นใยยาวต่อเนื่อง(continuous fibers or filament) เส้นใยสั้น (short or chop fiber) เส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิตได้แก่เส้นใยคาร์บอน(carbon) เส้นใยแก้ว (glass) เส้นใยอะรามิก (aramid or Kevlar) เส้นใยโบรอน(boron)และเส้นใยพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงเป็นร้อยไมครอน อาจมีความยาวต่อเนื่องหรือเป็นเส้นใยที่ตัดสั้นไม่กี่เซนติเมตร

2.17 เส้นใยแก้ว(glass fibers)

ส่วนที่นิยมใช้เสริมแรงมากที่สุดกับเมตริกซ์พอลิเมอร์คือเส้นใยแก้ว ข้อได้เปรียบของเส้นใยแก้วคือราคาถูก ความแข็งแรงดีและความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อสารเคมีสูง ข้อเสียของใยแก้วคือค่ามอดูลัสต่ำ ไม่ทนทานต่อการขีดเสียดสี ความต้านทานต่อความล้า (fatigue-resistance)ต่ำ และมีการยึดเกาะต่อเมตริกซ์ค่อนข้างต่ำ

เส้นใยที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 3 ชนิดคือ

1. เส้นใยแก้วชนิด E (electrical) เรียกย่อๆว่า E-glass นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีความแข็งแรงดีความแข็ง (stiffness) สูง มีสมบัติการนำไฟฟ้า(electrical properties)และทนทานต่อดินฟ้าอากาศ(weathering properties)ดี
2. เส้นใยชนิด C(chemical or corrosion) เรียกย่อๆว่า “C-glass” เส้นใยแก้วชนิดนี้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีสูง แต่มีราคาแพงกว่าและความแข็งแรงต่ำกว่า
3. เส้นใยชนิด S (strength) เรียกย่อๆว่า “S-glass” เป็นเส้นใยที่มีค่ามอดูลัสสูงและทนอุณหภูมิใช้งานสูงกว่า แต่มีราคาแพง

เส้นใยแก้วมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น “ซิลิกา” (silica, SiO₂) และมีส่วนประกอบอื่นเป็น

ออกไซด์ของแคลเซียม(CaO) ,แมกนีเซียม(MgO) ,โซเดียม(Na_2O) ,เหล็ก(Fe_2O_3) อะลูมิเนียม- (Al_2O_3) ฯลฯ เส้นใยแก้วแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างๆแตกต่างกัน โครงสร้างของแก้วองค์ประกอบต่างๆ ในเส้นใยแก้วจะเป็นอสัณฐาน แม้ว่าอาจเกิดเป็นผลึกได้บ้างถ้าให้ความร้อนเส้นใยที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง

ปกติความแข็งแรงและมอดูลัสของเส้นใยแก้วขึ้นอยู่กับโครงสร้างสามมิติของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างอสัณฐานของแก้วเกิดจากพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงของออกซิเจนอะตอมกับซิลิกาอะตอม โซเดียมไอออนเกิดพันธะไอออนิกกับออกซิเจนอะตอมโดยไม่มีการเชื่อมโยงโดยตรงกับโครงสร้าง โครงสร้างร่างแหและความแข็งแรงของโครงสร้างแตกต่างออกไปเมื่อมีออกไซด์ของโลหะอื่นๆ อยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นแก้วชนิดต่างๆ ที่มีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างกัน เป็นเหตุที่ทำให้แก้วมีคุณสมบัติต่างๆ แตกต่างกัน

2.18 วัสดุเมตริกซ์

หน้าที่ของเมตริกซ์ในคอมโพสิตคือ

- ถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังเส้นใยเสริมแรงและถ่ายเทแรงระหว่างเส้นใย
- ทำหน้าที่เกราะป้องกันกับสถานะแวดล้อมใดๆ
- ทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยจากการขาดและเสียดสี

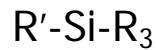
เมตริกซ์ จะทำหน้าที่เล็กน้อยในการรับแรงเทียบกับเส้นใยเสริมแรง แต่เมตริกซ์ที่ดีจะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับเส้นใย ช่วยป้องกันการเสียหายของคอมโพสิตจากแรงเฉือนที่รอยต่อของเส้นใยกับเมตริกซ์หรืออินเตอร์เฟซ หรือเสียหายเนื่องจากเส้นใยยื่นเนื่องจากแรงกดอัด อันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์มีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต นอกจากนี้ความสามารถในการขึ้นรูปและรอยตำหนิของคอมโพสิตยังขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเมตริกซ์เช่น ความหนืด จุดหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิเชื่อมขวาง

วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิต มีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย การแบ่งชนิดของวัสดุเมตริกซ์อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตว่า polmer matrix composite
2. โลหะ เรียกคอมโพสิตว่า metal matrix composite
3. เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตว่า ceramic matrix composite

2.19 สารประสานกลุ่มควบไซเลน (Silane coupling agent)[10]

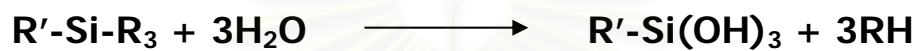
ไซเลนเป็นสารประกอบที่มีหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ โดยใช้ปฏิกิริยาสร้างพันธะโควาเลนต์ในอินเทอร์เฟซ ไซเลนโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างดังนี้



R' เป็น reactive group

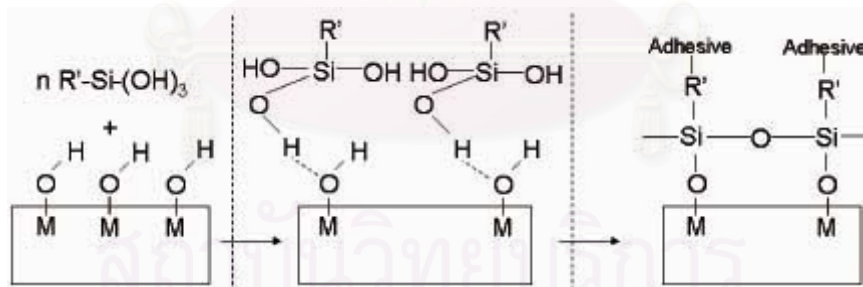
R₃ มักจะเป็นหมู่ methyl หรือ ethyl

กลไกการทำปฏิกิริยาของไซเลน ซิลิกาบนพื้นผิวของแก้วจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ไซเลนอล(- SiOH) และหมู่ไซเลนอลจะถูกไฮโดรไลซ์ตามสมการ



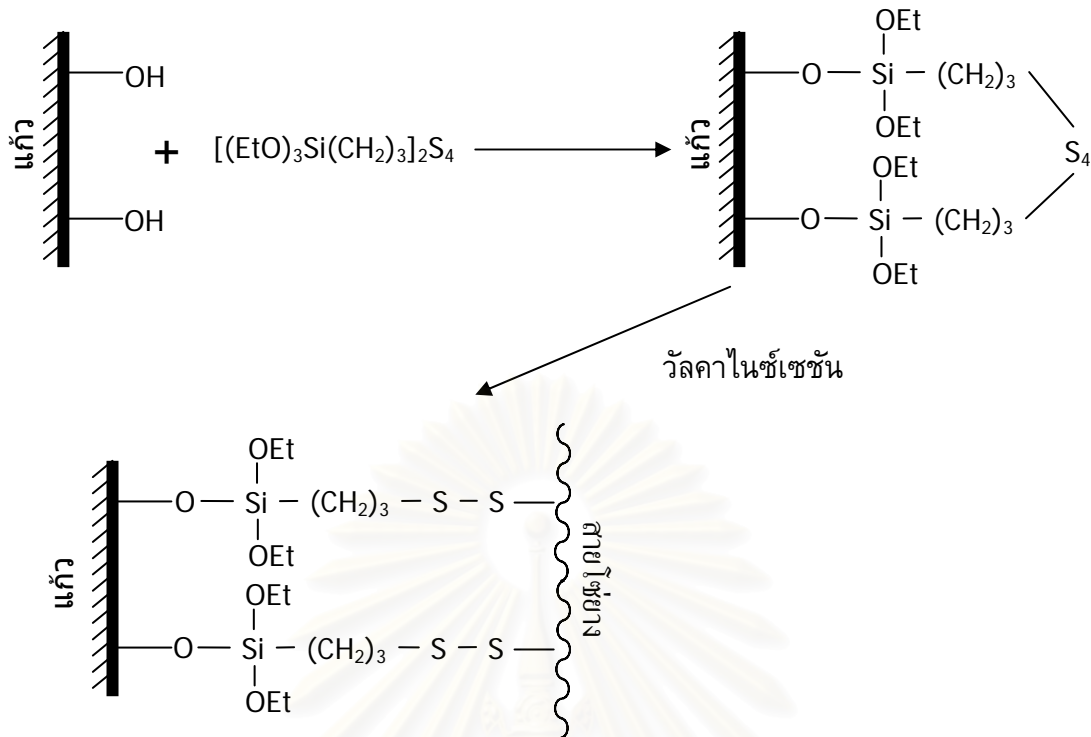
เมื่อสารละลายไซเลนเข้าสู่สัมผัสกับพื้นผิวอนินทรีย์ หมู่ไซเลนอลจะถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวด้วยพันธะไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไซเลนอลตามภาพที่ 2.4 และหมู่ reactive (R₃) บนไซเลนอลทำปฏิกิริยาโดยสร้างพันธะโควาเลนต์กับสารอินทรีย์

TESPT (Bis-[3-(triethoxysilyl) propyl] – tetrasulfide) นิยมใช้เป็นสารช่วยในกระบวนการผสม โดยในขั้นตอนที่เกิดการวัลคาไนเซชัน ปลายข้างหนึ่งของหมู่ไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไซเลนอลบนพื้นผิวซิลิกาผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอีกปลายอีกข้างหนึ่งกำมะถันของ TESPT จะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของสายโซ่ยางในขั้นตอนนี้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงถึงกลไกการดูดซับหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไซเลนอล

ในที่ 2.5 จะแสดงถึงขั้นการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่ยางกับพื้นผิวแก้วโดยใช้ TESPT เป็นสารประสานกลุ่มควบ โดยในขั้นตอนแรกนั้นพื้นผิวแก้วที่เป็นหมู่ไซเลนอลจะทำปฏิกิริยาที่หมู่ไฮดรอกซิล เมื่อทำการวัลคาไนซ์แล้วโมเลกุลกำมะถันใน TESPT จะทำการสร้างพันธะกับสายโซ่ยางที่ตำแหน่งพันธะคู่



รูปที่ 2.5 แสดงถึงกลไกการสร้างพันธะระหว่างใยแก้วกับสายโซ่ยางด้วย TESPT

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[11, 12, 13, 14, 15]

- Usa Somnuk, Nantaya Yanumet และ John W.Ellis ได้ปรับปรุงแรงยึดเกาะวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนและใยแก้วโดยใช้วิธีเอทโมเซลลาพอลิเมอร์ไรเซชัน(Admicellar Polymerization) ในการทำเอทโมเซลลาใช้ SDS เป็นสารลดแรงตึงผิวและใช้ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เป็นอินิทิเอเตอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Initiator กับสารลดแรงตึงผิวจะทำให้การเคลือบของพอลิเมอร์บนใยแก้วจะหนาและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และที่อัตราส่วนความต้านทานแรงดึงที่อัตราส่วน 3:1 จะสูงสุด
- Lopez Momchado M.A. และ Arroyo M ได้ศึกษาถึงผลของเส้นใยอะลามีน, ใยแก้ว และ เซลลูโลส ต่อพฤติกรรมกรรมการเชื่อมขวาง ความหนาแน่น และ สมบัติเชิงกลต่ออย่างธรรมชาติ, EPDM และ SBR โดยใส่เส้นใยเป็นปริมาณ 10 และ 20 phr พบว่าเส้นใยอะลามีนช่วยเสริมความแข็งแรงของยางและเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล และยังลดเวลาการเคียวที่ 97%(Cure Time)
- Hanafi Ismail, Edyham M.R. และ Wirjosentanu B. ทำการศึกษาผลของใยไฟซึ่งเป็นสารตัวเติมและบอนด์คิงเอเจนต์(Bonding Agent) กับลักษณะการเคียว(Cure Charateristic) และคุณสมบัติเชิงกลพบว่า เวลาสกอตช์(Scorch Time) และเวลาการเคียวจะลดลงเมื่อใส่ใยไฟซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเติม และ จะลดลงเมื่อเติมบอนด์คิงเอเจนต์ ความต้านทานแรงดึงและความแข็ง

ของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้น แรงยึดเกาะระหว่างใยไฟเบอร์และยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มบอนด์ดิงเอเจนต์

- Aslihan Arikan, Ceudet Kaynak และ Teoman Tincer ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของใยแก้วถูกใช้เสริมแรงในไดโกลซิลอีเทอร์(DiglycidylEther)ของ ไบฟีนอลเอ (Bisphenol-A) หรือ DGEBA และปรับแต่งด้วย ไฮดรอกซีเทอร์มินอลพอลิบิวทาไดอิน (Hydroxyl Terminated Polybutadiene, HTPB) สารประสานคู่ควบไซเลน(Silane Coupling Agent, SCA) ถูกใช้เพื่อปรับปรุงแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วและอีพอกซีเมตริกซ์ใยแก้วถูกใช้ 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักใยแก้วจะถูกเตรียมโดยใช้ไซเลนและไม่ใช้ไซเลนผลของการใช้ใยแก้วเสริมแรงของอีพอกซีเมตริกซ์ การใช้ไซเลนปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วและปรับปรุงอีพอกซี จะพบว่าการเพิ่มปริมาณใยแก้วจะเพิ่มแรงต้านทานการดึงและ แรงต้านทานการอัดของตัวอย่าง การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วด้วยไซเลน และ การปรับปรุงอีพอกซีโดยHTPB จะเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล ภาพจากSEM จะแสดงถึงการใช้ SCA จะปรับปรุงพันธะระหว่างผิวของใยแก้วและอีพอกซีเมตริกซ์
- Nazzreth da Silva A.L. , Teixeira S.C.S., Widal A.C.C. และ Coutinho F.M.B. ศึกษาถึงผลกระทบสมบัติเชิงกลของการใช้เมทิลออกซิดินเปอร์ออกไซด์ (MethylEthylKetonePeroxide, MEKP) และ โคบอลต์แนพทาเนท(CobaltNapthenate, CoNaph) ที่ลามีเนตบนอีพอกซีไวนิลเอสเตอร์เรซิน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับในการทดลองทำการแปรค่าของ MEKP และ CoNaph พบว่าค่าที่มี interaction กันมีผลกระทบต่อค่าต้านทานแรงดึงของEVER ที่ลามีเนตบนใยแก้ว

บทที่ 3

อุปกรณ์ และ วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงรายละเอียดของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	หน้าที่	ลักษณะ	บริษัทจำหน่าย
น้ำยางข้น	เนื้อยาง	ของเหลวสีขาว มีกลิ่นเล็กน้อย	ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์ จำกัด
กำมะถัน	สารเชื่อมขวาง	เป็นผงสีเหลือง	Siam Chemical industry Co., Ltd.
ซิงค์ไดเอิลไดไซโอคาร์บอแมต (ZDEC)	สารเร่งการเชื่อมขวาง	ผงสีขาว	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
ซิงค์ออกไซด์	สารกระตุ้นการเชื่อมขวาง	ผงสีขาว	CHEMIN CO., LTD.
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	สารละลายเบส	เป็นเกล็ดสีขาว	UNIVAR Co., Ltd
TESPT	สารประสานกู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent)	ของเหลวสีเหลือง	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd
เอทานอล	ตัวทำละลาย	ของเหลวใส มีกลิ่นเล็กน้อย	กิมฮวด จำกัด
เบนโตไนต์ เคลย์	Thickener	ผงสีน้ำตาล	เซอร์นิก อินเตอร์เนชันแนล จำกัด
Softex A	Cationic Surfactant	เกล็ดสีเหลือง	กิมฮวด จำกัด
CTAC	Cationic Surfactant	ของเหลวใส	กิมฮวด จำกัด
ใยแก้ว	เส้นใยเสริมแรง	ผ้าฝืนสีขาว	Cobra International Co., Ltd.

3.2 เครื่องมือ และ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์เตรียมวัตถุดิบ

- (1) ชุดอุปกรณ์กวน ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการกวนผสมน้ำยาง
 - มอเตอร์กวน ชนิดที่ปรับความเร็วรอบได้
 - ยี่ห้อ IKA LABORTECHNIK RW20U
 - ใบกวนแบบใบพาย ใช้ใบพายแบบ 2 แฉก ทำจากเทฟลอน
- (2) ชุดเครื่องแก้ว
 - ประกอบด้วยเครื่องแก้ว ที่ใช้งานปกติในห้องปฏิบัติการ
- (3) ถาดสแตนเลส
 - ใช้ในแช่ไขแก้วเพื่อปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน
- (4) ชุดอุปกรณ์บอลมิล
 - เป็นเครื่องสำหรับบดอนุภาคสารเคมีให้เล็กลง
 - หม้อบด ลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอกทำจากสแตนเลสขนาด 5 ลิตร
 - รางวางหม้อบด ลักษณะเป็นแกน 2 แกนหมุนด้วยความเร็วต่ำ
- (5) เครื่องชั่งน้ำหนัก
 - เครื่องชั่งหยาบ(ทศนิยมตำแหน่งที่ 1) ใช้ในการชั่งสารเคมีสำหรับผสมกับน้ำยาง เพื่อนำไปบดด้วยเครื่องบอลมิล
 - ยี่ห้อ UWE NJW 3000
 - เครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยมตำแหน่งที่ 2) ใช้ในการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง
 - ยี่ห้อ Sartorius
- (6) ตู้อบ
 - ใช้ในการอบและวัดคาบไอน้ำตัวอย่าง
 - ยี่ห้อ WTB Binder ED-115i
- (7) เทอร์โมมิเตอร์ ใช้วัดอุณหภูมิ สามารถวัดได้ 100 C
- (8) แผ่นให้ความร้อน (hot plate)

3.2.2 อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างแบบจุ่ม

- (1) สะตั้งอลูมิเนียม ใช้ในการจิงไขแก้วให้ตั้งเพื่อทำการจุ่ม ทำมาจากสะตั้งอลูมิเนียม หนา 3/8 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลาง 26 เซนติเมตร
- (2) ของอากีลิก ใช้ในการบรรจุน้ำยางเพื่อจุ่มตัวอย่าง ทำมาจากอากีลิก 6 เซนติเมตร ลักษณะ ยาว 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร กว้าง 5 เซนติเมตร

3.2.3 อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างแบบหล่อ

- (1) แผ่นแสดนเลสหนา 1 มิลลิเมตรเจาะรู 2/8 นิ้วทั้งสี่มุม
- (2) แผ่นควบคุมความหนาที่ความหนา 0.7 และ 1.5 มิลลิเมตร

3.2.4 อุปกรณ์ทดสอบชิ้นงาน

- (1) เครื่องทดสอบทุกอย่าง (Universal testing machine, UTM)

ใช้สำหรับทดสอบโดยการดึงให้ยืดออก เป็นการวัดสมบัติความแข็งแรง ความสามารถในการยืด การรับแรงดึงของยาง ซึ่งการดึงยางแล้ววัดแรง และส่วนยืดอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความสามารถในการรับแรงของวัสดุลดลงอย่างรวดเร็วหรือขาด

การทดสอบหรือการดึง เป็นการนำชิ้นงานทดสอบมาดึงด้วยเครื่องดึง ที่สามารถจับชิ้นงานชนิดที่รัดได้ด้วยตัวเอง (self tightening) และดึงปลายทั้งสองแยกจากกันด้วยความเร็วสม่ำเสมอและสามารถอ่าน บันทึกส่วนยืดและแรงดึงได้อย่างต่อเนื่อง

เครื่อง UTM ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR5K สำหรับทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง

เครื่อง UTM ยี่ห้อ JJ Instrument รุ่น T5K สำหรับทดสอบผ้าใยแก้ว

- (2) ชุดอุปกรณ์การหาค่าการนำความร้อน

ใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยอาศัยคุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนจากที่อุณหภูมิสูง ไปยังที่อุณหภูมิต่ำตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling)

ชุดอุปกรณ์จะประกอบด้วยกระป๋องสแตนเลสปิดด้านบนและด้านล่าง และเจาะรู โดยกระป๋องที่ 1 เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 3 นิ้ว และกระป๋องที่ 2 เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 3 นิ้ว แล้วหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนด้านข้าง

- (3) ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดัน

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความสามารถในการรับแรงดันน้ำของชิ้นงาน ชุดอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยสองส่วน

- (3.1) ปืนทดสอบความดัน

ยี่ห้อ KYOWA T-50KP & TESTER

ใช้ในการเพิ่มความดันน้ำโดยมีคันโยกในการควบคุมความดัน

- (3.2) เครื่องทดสอบความดัน ลักษณะเป็นหน้าแปลน 2 ชั้นประกอบเข้า

กัน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีแหวนเหล็กเป็นตัวกดกับบ่าของหน้าแปลนชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบที่ความดันสูง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารเคมีผสมน้ำยาง

การผสมสารเคมีกับน้ำยาง จะต้องเตรียมสารเคมีให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว เพื่อให้สามารถผสมกันได้อย่างดีกับน้ำยาง สำหรับสารเคมีที่เป็นของแข็ง และไม่ละลายน้ำต้องเตรียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอย โดยงานวิจัยนี้จะใช้สารเคมีหลักทั้งหมด 3 ชนิดคือ ซิงค์ออกไซด์ กำมะถัน และ ZDEC สำหรับสูตรในการเตรียมสารเคมีแต่ละชนิดและระยะเวลาการบดเป็นดังตารางข้างล่าง

กรณีสารลดแรงตึงผิวประจุบวก(Cationic surfactant) ในสูตรส่วนผสมเพื่อให้อนุภาคยางจับตัวในกรณีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบหล่อ

การเตรียมซิงค์ออกไซด์จะใช้ Softex A เป็น สารที่ช่วยให้ซิงค์ออกไซด์กระจายตัวในรูปสารแขวนลอย เบน โทไนต์ เคลย์จะถูกใช้เป็นตัวทำให้หนืด (Thickener) เพื่อให้ซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยตกตะกอนช้าลง

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมซิงค์ออกไซด์

	ส่วนโดยน้ำหนัก
ซิงค์ออกไซด์	50
เบน โทไนต์ เคลย์	1
Softex A	1
น้ำ	48
ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	48

การเตรียมสารแขวนลอยของกำมะถันและ ZDEC นั้นจะทำการบดพร้อมกันเพื่อให้สารเข้ากันได้ดีก่อน ใช้ CTAC(Cetyl trimethyl ammonium chloride) เป็นสารที่ทำให้ กำมะถันและZDEC เกิดการกระจายตัว และ เบน โทไนต์ เคลย์ จะใช้ทำให้สารแขวนลอยหนืดขึ้นเพื่อให้กำมะถันและ ZDEC ตกตะกอนช้าลง

ตารางที่ 3.3 สูตรการเตรียมกำมะถันและZDEC

	ส่วนโดยน้ำหนัก
กำมะถัน	21
เบนโทไนด์ เคลย์	1
CTAC	1
ZDEC	10
น้ำ	67
ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	70

ขั้นตอนการบดสารเคมีโดยบอลมิล

- (1) นำสารเคมีและน้ำ มาชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนที่กำหนด
- (2) ผสมสารเคมีทั้งหมดในโถบด
- (3) ใส่ลูกบอลที่ใช้บดลงในโถบด
- (4) ปิดฝาเครื่อง โดยมีแผ่นยางกั้นระหว่างฝากับเครื่องบด
- (5) นำโถบดไปวางบนแกนหมุน และเปิดเครื่องให้ลูกบอลหมุนในระยะเวลาที่กำหนด สำหรับสารเคมีแต่ละชนิด
- (6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ (1) – (5) จนครบทุกสารเคมีหลัก

3.3.2 การเตรียมผ้าใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสานกลุ่มควบไซเลน

การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้ว ต้องทำการละลายไซเลนลงในตัวทำละลายเพื่อให้ไซเลนกระจายทั่วผ้าใยแก้ว แช่ใยแก้วลงในสารละลายไซเลนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ ระบาย

เอทานอลออกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของไซเลนที่ทำการศึกษาคือ 1%, 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนักของผ้าใยแก้ว ความหนาแน่นของผ้าใยแก้วที่ทำการศึกษาคือ 60, 100, 160, 200 และ 300 กรัมต่อตาราง-

เมตร

ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมสารละลายไซเลน

สารเคมี	ส่วนโดยน้ำหนัก
ไซเลน	0.5
เอทานอล	99.5
รวม	100

ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวผ้าใยแก้วด้วยไซเลน

- (1) ชั่งน้ำหนักไซเลนความเข้มข้น 1 % โดยน้ำหนักของผ้าใยแก้ว
- (2) ชั่งน้ำหนักเอทานอลตามสัดส่วนที่กำหนด
- (3) นำสารเคมีที่เตรียม ไปกวนผสมเป็นเวลา 5 นาที
- (4) เทลงภาชนะที่เตรียมไว้
- (5) นำผ้าใยแก้วที่เตรียมไว้แช่และปิดฝา เก็บไว้เวลา 24 ชั่วโมง
- (6) เปิดฝาแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- (7) ทำซ้ำข้อ (1) – (6) โดยชั่งน้ำหนักไซเลนความเข้มข้น 3%, 5%, และ 7% โดยน้ำหนักใยแก้ว

3.3.4 การเตรียมน้ำยาคงรูป

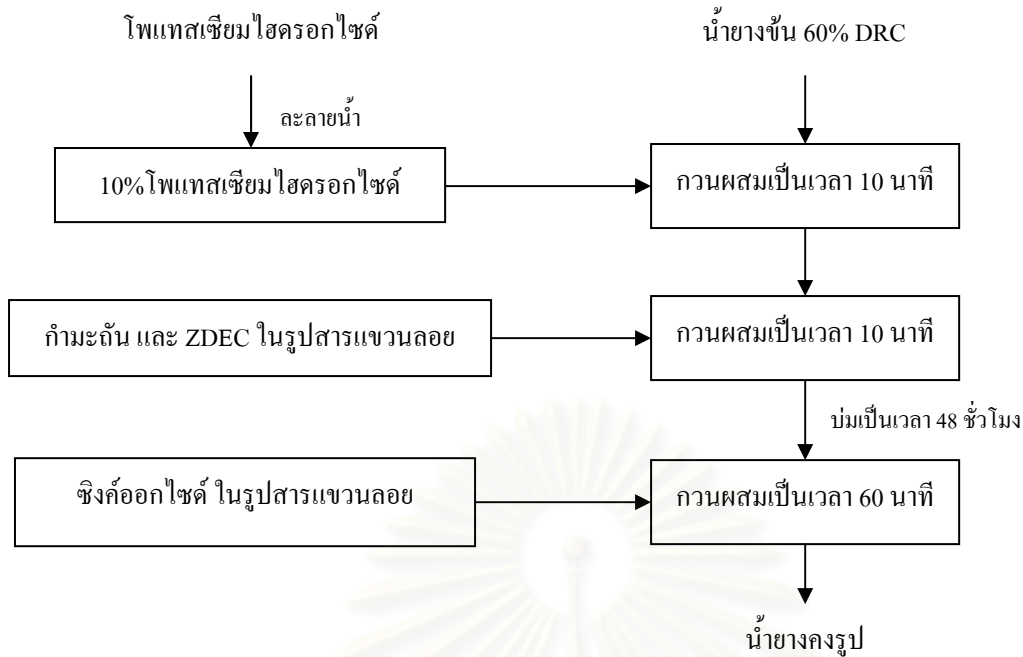
- น้ำยาคงรูปที่ใช้ในการทดลองจะใช้กัมมะถันเป็นสารที่ใช้ในการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของ ZDEC ถูกใช้เป็นสารเร่งในการทำให้เกิดการเชื่อมขวางเร็วขึ้น ZnO ทำหน้าที่เป็นการกระตุ้นให้มีการเชื่อมขวาง และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารในการรักษาสภาพน้ำยาให้เป็นเบส โดยองค์ประกอบของน้ำยาคงรูปที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงถึงองค์ประกอบของน้ำยาคงรูป

สารเคมี	ส่วนโดยน้ำหนัก
เนื้อยาง	100
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	0.5
กัมมะถัน	1.5
ZDEC	0.7
ซิงค์ออกไซด์	1

- ขั้นตอนการผสมน้ำยาคงรูป

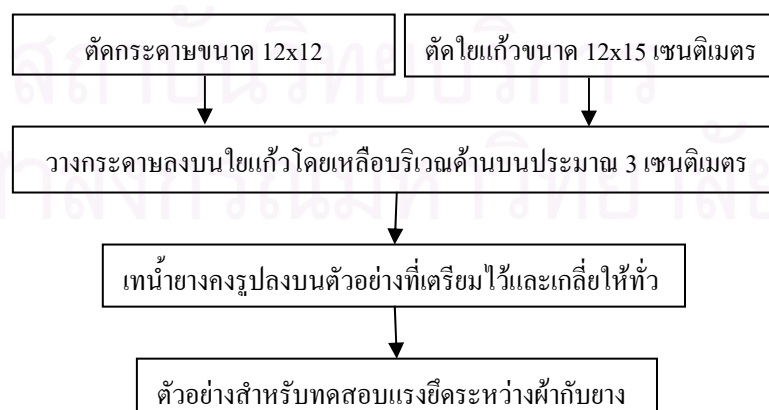
1. นำน้ำยางขึ้นมาชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณของเนื้อยาง และ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ตามตารางที่ 3.5
2. ผสมตามลำดับในรูปที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงถึงขั้นตอนการผสมสารเคมีเพื่อเตรียมน้ำยางคงรูป

3.3.5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดเกาะของใยแก้วกับยาง

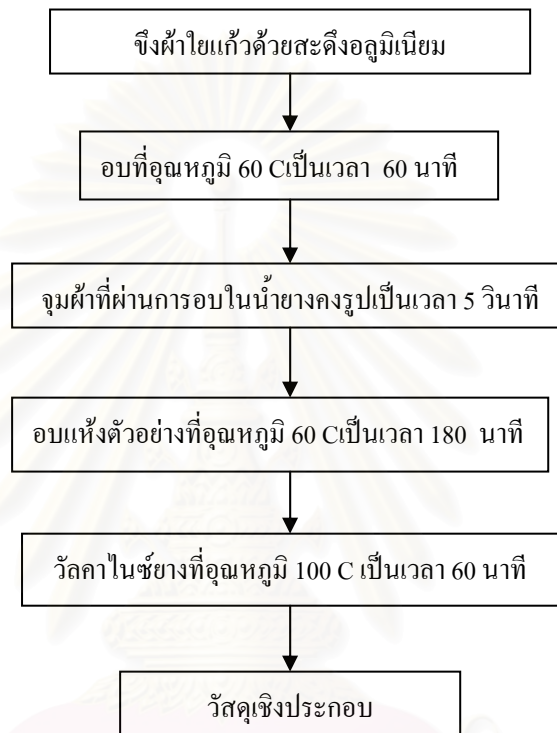
การทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยาง เป็นการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะของใยแก้วและยางธรรมชาติในบริเวณพื้นที่ที่กำหนดไว้ ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ จะมี 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นส่วนที่ใยแก้วและยางธรรมชาติยึดติดกันซึ่งจะเป็นบริเวณที่ใช้ทดสอบชิ้นงาน ส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่ใยแก้วกับยางไม่ติดกันซึ่งจะเป็นบริเวณที่ใช้เป็นที่จับ ในขั้นตอนการเตรียมจะใช้กระดาษ 80 แกรมกั้นระหว่างใยแก้วกับยางธรรมชาติในส่วนที่ไม่ต้องการให้ติดกัน



ภาพที่ 3.2 แสดงถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดระหว่างฝ้ายใยแก้วกับยาง

3.3.6 การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการจุ่ม

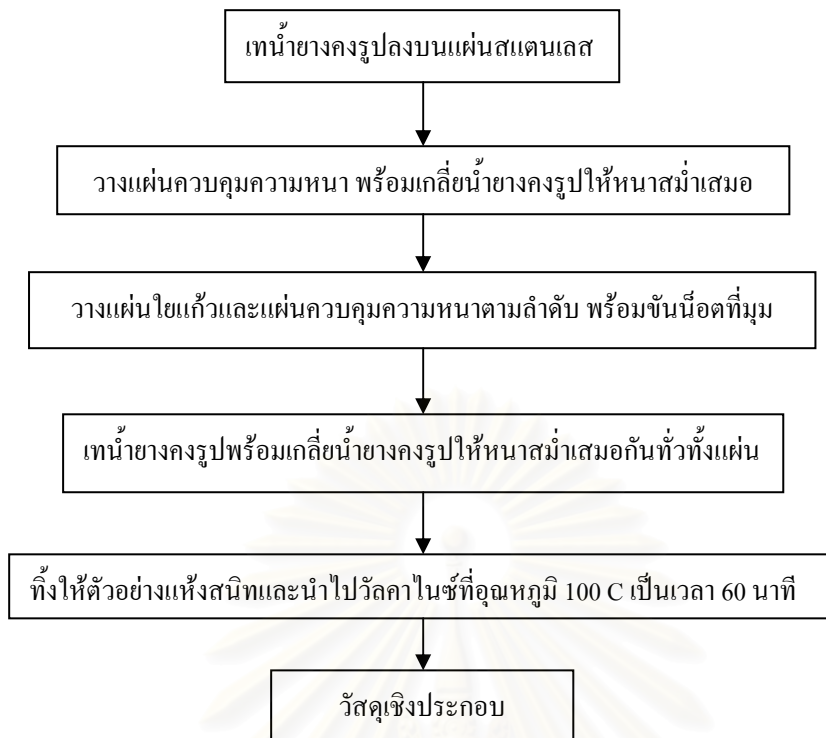
ตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มจะเป็นตัวอย่างที่ไม่สามารถควบคุมความหนาของชิ้นงานได้ ในการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการจุ่มจะใช้ใยแก้วขนาด 60 100 160 200 และ 300 กรัมต่อตารางเมตร โดยใยแก้วขนาดต่างๆจะถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนที่ปริมาณ 0% 1% 3% 5% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว



ภาพที่ 3.3 แสดงถึงขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการจุ่ม

3.3.7 การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการหล่อ

ตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อนั้นจะใช้แผ่นควบคุมความหนาซึ่งมีลักษณะเป็นกรอบสแตนเลสที่มีความหนา 0.7 และ 1.5 มม. ในการควบคุมความหนานั้นจะเทน้ำยางคงรูปลงตรงกลางของกรอบและใช้แผ่นพลาสติกแข็งเกลี่ยให้ทั่วและปิดน้ำยางคงรูปส่วนเกินออกด้านข้างเพื่อให้มีความหนาเสมอกันแล้วค่อยวางใยแก้วเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศและจึงวางแผ่นควบคุมความหนาลงอีกแผ่นแล้วทำการเทน้ำยางคงรูปลงแล้วเกลี่ยให้ทั่วและปิดน้ำยางคงรูปส่วนเกินออก ในการเตรียมตัวอย่างส่วนนี้จะใช้ใยแก้วขนาด 60 และ 300 กรัมต่อตร.ม. และใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวเป็นปริมาณ 0% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว



ภาพที่ 3.4 แสดงถึงขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อ

3.3.8 การทดสอบตัวอย่าง

- ทดสอบการทนแรงดึงของผ้าใยแก้ว

- (1) ตัดผ้าเป็นชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 5 x 15 เซนติเมตร
- (2) เย็บขอบผ้าเป็นห่วงทั้งด้านบนและด้านล่างขนาด 2.5 เซนติเมตร
- (3) วัดความหนา 6 จุดของชิ้นงาน
- (4) นำตัวอย่างใส่ที่จับ (grips) โดยให้ขอบของห่วงเลยขึ้นมาจากที่จับประมาณ 1 เซนติเมตร และ สอดแท่งเหล็กลงในห่วง แล้วเดินเครื่อง
- (5) บันทึกค่าแรงดึง

- ทดสอบการทนแรงดึงของตัวอย่าง(Tensile strength)

- (1) นำตัวอย่างทำเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ตัวอย่างละ 5 ชิ้น ทำการกำหนดหมายเลขแต่ละชิ้นให้ชัดเจน
- (2) วัดความหนา 3 จุด ของชิ้นงานโดยวัดบริเวณตรงกลาง และ ตรงปลายทั้งสองด้านในบริเวณที่รับแรง
- (3) นำตัวอย่างมาจับในที่จับ (grips) และ หนีบชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความยาว (extensometer) แล้วเดินเครื่อง
- (4) บันทึกค่าแรงดึง

- ทดสอบคุณสมบัติการทนความดัน

- (1) นำตัวอย่างมาตัวเป็นชิ้นงานรูปวงกลมขนาด 5 นิ้ว และ เเจาะรูขนาด 2/8 นิ้ว จำนวน 6 รู รอบ
- (2) วัดความหนาของชิ้นงานอย่างน้อย 6 จุด
- (3) วางโอริงค์และชิ้นงานลงในชุดทดสอบตามลำดับ
- (4) ประกอบชุดทดสอบและขันน็อตชุดทดสอบให้แน่น
- (5) โยกลิ้นโยกปั๊มทดสอบแรงดันเพื่อเพิ่มแรงดัน จนกระทั่งแรงดันตกลง
- (6) บันทึกค่าแรงดันที่ชิ้นงานทนได้

- ทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน

- (1) ตัดตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมขนาด 2 x 2 นิ้ว
- (2) วัดความหนาของชิ้นงานอย่างน้อย 6 จุด
- (3) ใส่ น้ำในกระป๋องที่ 1 และ กระป๋องที่ 2 ใส่อะซีโตน
- (4) ใส่เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิในกระป๋องที่ 2 แล้วนำกระป๋องบนไปแช่ น้ำหนัก พร้อมเทอร์โมมิเตอร์และบันทึกค่าไว้
- (5) นำชิ้นงานวางไว้บนกระป๋องที่ 1 แล้ววางทับด้วยกระป๋องที่ 2
- (6) นำชุดทดสอบทั้งหมดวางบนแผ่นให้ความร้อน
- (7) เพิ่มอุณหภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิของกระป๋องบนคงที่
- (8) เมื่ออุณหภูมิคงที่จับเวลาเป็นเวลา 1 นาที
- (9) ชั่งน้ำหนักกระป๋องที่ 2 พร้อมกับเทอร์โมมิเตอร์ และ บันทึกค่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

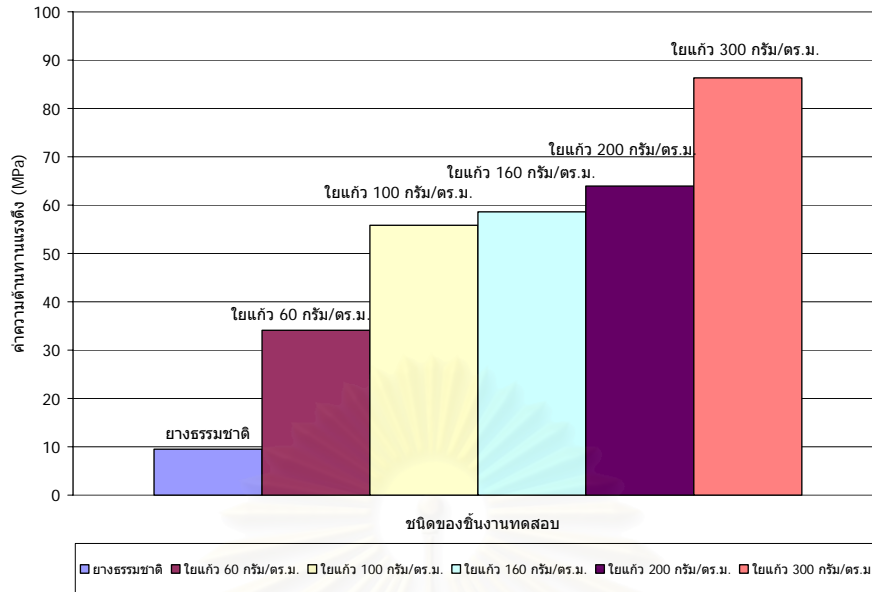
งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างใยแก้วและยางธรรมชาติ ผลการและทดสอบคุณสมบัติการทนแรงดึง การทนความดัน การนำความร้อนและความหนาแน่น โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วนคือ การทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีจุ่ม การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ และการประยุกต์ใช้งาน ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทนแรงดึง และการทนความดันด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial design เมื่อ k คือจำนวนตัวแปรที่มีค่าเท่ากับ 3 และ n เท่ากับ 2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบ

การทดลองส่วนนี้จะแสดงถึงการทดสอบความต้านทานแรงดึง การนำความร้อนของวัตถุดิบที่นำมาทำวัสดุเชิงประกอบ การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วด้วยไซเลน และ แรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยาง ได้ผลดังนี้

(1) ค่าความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบ

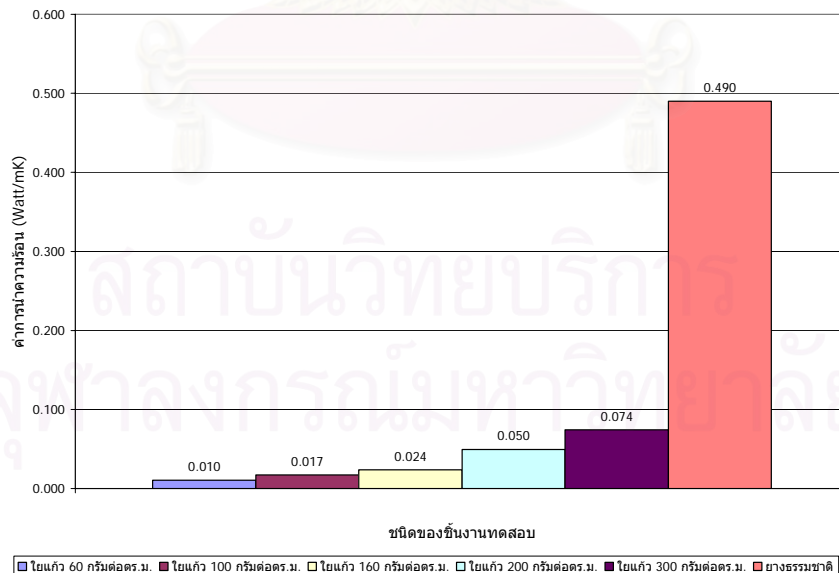
จากภาพที่ 4.1 แสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึงของวัตถุดิบ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของใยแก้วสูงกว่ายางธรรมชาติ และ ค่าความต้านทานแรงดึงของใยแก้วจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำหนักต่อพื้นที่ของใยแก้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีปริมาณใยแก้วเพิ่มมากขึ้นที่รับแรงต่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติและใยแก้วขนาดต่างๆ

(2) ค่าการนำความร้อนของวัสดุคิป[16,17]

จากภาพ 4.2 แสดงถึงค่าการนำความร้อนของวัสดุคิป จากกราฟจะพบว่ายางธรรมชาติ

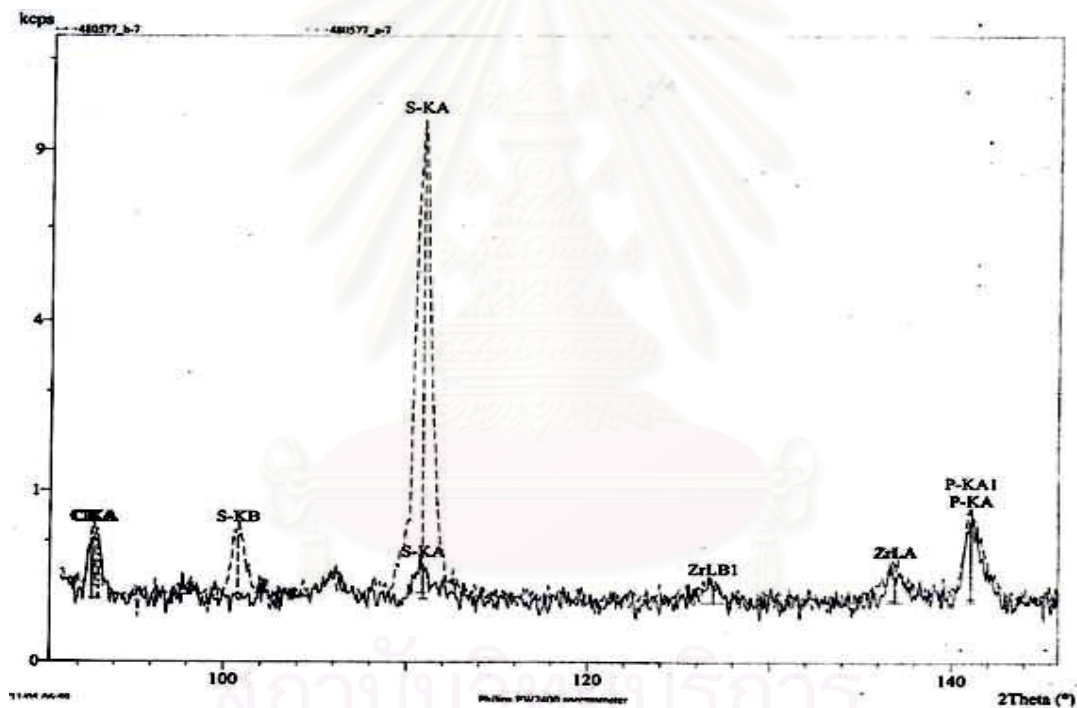


รูปที่ 4.2 ค่าการนำความร้อนของยางธรรมชาติ และ ใยแก้วขนาดต่างๆ

จะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าใยแก้ว โดยใยแก้วจะมีค่าการนำความร้อนเพิ่มตามขนาดของใยแก้ว เนื่องจากใยแก้วเป็นวัสดุทางเซรามิกส์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ดังนั้นใยแก้วมีความเป็นฉนวนกันความร้อนสูงกว่าอย่างธรรมชาติ

(3) การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วด้วยไซเลน

ในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้วด้วยไซเลนนั้นจะใช้ Bis-[3-(triethoxysilyl) propyl] tetrasulfide หรือ TESPT ในการปรับปรุง เมื่อใยแก้วผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะนำไปตรวจสอบด้วยวิธี XRF (X-ray Fluorescence) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาธาตุโดยจะนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณบนใยแก้วเทียบกับใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุง จะได้ผลการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.3 และ ตาราง 4.1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRF

----- ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน _____ ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

จากกราฟจะพบว่าใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนจะมีความเข้ม(intensity) ของกัมมันตภาพสูงกว่าใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว และ จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าปริมาณกัมมันตภาพของใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะมีปริมาณสูงกว่าใยแก้วที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุของใยแก้วเทียบกับใยแก้วที่ผ่านการปรับ-ปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน

ตัวอย่าง : ใยแก้ว 60 กรัมต่อตร.ม.

Compound	ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	ปรับปรุงพื้นผิวด้วย ไซเลน 7% โดยน้ำหนัก
	Concentration(%)	Concentration(%)
O	48.5	46.5
Na	0.210	0.201
Mg	3.06	3.39
Al	6.26	6.35
Si	24.3	25.7
P	0.051	0.058
S	0.012	0.838
Cl	0.091	0.087
K	0.278	0.297
Ca	16.585	16.0
Ti	0.288	0.313
Cr	0.016	N/A
Fe	0.317	0.287
Sr	0.010	0.009
Zr	0.004	0.006
Total	99.999	100

เมื่อทำการทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยางจะได้ผลทดสอบตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแรงยึดเกาะต่อพื้นที่ของใยแก้วกับยาง

พื้นที่ทดสอบ 300 มม.² ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.

ตัวอย่าง	แรงต่อพื้นที่ (นิวตัน/มม. ²)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	0.074	0.0342
ใยแก้วที่ปรับปรุงด้วยไซเลน 7% โดยน้ำหนัก	0.139	0.0285

จากผลทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test จะตั้งสมมติฐานดังนี้[18,19]

$$H_0: \mu_{\text{ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิว}} = \mu_{\text{ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิว}} \neq \mu_{\text{ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว}}$$

โดยค่า t ที่คำนวณจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.53 องศาความอิสระเท่ากับ 4

$$\text{ค่า } t_{0.95,4} = 2.13 \quad t_{\text{การทดลอง}} > t_{0.95,4} = 2.13$$

ดังนั้นปฏิเสธสมมติฐานว่าง (H_0) กล่าวคือค่าแรงยึดเกาะของยางกับใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกับค่าแรงยึดเกาะของยางกับใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.1$ หรือบนช่วงแห่งความเชื่อมั่น 90% เนื่องจากแขนข้างหนึ่งของไซเลนจะไปสร้างพันธะกับพื้นผิวของใยแก้วที่หมู่ไซเลนอลแขนอีกด้านหนึ่งของไซเลนจะสร้างเป็นโมเลกุลก้ำมั่งอันของไซเลนซึ่งจะสร้างพันธะกับสายโซ่อย่างตรงพันธะคู่ของยางตอนที่เกิดการวัลคาไนซ์

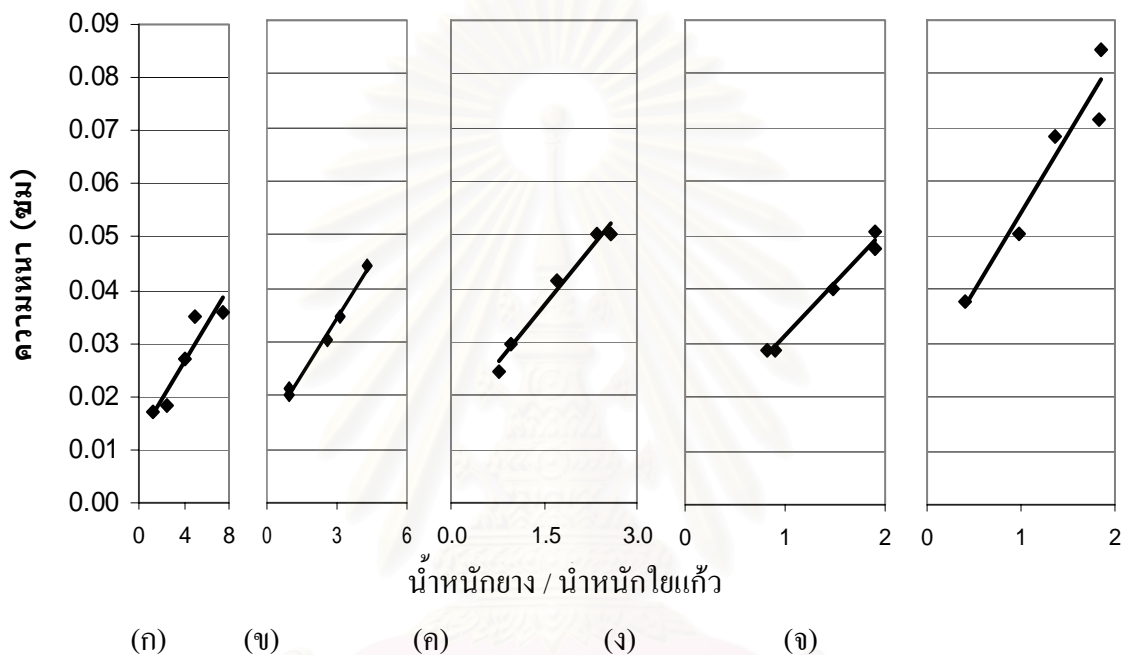
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการจุ่ม

ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยจะศึกษาถึง ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่าความดันที่ทนได้ (pressure at break) ความดันที่จุดวิบัติ (bursting pressure) และ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้ว และการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านความร้อนจะทำการศึกษาถึงค่าการนำความร้อนของชิ้นงาน

4.2.1 คุณสมบัติด้านความแข็งแรง

(1) ค่าความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการจุ่มเทียบกับอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วจะพบว่าที่อัตราส่วนยางต่อใยแก้วจะพบ

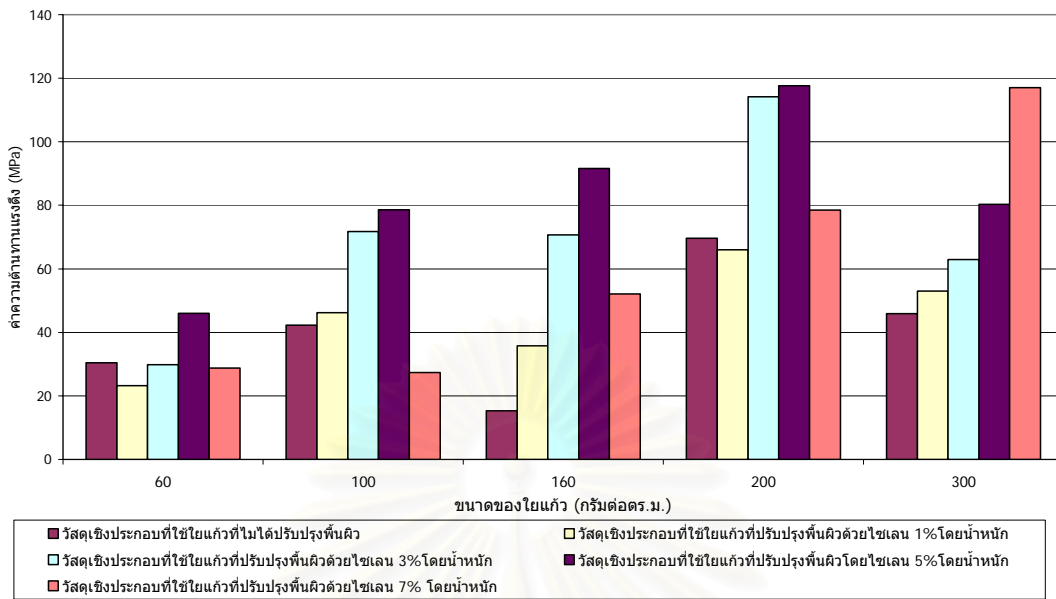


รูปที่ 4.4 ความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มโดยใช้ใยแก้วขนาดต่างๆ

- (ก) ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม. (ข) ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม.
 (ค) ใยแก้วขนาด 160 กรัมต่อตร.ม. (ง) ใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม.
 (จ) ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.

แนวโน้มว่าเมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ความหนาของชิ้นงานที่เตรียมได้จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมมาจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรจะมีแนวโน้มที่หนาที่สุดเนื่องจากเส้นใยมีขนาดใหญ่ที่สุด

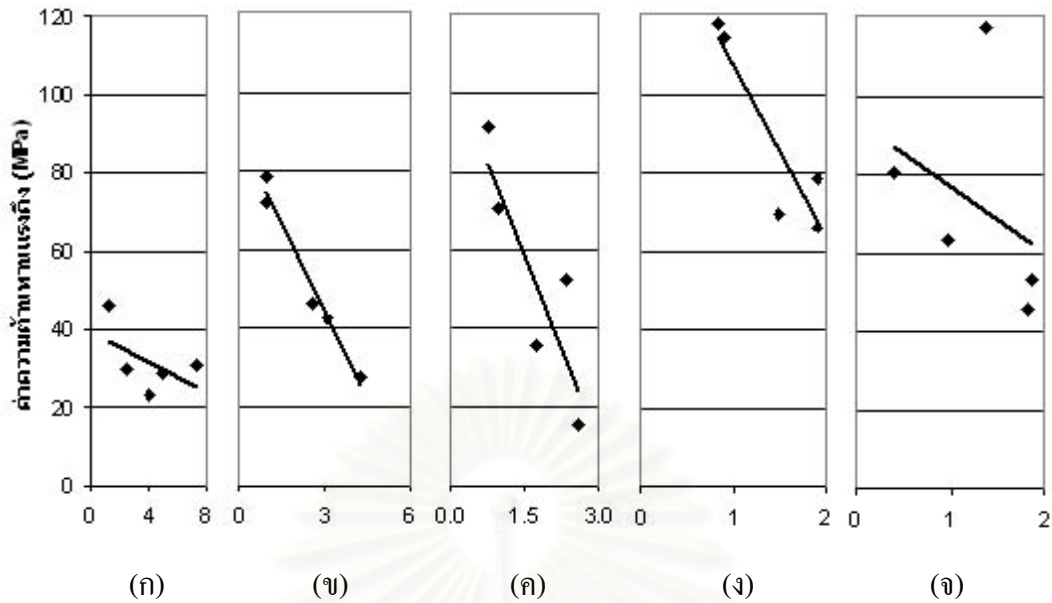
จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มโดยใช้ใยแก้วขนาด 60, 100, 160, 200 และ 300 กรัมต่อตารางเมตร และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนที่ความเข้มข้น 1%, 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนักของใยแก้วจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 60, 100, 160 และ 200 กรัมต่อตารางเมตรจะมีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มต่อขนาดใยแก้วที่ใช้

เมื่อใยแก้วที่ใช้ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนและจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ไซเลนปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของใยแก้วและวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมมาจากใยแก้ว 300 กรัมต่อตารางเมตรจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวที่ความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่ใยแก้ว 60, 100, 160 และ 200 กรัมต่อตารางเมตรจะตกลงเมื่อใช้ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวที่ 7% โดยน้ำหนัก เนื่องจากการกระจายตัวของไซเลนจะมีการกระจายตัวบนใยแก้วขนาด 60, 100, 160 และ 200 กรัมต่อตารางเมตรทั่วถึงที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของใยแก้ว และ จะกระจายตัวทั่วถึงบนใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรทั่วถึงเมื่อมีความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว ทำให้ใยแก้วสามารถจับกับฟิล์มยางที่หล่ออยู่ได้ดี และเมื่อใยแก้วขนาด 60, 100, 160 และ 200 กรัมต่อตารางเมตรเพิ่มปริมาณไซเลนเป็น 7% โดยน้ำหนักของใยแก้วจะมีค่าความต้านทานแรงดึงตกลงเนื่องจากปริมาณไซเลนที่มากเกินไปจะซ้อนกันทำให้แรงยึดเกาะของชั้นยางกับใยแก้วลดลง

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่อน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับค่าความต้านทานแรงดึง จากกราฟจะพบแนวโน้มว่าเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบจะลดลงเนื่องจากว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณยางมากจะทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น แต่วัสดุที่รับแรงคือใยแก้วซึ่งมีปริมาณเท่าเดิมจึงทำให้แรงที่ใยแก้วต่อพื้นที่ของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับ

ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

(ก) ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.

(ข) ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม.

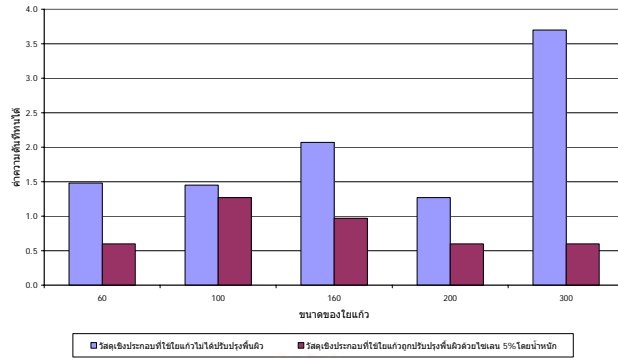
(ค) ใยแก้วขนาด 160 กรัมต่อตร.ม.

(ง) ใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม.

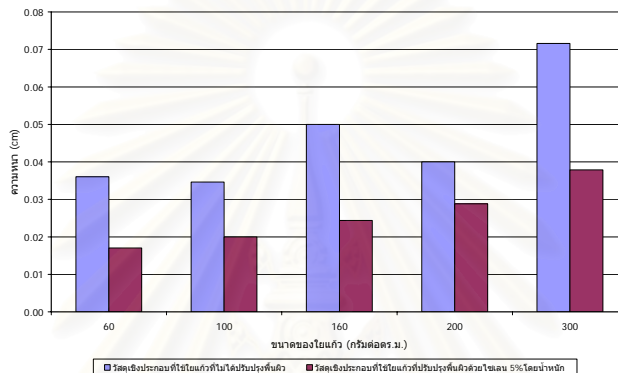
(จ) ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.

(2) ค่าความดันที่ทนได้

เมื่อศึกษาค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มโดยทำการเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 60, 100, 160, 200 และ 300 กรัมต่อตารางเมตร โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วที่ความเข้มข้นของไซเลนที่ 5% โดยน้ำหนักของใยแก้ว จากกราฟในรูป 4.7 ภาพ ก. จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 5% โดยน้ำหนักของใยแก้วจะทนความดันได้ต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะมีบางกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว โดยดูได้จากรูปที่ 4.7 ภาพ ข. จากรูป 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับความดันที่ทนได้ของ จากกราฟจะพบแนวโน้มว่าเมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วเพิ่มขึ้นชิ้นงานจะทนความดันได้มากขึ้น เนื่องจากว่าเมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อน้ำหนักใยแก้วเพิ่มขึ้น ความหนาของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานสามารถทนความดันได้เพิ่มขึ้น



(ก)



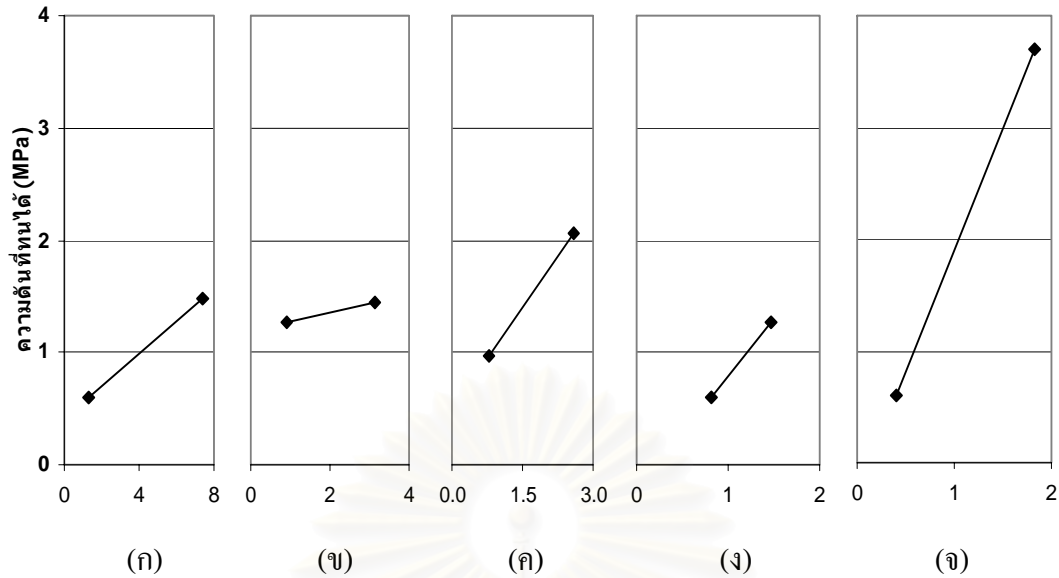
(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพ ก. แสดงความดันที่พบได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มต่อใยแก้วขนาดต่างๆ

ภาพ ข. แสดงความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มที่ใช้ในการทดสอบความดัน

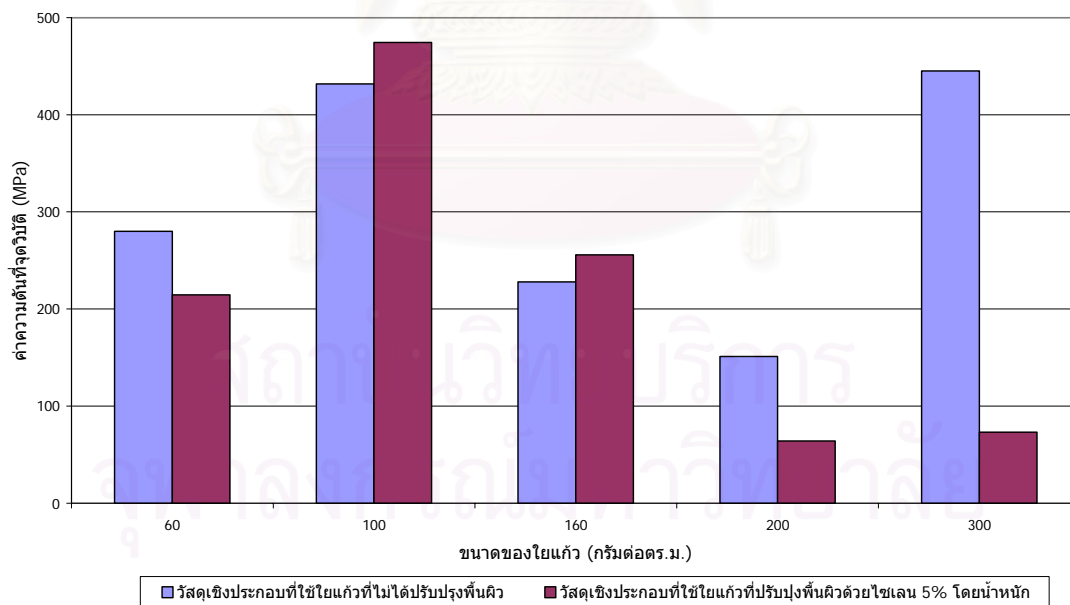
(3) ความดันที่จุดวิบัติ

ความดันที่จุดวิบัติจะเป็นการศึกษาถึงค่าแรงที่กระทำ ณ จุดที่วิบัติโดยจะคำนวณจากแรงต่อพื้นที่ที่เกิดจากเส้นรอบวงของจุดที่ทะลุและความหนา ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถนำมาหาขนาดของใยแก้วที่นำมาใช้ในการออกแบบเนื่องจากว่าใยแก้วไม่สามารถกันน้ำได้และยางจะหน้ำที่กันน้ำ โดยจะแสดงค่าความดันที่วิบัติในรูปที่ 4.9 จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ขนาด 100 กรัมต่อตารางเมตรมีค่าความดันที่จุดวิบัติสูงเนื่องจากแรงดันจะทะลุตรงบริเวณที่เป็นยางโดยใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตารางเมตรจะมีขนาดความถี่ของช่องว่างที่เล็กจึงทำให้ค่าความดันที่จุดวิบัติสูง หากเทียบกับใยแก้วขนาด 200 และ 300 กรัมต่อตร.ม. มีค่าต่ำกว่าเนื่องจากมีความถี่ที่สูงกว่าและเมื่อใยแก้วผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของใยแก้ว ปริมาณยางที่เคลือบบริเวณช่องว่างน้อยกว่าจึงสามารถทนความดันที่จุดวิบัติได้ต่ำกว่า



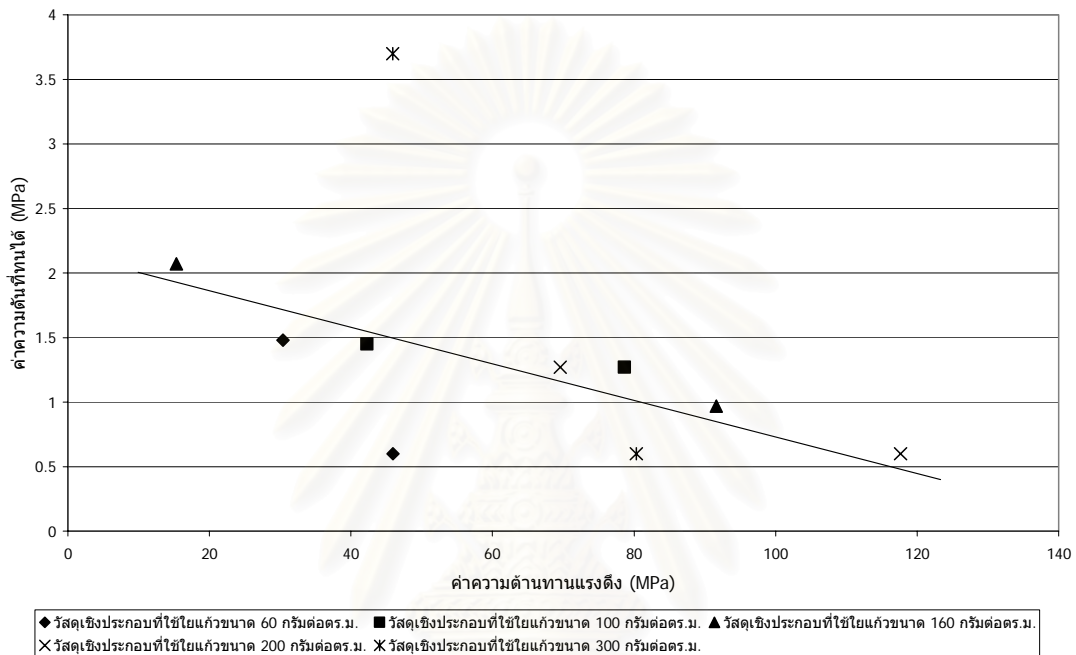
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

(ก) ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม. (ข) ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม.
 (ค) ใยแก้วขนาด 160 กรัมต่อตร.ม. (ง) ใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม.
 (จ) ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันที่จุดวิบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเมื่อใช้ใยแก้วขนาดต่างๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับความดันที่ทนได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.10 จะพบแนวโน้มว่า เมื่อค่าแรงต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นความดันที่ทนได้ของชิ้นงานจะลดลงเนื่องจาก ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วต่ำชิ้นงานจะบางทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูง แต่ชิ้นงานที่บางจะทำให้ความดันที่ทนได้ต่ำลง ดังนั้นเมื่อค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ความดันที่ทนได้ของชิ้นงานจะลดลง

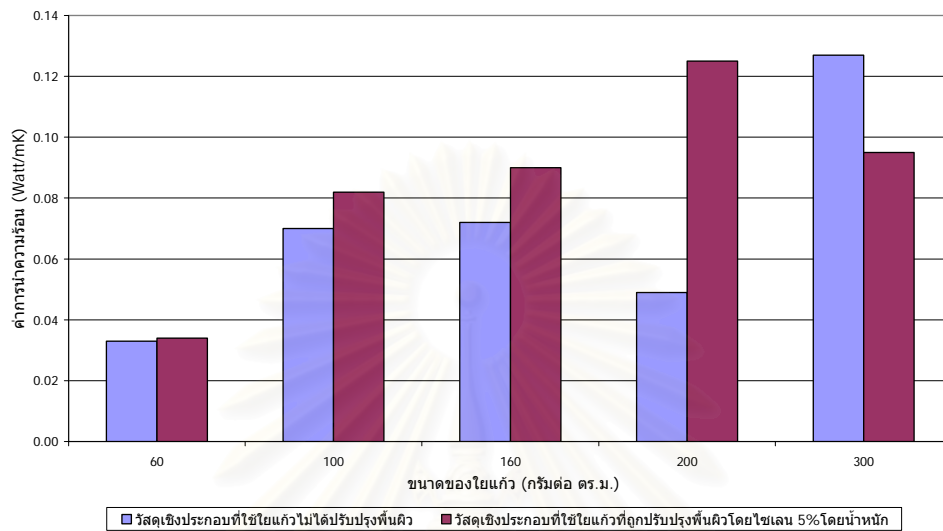


รูปที่ 4.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงดึงกับความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

(4) คุณสมบัติด้านความร้อน

ทำการศึกษาคูณสมบัติการความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพบว่า ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.033 – 0.130 ซึ่งวัสดุเชิงประกอบมีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำมากดังที่แสดงในรูปที่ 4.11 โดยจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า ยกเว้นวัสดุที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. ที่ปรับปรุงพื้นผิวที่จะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวเนื่องจากตรงบริเวณอินเตอร์เฟสวัสดุที่ใช้ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวจะมีความเป็นเนื้อเดียวมากกว่าวัสดุที่ใช้ใยแก้วแบบไม่ได้ปรับปรุง โดยวัสดุที่ใช้ใยแก้วแบบที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวจะมีอากาศแทรกอยู่บริเวณอินเตอร์เฟส แต่วัสดุที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 5% โดย

น้ำหนักของใยแก้วนั้น ปริมาณไซเลนจะกระจายตัวไม่ทั่วทั้งพื้นผิว จึงทำให้ค่าการนำความร้อนไม่ต่างกับวัสดุที่ใช้ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ตารางที่ 4.3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุเชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)		
	0%	5%	เฉลี่ย (Watt/mK)
	60	0.033	0.034
100	0.070	0.082	0.076
160	0.072	0.090	0.081
200	0.049	0.125	0.087
300	0.127	0.095	0.111

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อ

ทำการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล 2 replicate โดยมีค่าตอบสนอง คือ ค่าความต้านทานแรงดึง ความดันที่ทนได้ และ ความดันที่วิบัติ ตารางที่ 4.4 ระดับตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

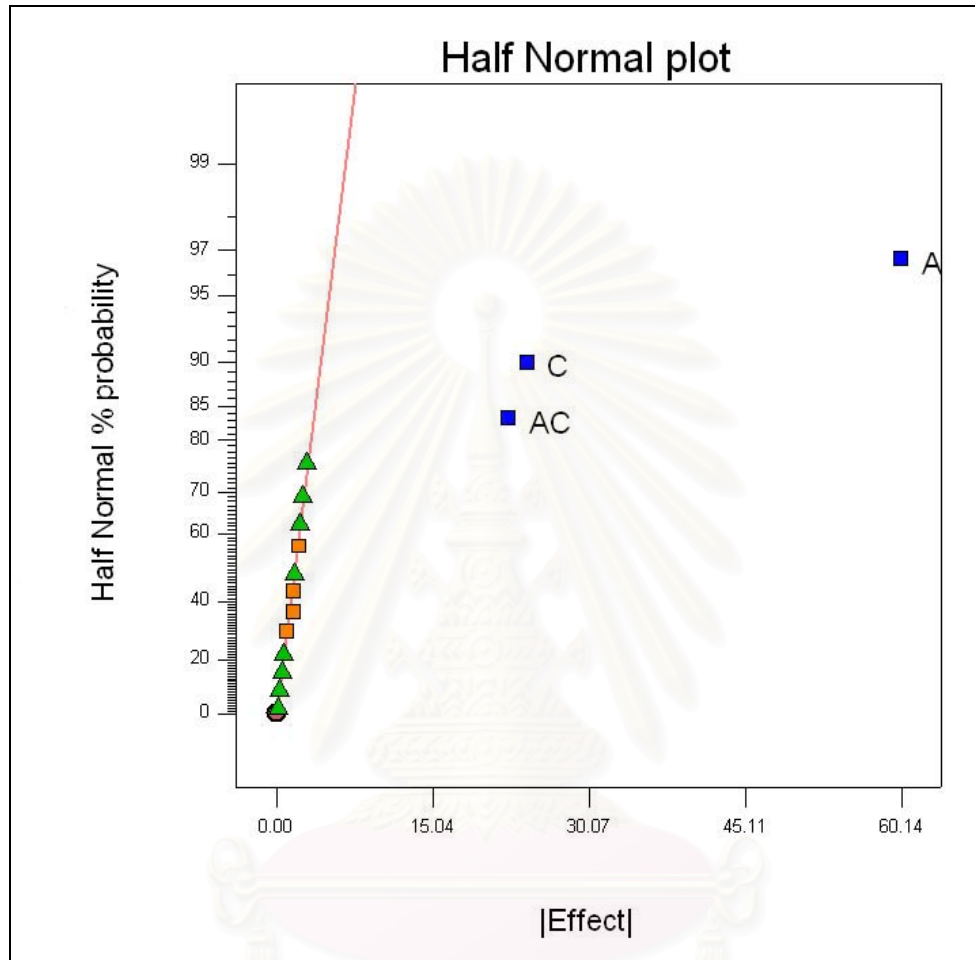
ตัวแปร	ระดับของตัวแปร	
	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
A (ขนาดของใยแก้ว, กรัมต่อตร.ม.)	60	300
B (ปริมาณไซเลน, %โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	0	7
C (ความหนา, มม.)	0.7	1.5

จากการออกแบบการทดลองจะได้ค่าตอบสนองตามตารางที่ 4.5
 ตารางที่ 4.5 ค่าตอบสนองของความต้านทานแรงดึง ความดันที่ทนได้ และ ความดันที่วิบัติ

A	B	C	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ความดันที่ทนได้ (MPa)	ความดันที่วิบัติ (MPa)
1	1	1	45	3.60	282
			43	4.05	244
1	1	-1	87	3.65	319
			87	3.10	296
1	-1	1	46	3.60	312
			40	4.15	338
1	-1	-1	102	3.00	246
			84	3.10	380
-1	1	1	47	2.95	252
			7	3.35	281
-1	1	-1	7	1.93	250
			6	2.10	260
-1	-1	1	6	2.60	219
			6	2.80	185
-1	-1	-1	7	1.60	224
			9	2.05	214

4.3.1 ผลตอบสนองของค่าต้านทานแรงดึง

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.4 มาสร้างกราฟ Normal Probability ของค่าความต้านทานแรงดึง และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยค่า F_0 ในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.12 กราฟ Normal Probability plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง(รูปที่ 4.12) จะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือปัจจัย A หรือขนาดของเส้น-ใย, ปัจจัย C หรือ ความหนา และ อันตรกิริยาของ AC เนื่องจากค่าการประมาณของปัจจัย (Estimate Effect) เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติอย่างเห็น ได้ชัด เมื่อนำปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมา วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	18788	3	6263	317	< 0.0001	significant
A	14469	1	14469	733	< 0.0001	significant
C	2332	1	2332	118	< 0.0001	significant
AC	1987	1	1987	101	< 0.0001	significant
Error	237	12	20			
Total	19025	15				

ในการตรวจสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงแห่งความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ค่า Fวิกฤตในช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.75 จากความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง พบว่า F_0 ของขนาดเส้นใย, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีค่ามากกว่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ขนาดของเส้นใย, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

เมื่อนำค่าตอบสนองมาสร้างเป็นสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายค่า โดยนำค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปัจจัยได้สมการดังนี้

$$Y_{\text{reg, tensile}} = \beta_0 + \beta_A A - \beta_C C - \beta_{AC} AC \quad (4.1)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

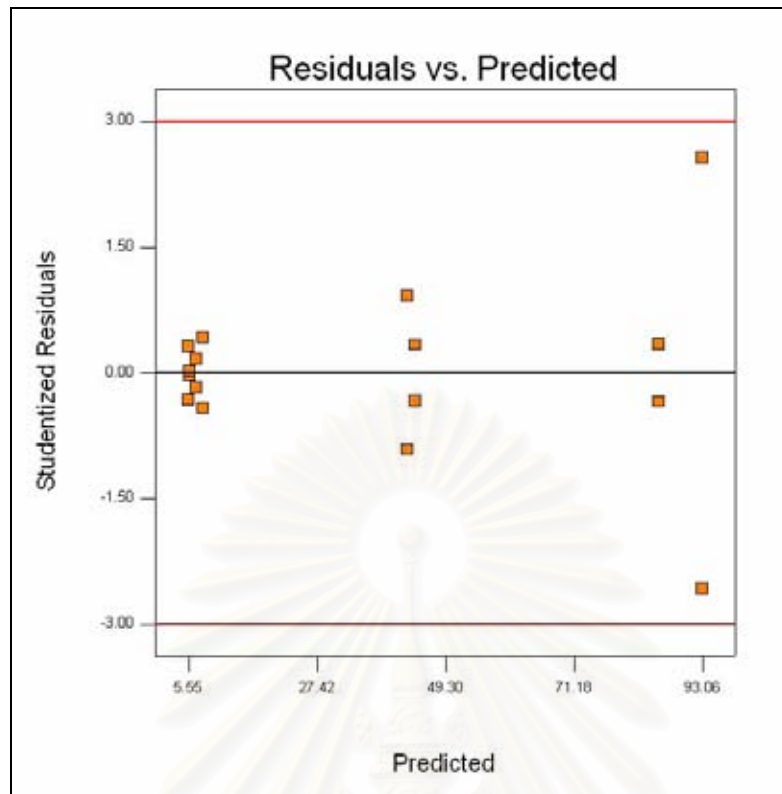
$$Y_{\text{reg, tensile}} = 36.44 + 29.95A - 11.95C - 11.02AC \quad (4.2)$$

โดย $Y_{\text{reg, tensile}}$ คือ ค่าของผลตอบสนองที่คำนวณมาจากสมการถดถอย

β_0 คือ ค่าของผลตอบสนองเนื่องจากปัจจัยที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากผลเฉลี่ยค่าตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากผลเฉลี่ยของค่าตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ทำนายได้กับค่าความผิดพลาดพบว่า การกระจายของค่าความผิดพลาดมีความสัมพันธ์แบบมีรูปแบบทำให้การเกิดความไม่เพียงพอในสมการถดถอยที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าเศษเหลือของค่าความต้านทานแรงดึง

ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อความต้านทานแรงดึงต้องทำการแปลงค่าตอบสนองก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ โดยวิธีการแปลงที่เลือกใช้คือวิธีการแปลงโดยรากที่สองจะได้ค่าตามตารางที่ 4.7

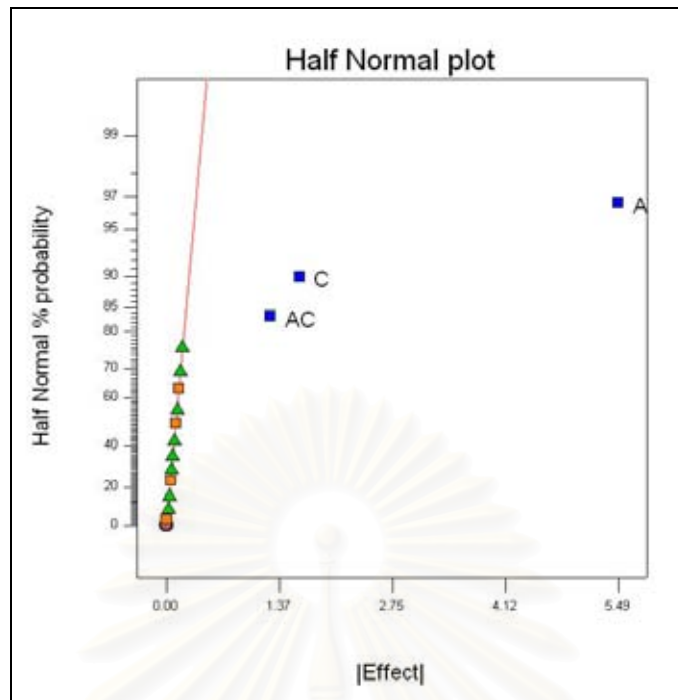
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ค่าตอบสนองของความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงด้วยวิธีรากที่สอง

A	B	C	ค่าความต้านทานแรงดึงที่แปลงด้วยวิธีรากที่สอง (MPa)
1	1	1	6.72
			6.55
1	1	-1	9.30
			9.32
1	-1	1	6.78
			6.30
1	-1	-1	10.1
			9.17
-1	-1	1	2.10
			2.60
-1	1	-1	2.73
			2.50
-1	1	1	2.35
			2.39
-1	-1	-1	2.56
			3.08

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.7 มาสร้างกราฟ Normal Probability ของค่าความต้านทานแรงดึงและวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยค่า F_0 ในตารางที่ 4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 กราฟ Normal Probability plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงด้วยวิธีรากที่สอง

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability Plot ในรูปที่ 4.14 ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลงด้วยวิธีรากที่สองตาม จะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือ ปัจจัย A หรือขนาดของเส้นใย, ปัจจัย C หรือ ความหนา และ อันตรกิริยาของ AC เนื่องจากค่าการประมาณของปัจจัย (Estimate Effect) เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ตารางที่ 4.8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	138	3	45.9	544	< 0.0001	Significant
A	121	1	121	1433	< 0.0001	Significant
C	11	1	10.5	125	< 0.0001	Significant
AC	6	1	6.37	76	< 0.0001	Significant
Error	1	12	0.080			
Total	139	15				

ในการตรวจสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงแห่งความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ค่า F วิฤตที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.75 จากความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ถูกแปลง พบว่า F_0 ของขนาดเส้นใย, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีค่ามากกว่า F วิฤต จึงกล่าวได้ขนาดของเส้นใย, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

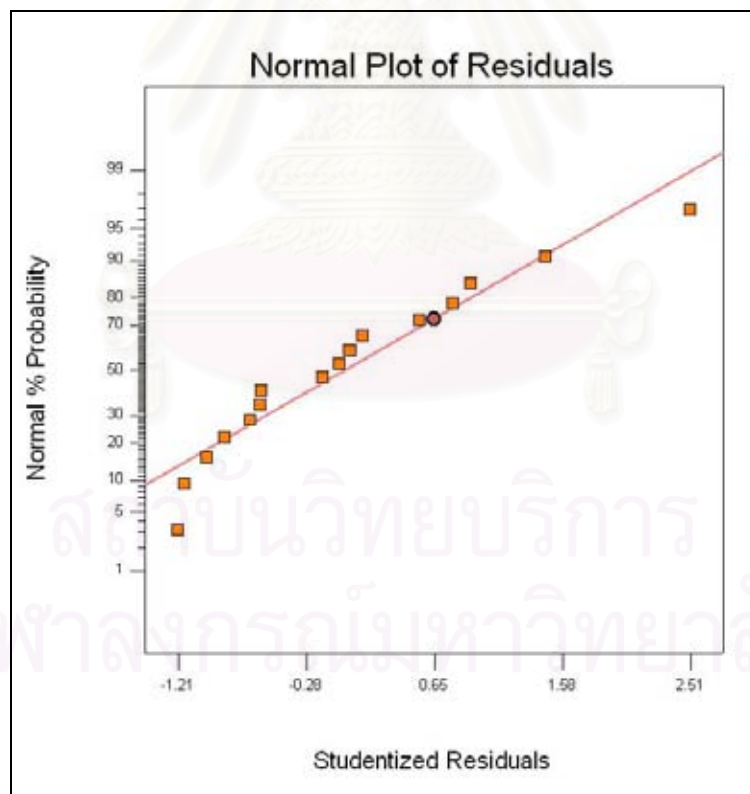
เมื่อนำค่าตอบสนองมาสร้างเป็นสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายค่า โดยนำค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปัจจัยได้สมการดังนี้

$$\text{Sqrt}(Y_{\text{reg, tensile}}) = \beta_0 + \beta_A A - \beta_C C - \beta_{AC} AC \quad (4.3)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$\text{Sqrt}(Y_{\text{reg, tensile}}) = 5.28 + 2.75A - 0.81C - 0.63AC \quad (4.4)$$

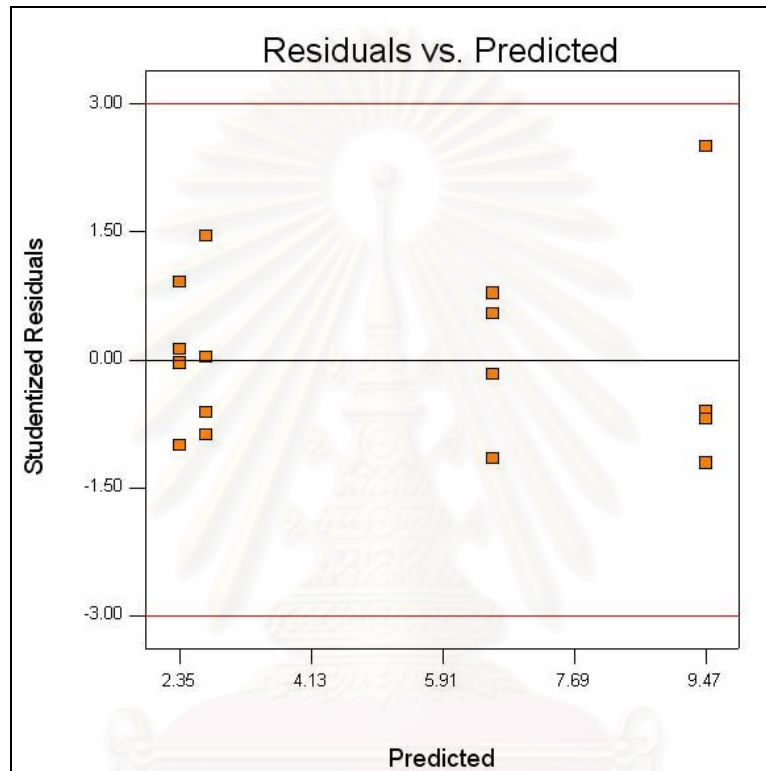
โดย $\text{Sqrt}(Y_{\text{reg, tensile}})$ คือ รากที่สองของค่าของผลตอบสนองของค่าความต้านทานแรงดึงที่คำนวณมาจากสมการถดถอย



รูปที่ 4.15 กราฟ normal probability plot ของค่า tensile ที่ถูกแปลงด้วยวิธีรากที่สอง

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดกับค่า normal %Probability มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอิสระ ความแปรปรวนคงที่ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแปรปรวนมีค่าเป็นศูนย์

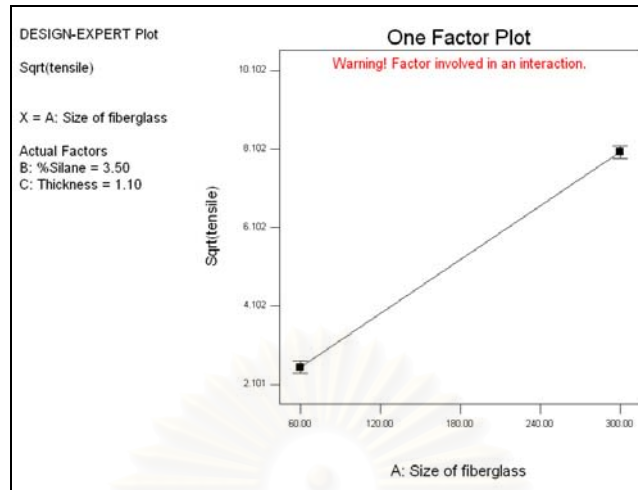
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าที่ทำนายได้ตามรูปที่ 4.16 พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่มีรูปแบบ



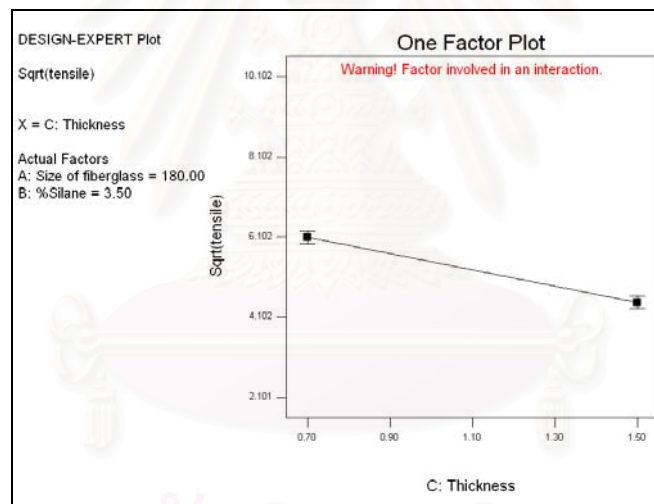
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือกับค่าที่ทำนายได้จากสมการถดถอย

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงความเพียงพอของสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมา โดยสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมาจะมีความเพียงพอต่อเมื่อความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือกับค่าที่ทำนายได้มีความสัมพันธ์กันแบบไม่มีรูปแบบ ดังนั้นแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าสมการถดถอยที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งเป็นกราฟปัจจัยในระดับสูงค่าที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงจะพบว่าเมื่อขนาดของใยแก้วเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากความชันของกราฟในรูป 4.17 จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ 3.407 และ ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลง โดยพิจารณาจากกราฟในรูป 4.18 จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ -0.288



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของขนาดของใยแก้วที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ



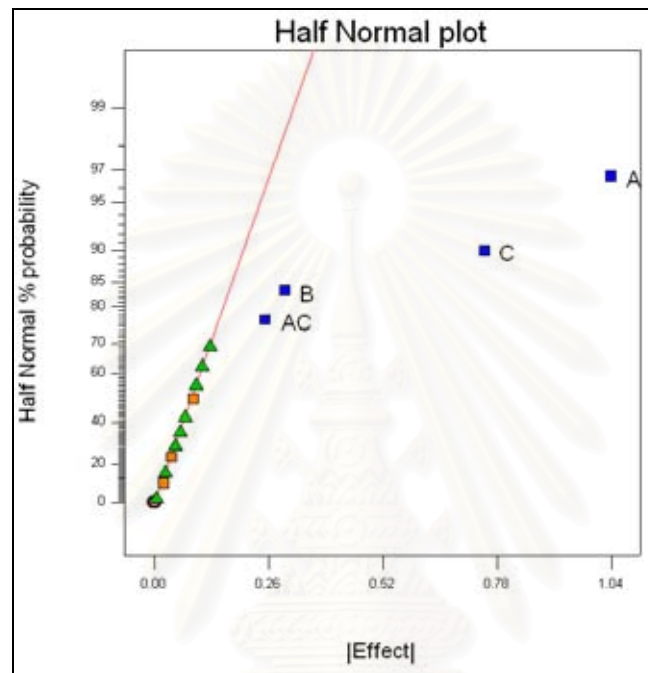
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของความหนาที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการถดถอย(สมการที่ 4.4) ที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลที่สอดคล้องกัน โดย β_A มีค่าเท่ากับ 2.75 และ β_C มีค่าเท่ากับ -0.81 ซึ่งแสดงถึงว่าเมื่อเพิ่มขนาดของเส้นใยค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลง

โดยเมื่อนำความชันมาพิจารณาร่วมกัน β_1 แล้วจะเห็นว่าสอดคล้องกันโดย ผลของปัจจัยขนาดของเส้นใยต่อค่าความต้านทานแรงดึงมีความชันเป็นบวกเช่นเดียวกันค่า β_4 และ ค่าความชันของปัจจัยความหนามีค่าเป็นลบเช่นเดียวกันค่า β_5

4.3.2 ผลตอบสนองของความดันที่ทนได้

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาสร้างกราฟ Normal Probability ของค่าความดันที่ทนได้และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยค่า F_0 ในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.19 กราฟ Normal Probability plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ในรูปที่ 4.19 จะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความดันที่ทนได้คือปัจจัย A หรือขนาดของเส้นใย, ปัจจัย B หรือ ปริมาณไซเลน, ปัจจัย C หรือ ความหนา และ อันตรกิริยาของ AC เนื่องจากค่าการประมาณของปัจจัย (Estimate Effect) เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามแสดงในตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความดันที่ทนได้

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	7.21	4	1.80	38.5	< 0.0001	significant
A	4.33	1	4.33	92.4	< 0.0001	significant
B	0.35	1	0.35	7.52	0.0191	significant
C	2.27	1	2.27	48.4	< 0.0001	significant
AC	0.26	1	0.26	5.47	0.0393	significant
Error	0.52	11	0.05			
Total	7.72	15				

ในการตรวจสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงแห่งความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ค่า F วิกฤตในช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.84 จากความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ พบว่า F_0 ของขนาดเส้นใย, ปริมาณไซเลน, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีค่ามากกว่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ขนาดของเส้นใย, ปริมาณไซเลน, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีอิทธิพลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบ

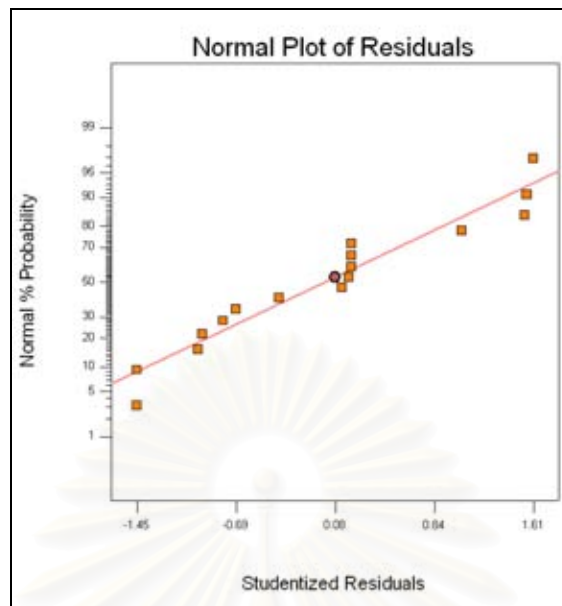
เมื่อนำค่าตอบสนองมาสร้างเป็นสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายค่า โดยนำค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปัจจัยได้สมการดังนี้

$$Y_{\text{reg, pressure at break}} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C - \beta_{AC} AC \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$Y_{\text{reg, Pressure at break}} = 2.94 + 0.52A + 0.15B + 0.38C - 0.13AC \quad (4.6)$$

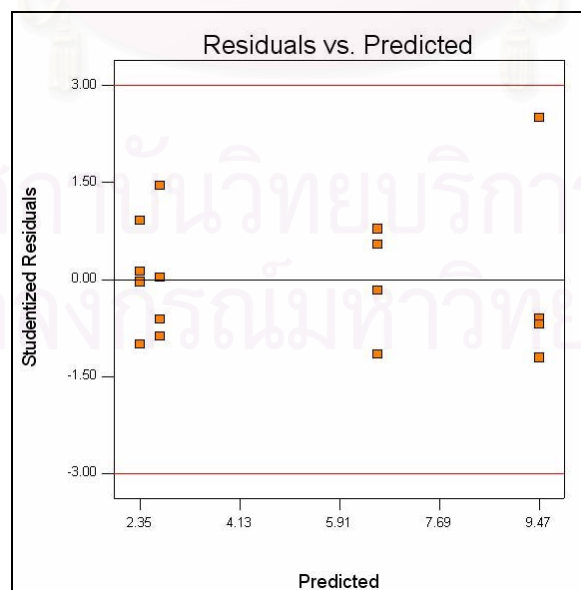
โดย $Y_{\text{reg, pressure at break}}$ คือ ค่าของผลตอบสนองของความดันที่ทนได้ที่คำนวณมาจากสมการถดถอย



รูปที่ 4.20 กราฟ normal probability plot ของค่าความดันที่ทนได้

จากรูปที่ 4.20 จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดกับค่า normal %Probability มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอิสระ ความแปรปรวนคงที่ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแปรปรวนมีค่าเป็นศูนย์

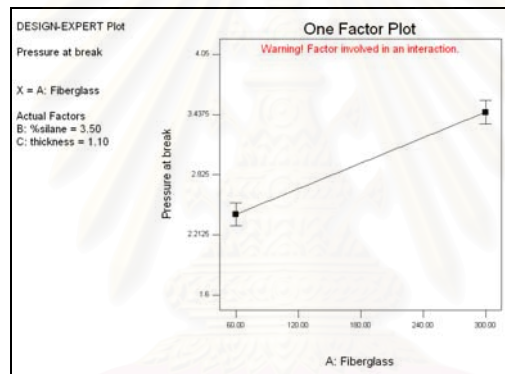
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าที่ทำนายได้ตามรูปที่ 4.21 พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่มีรูปแบบ



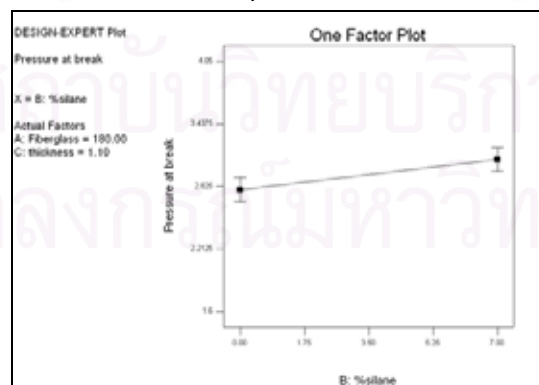
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้จากสมการถดถอย

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงความเพียงพอของสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมา โดยสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมามีความเพียงพอต่อเมื่อความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้มีความสัมพันธ์กันแบบไม่มีรูปแบบ ดังนั้นแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าสมการถดถอยที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

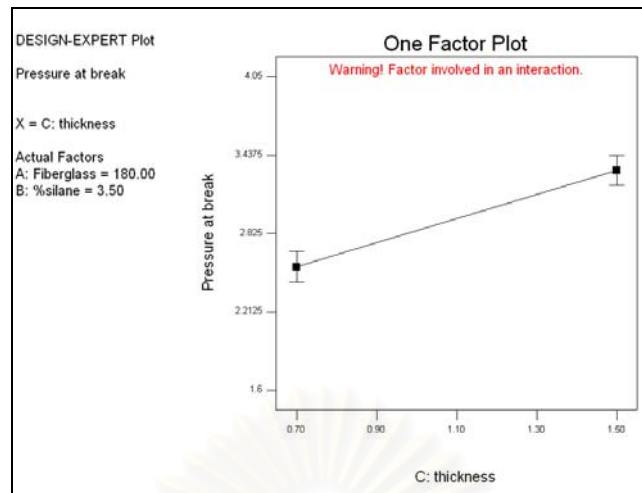
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24 ซึ่งเป็นกราฟปัจจัยในระดับสูงค่าที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงจะพบว่าเมื่อขนาดของใยแก้วเพิ่มขึ้นค่าความความดันที่ทนได้จะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.22 จะได้ค่าความชันเท่ากับ 0.613 ปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้นค่าความดันที่ทนได้ก็จะมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูป 4.23 จะได้ค่าความชันเท่ากับ 0.094 และ ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นค่าความดันที่ทนได้ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.24 จะได้ค่าความชันเท่ากับ 0.438 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความชันแล้ว ความชันของปัจจัยสูงค่าของขนาดของใยแก้ว มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของขนาดของใยแก้วที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงค่าของปริมาณไซเลนที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบ



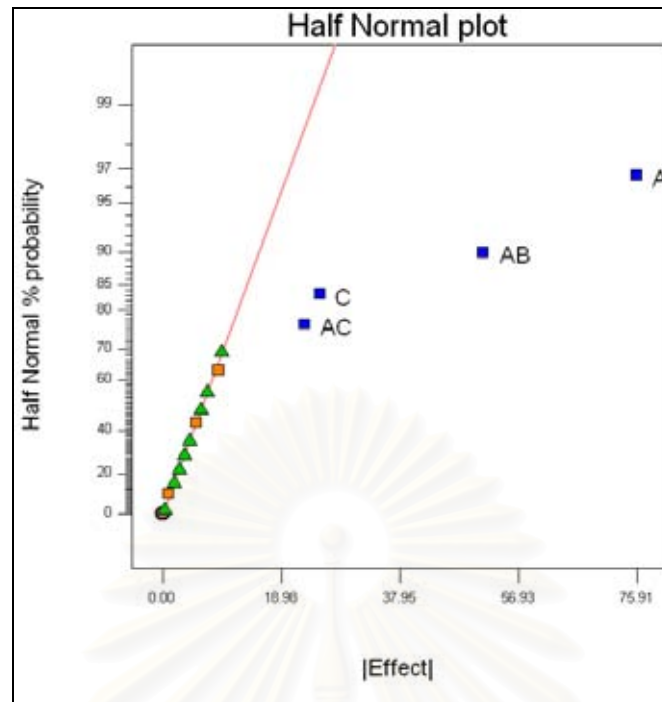
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของความหนาที่มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบ

ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการถดถอย(สมการที่ 4.6) ที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลที่สอดคล้องกัน โดย β_A มีค่าเท่ากับ 0.52 β_B มีค่าเท่ากับ 0.15 และ β_C มีค่าเท่ากับ 0.38 ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขนาดของเส้นใยค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณไซเลนมากขึ้นจะทำให้ค่าความดันที่ทนได้เพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มความหนาของชิ้นงานค่าความความดันที่ทนได้เพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำความชันที่ได้จากกราฟมาเทียบกับค่า β_i พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือ ค่าความชันและ β_i ของขนาดของใยแก้วจะมีค่ามากที่ตามด้วยความหนาและปริมาณไซเลนตามลำดับ

4.3.3 ผลตอบสนองของความดันที่จุดวิบัติ

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 มาสร้างกราฟ Normal Probability ของค่าความดันที่จุดวิบัติและวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยค่า F_0 ในตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.25 กราฟ Normal Probability plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติ

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติ (รูปที่ 4.25) จะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความดันที่จุดวิบัติได้คือปัจจัย A หรือขนาดของเส้นใย, ปัจจัย C หรือ ความหนา อันตรกิริยาของ AB และ อันตรกิริยาของ AC เนื่องจากค่าการประมาณของปัจจัย (Estimate Effect) เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ตารางที่ 4.10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความดันที่จุดวิบัติ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	38147	4	9537	34.3	< 0.0001	significant
A	23049	1	23049	83.0	< 0.0001	significant
C	2541	1	2541	9.15	0.0116	significant
AB	10498	1	10498	37.8	< 0.0001	significant
AC	2060	1	2060	7.41	0.0198	significant
Error	3056	11	278			
Total	41203	15				

ในการตรวจสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงแห่งความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ค่า F วิฤตที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.84 จากความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติ พบว่า F_0 ของขนาดเส้นใย, ความหนา อันตรกิริยาของเส้นใยกับไซเลน และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีค่ามากกว่า F วิฤต จึงกล่าวได้ขนาดของเส้นใย, ปริมาณไซเลน, ความหนา และ อันตรกิริยาของขนาดเส้นใยกับความหนามีอิทธิพลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติของวัสดุเชิงประกอบ

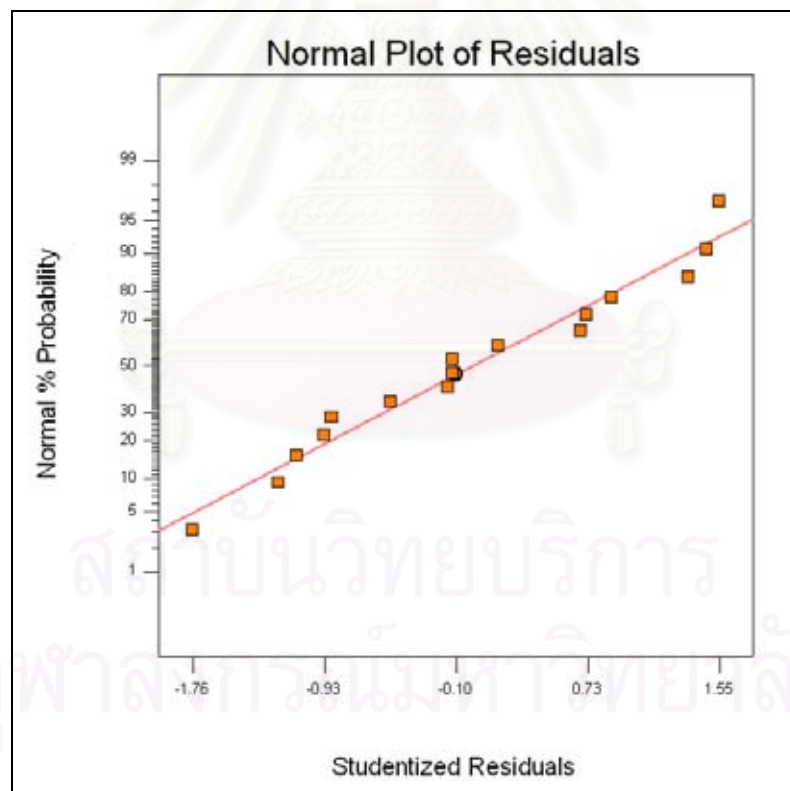
เมื่อนำค่าตอบสนองมาสร้างเป็นสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายค่า โดยนำค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปัจจัยได้สมการดังนี้

$$Y_{\text{reg, bursting pressure}} = \beta_0 + \beta_A A - \beta_C C - \beta_{AB} AB - \beta_{AC} AC \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$Y_{\text{reg, bursting pressure}} = 273.39 + 37.95A - 12.60C - 25.61AB - 11.35AC \quad (4.6)$$

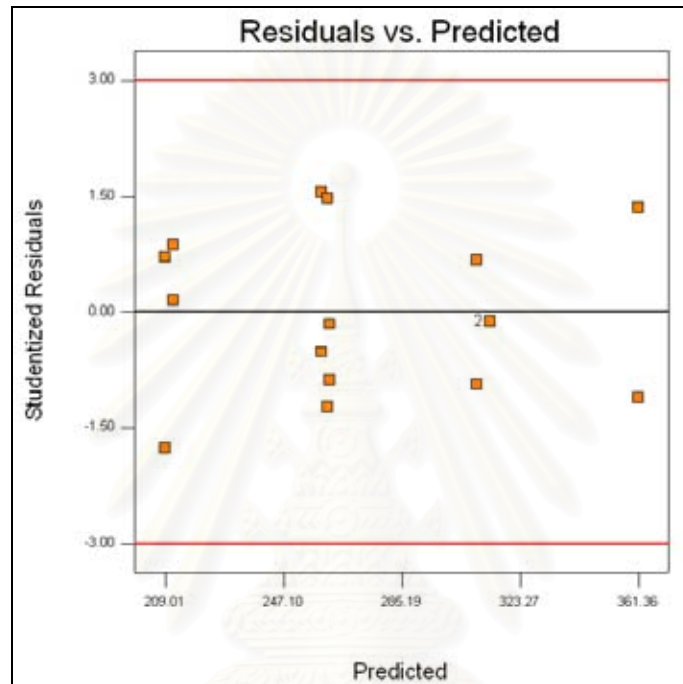
โดย $Y_{\text{reg, bursting pressure}}$ คือ ค่าผลตอบสนองของความดันที่จุดวิบัติที่คำนวณมาจากสมการถดถอย



รูปที่ 4.26 กราฟ normal probability plot ของค่าความดันที่จุดวิบัติ

จากรูปที่ 4.26 จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดกับค่า Normal %Probability มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอิสระ ความแปรปรวนคงที่ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแปรปรวนมีค่าเป็นศูนย์

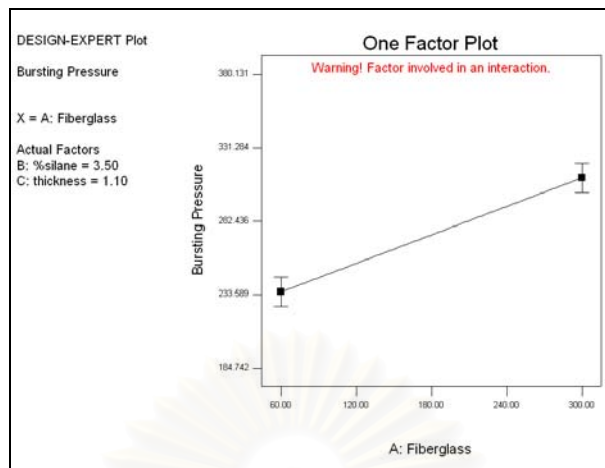
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าที่ทำนายได้ตามรูปที่ 4.28 พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่มีรูปแบบ



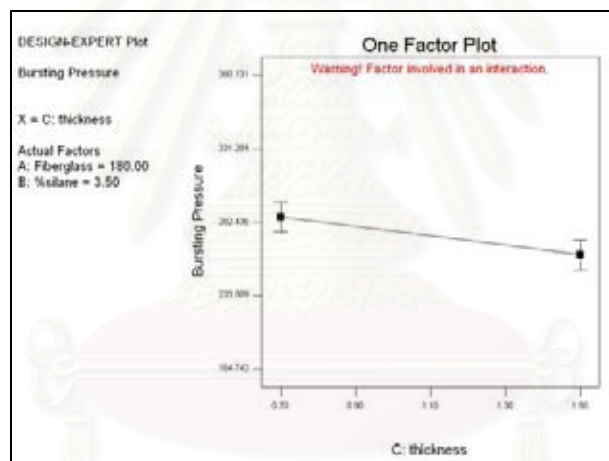
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าที่ทำนายได้จากสมการถดถอย

จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงความเพียงพอของสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมา โดยสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมาจะมีความเพียงพอต่อเมื่อความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือกับค่าที่ทำนายได้มีความสัมพันธ์กันแบบไม่มีรูปแบบ ดังนั้นแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าสมการถดถอยที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 และ 4.29 ซึ่งเป็นกราฟปัจจัยในระดับสูงค่าที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวัดจะพบว่าเมื่อขนาดของใยแก้วเพิ่มขึ้นค่าความความดันที่จุดวัดได้จะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.28 จะได้ค่าความชันเท่ากับ 46.401 และ ความหนาของชั้นงานเพิ่มขึ้นค่าความดันที่จุดวัดจะลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.28 จะได้ค่าความชันเท่ากับ -8.237



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของขนาดของใยแก้วที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของความหนาที่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติของวัสดุเชิงประกอบ

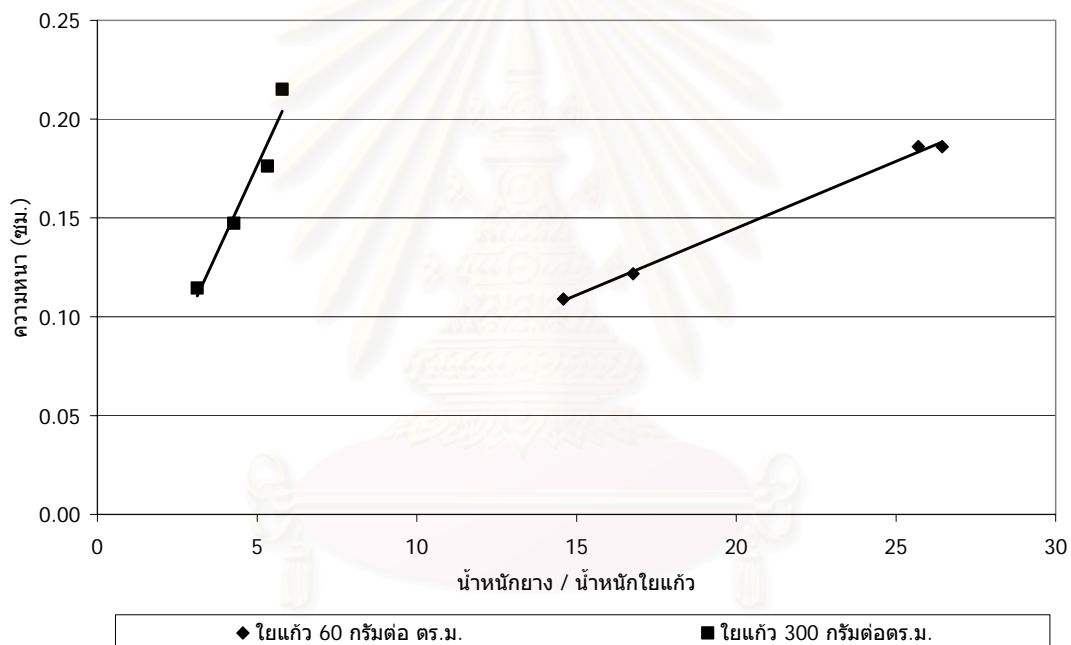
ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการถดถอย(สมการที่ 4.6) ที่ได้สร้างขึ้นจะให้ผลที่สอดคล้องกัน โดย β_A มีค่าเท่ากับ 37.95 และ β_C มีค่าเท่ากับ 12.60 ซึ่งแสดงถึงว่าการเพิ่มขนาดของเส้นใยค่าแรงดันที่จุดวิบัติจะเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความหนาของชิ้นงานค่าความความดันที่จุดวิบัติจะลดลง

เมื่อนำค่าความชันมาเปรียบเทียบกับ β_i จะได้ผลที่สอดคล้องกันคือ ค่าความชันของปัจจัยขนาดของใยแก้วมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกับค่า β_u ซึ่งมีค่าเป็นบวก และ ความชันของปัจจัยความหนาแน่นมีค่าเป็นลบเช่นเดียวกับค่า β_c ซึ่งมีค่าเป็นลบ

4.3.4 คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง

คุณสมบัติด้านความแข็งแรงจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน, ค่าความคั่นที่ทนได้, ค่าความคั่นที่จุดวิบัติ และ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

จากรูป 4.30 จะพบแนวโน้มว่าความหนาของชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อใยโดย

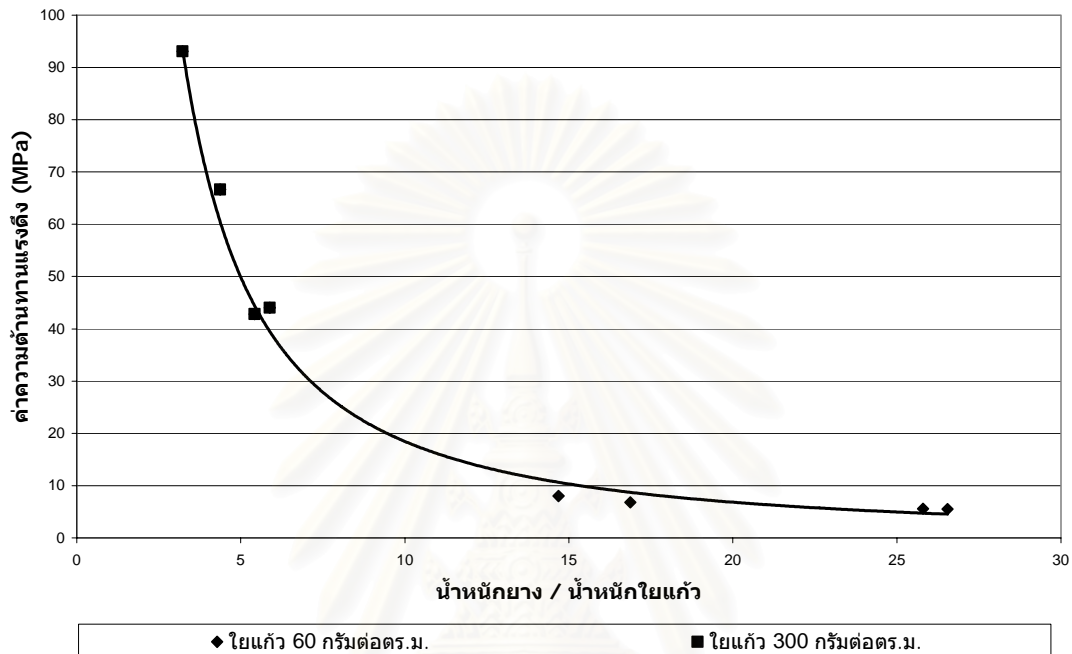


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วกับความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

อัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางเพิ่มมากขึ้นแล้ว ความหนาของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมมาจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรจะมีความหนามากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร

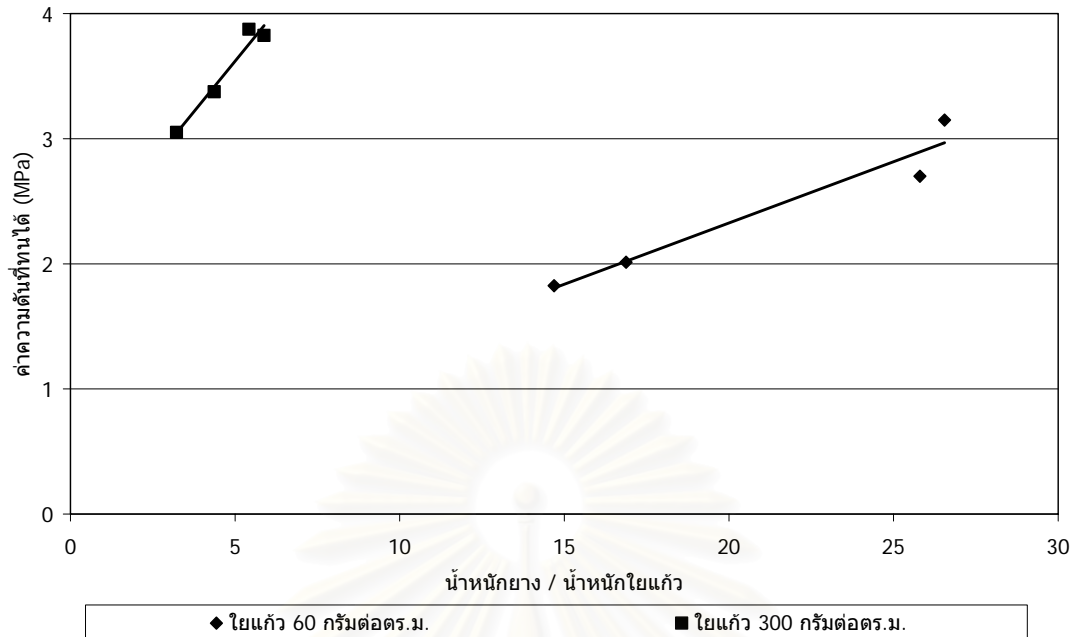
เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.31 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนยางต่อใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงเนื่องจากว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุชิ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใย โดยเส้นใยขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตร

มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเส้นใยขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร และปริมาณของยางจะมีผลถึงความหนาของชิ้นงาน เมื่อปริมาณยางเพิ่มมากขึ้น ความหนาของชิ้นงานจะมากขึ้นจึงทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานมีมากขึ้น ดังนั้นแรงต่อพื้นที่หน้าตัดจึงลดลง ซึ่งวิธีการแบบหล่อให้ผลสอดคล้องกับวิธีการแบบจุ่ม



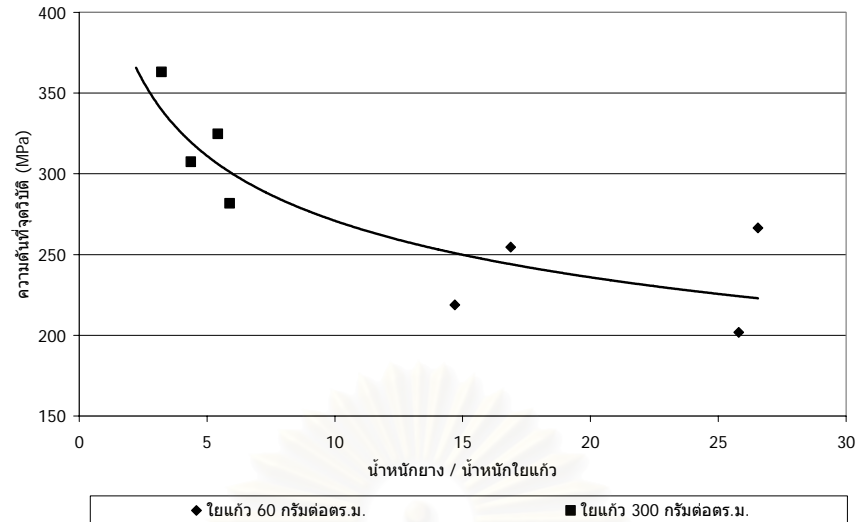
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้ว กับ ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของน้ำหนักยางต่อใยแก้วกับค่าความดันที่ทนได้ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.32 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อ ใยแก้วเพิ่มขึ้นค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้น วัสดุที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรจะสามารถทนความดันได้สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตรเพราะขนาดของใยแก้ว 300 กรัมต่อตารางเมตรมีปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการรับแรงมากกว่าใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร และ ปริมาณยางมีผลต่อความหนาของยาง โดยที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางมากจะมีความหนาของชิ้นงานมาก ดังนั้นเมื่อความหนาของยางเพิ่มขึ้น ความดันที่วัสดุเชิงประกอบที่ทนได้ก็เพิ่มขึ้น



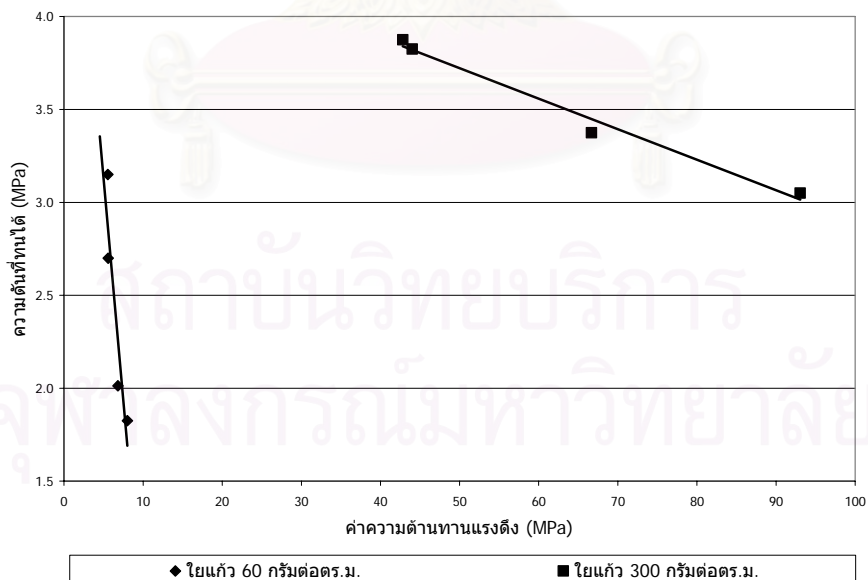
รูปที่ 4.32 ค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบกับค่าความดันที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูป 4.33 โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบจะมีแนวโน้มของค่าความดันที่จุดวิบัติลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วเพิ่มขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. จะมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม. โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรจะมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรจะบางกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตรความหนาของยางจะหุ้มช่องว่างระหว่างใยแก้วไว้ทั้งหมดโดยไม่เหมือนกับกรณีการเตรียมวัสดุด้วยวิธีการจุ่มซึ่งยางจะแค่เคลือบบนเส้นของใยแก้วเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันแล้วยางจะกันไม่ให้น้ำรั่วออกมาและใยแก้วจะเป็นตัวรับแรง ดังนั้นใยแก้วที่ขนาดใหญ่กว่าจึงสามารถรับแรงได้มากกว่าใยแก้วขนาดเล็ก



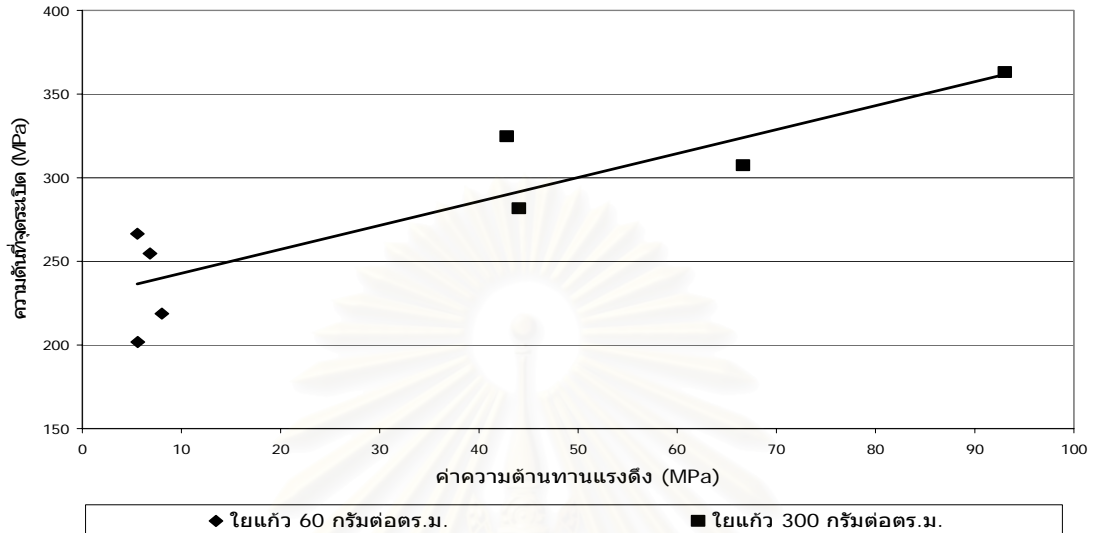
รูปที่ 4.33 ค่าความดันที่จุดวิกฤตของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงดึงกับค่าความดันที่ทนได้จะเป็นไปตามรูปที่ 4.34 โดยจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้นค่าความดันที่ทนได้จะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปัจจัยของความหนาของวัสดุเชิงประกอบ โดยเมื่อชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลง แต่ ความดันที่ทนได้จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่ทนได้กับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงดึงกับความดันที่จุดวิบัติจะมีแนวโน้ม
เมื่อค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ความดันที่จุดวิบัติจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะการ

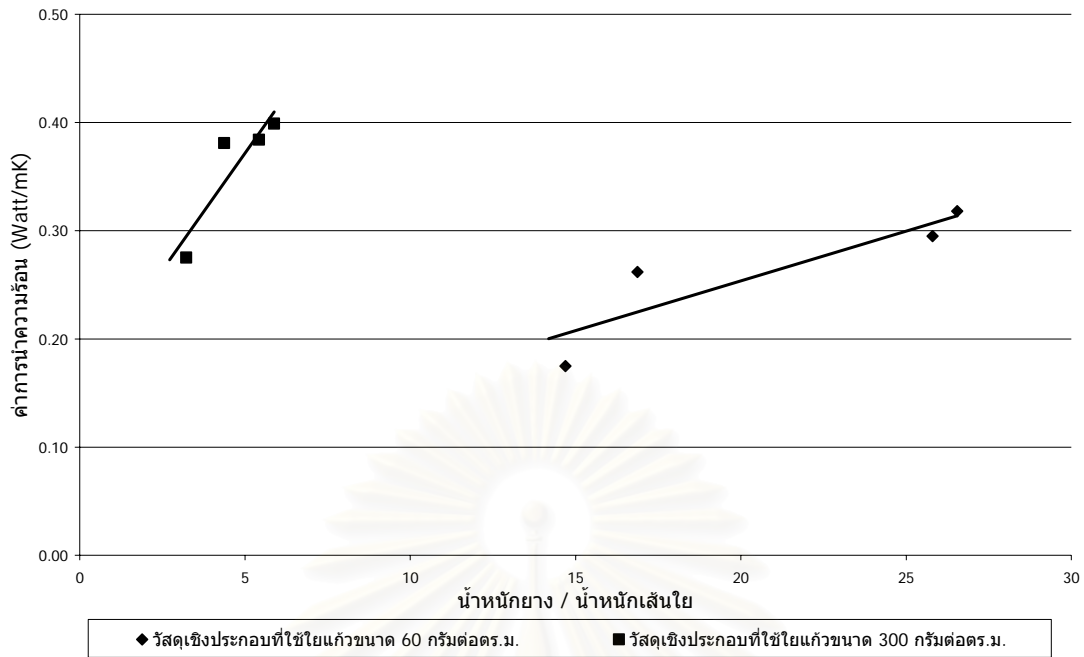


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับความดันที่จุดวิบัติของ
วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

กระทำของแนวแรงและพื้นที่บริเวณรับแรงเป็นลักษณะเดียวกันจึงมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้น
เหมือนกัน โดยจากกราฟ 4.35 และ 4.36 แสดงถึงวัสดุเชิงประกอบที่ทำมาจากใยแก้วขนาดใหญ่จะ
มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงและทนความดันได้สูง
กว่าใยแก้วที่มีขนาดเล็ก

4.3.5 คุณสมบัติด้านความร้อน

จากการทดลองพบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบจะอยู่ในช่วง 0.175 –
0.399 Watt/mK โดยค่าการนำความร้อนจะมีพฤติกรรมเป็นฉนวน

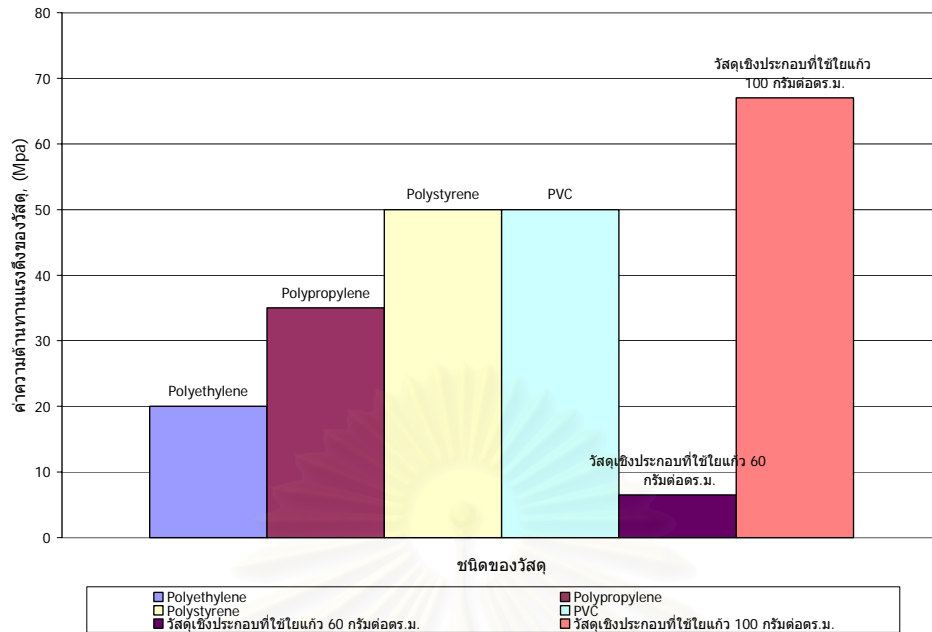


รูปที่ 4.36 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมวิธีการหล่อ

จากกราฟจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตรจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตรเนื่องจากค่าการนำความร้อนของใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตรจำมีค่าต่ำกว่าใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตร

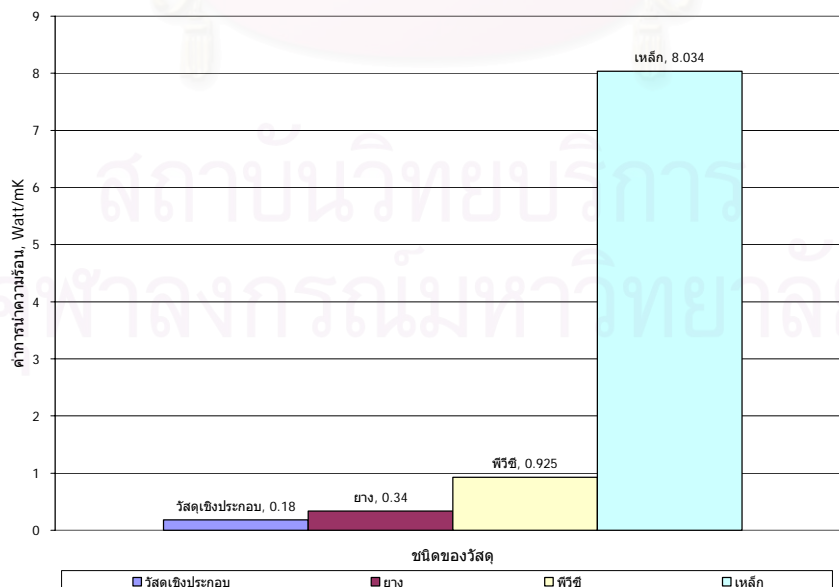
4.4 การประยุกต์ในการใช้งาน

จากรูปที่ 4.38 แสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึง[20] ของพอลิเอทีลีน, พอลิพอลฟีลีน, พอลิสไตรีน, พีวีซี, วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้ว 60 กรัมต่อตร.ม. และ วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้ว 300 กรัมต่อตร.ม. โดยจะพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้ว 300 กรัมต่อตร.ม. นั้นมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ดังนั้นสามารถนำวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. ใช้งานที่ต้องรับแรงดึงทดแทนพอลิเอทีลีน, พอลิพอลฟีลีน, พอลิสไตรีนและพีวีซี ได้



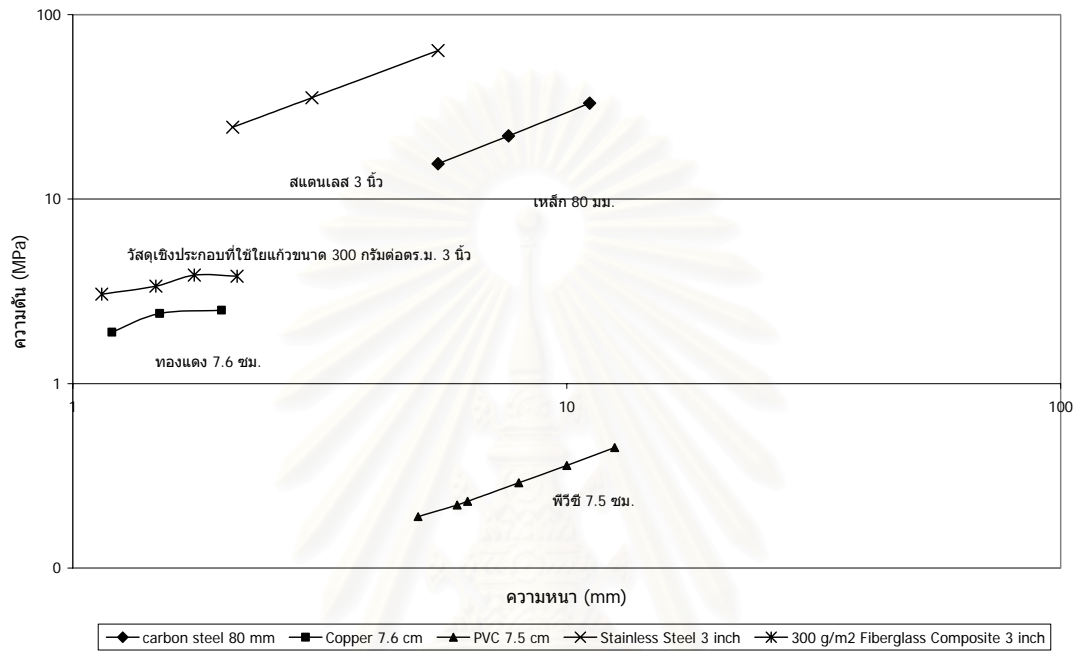
รูปที่ 4.37 แสดงถึงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุชนิดต่างๆ

จากรูป 4.39 แสดงถึงค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ จากรูปจะพบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับยางและพีวีซีที่เป็นฉนวนกันความร้อน และ ต่ำมากเมื่อเทียบกับเหล็กซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อน ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี



รูปที่ 4.38 แสดงถึงค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

รูปที่ 4.40 แสดงถึงสภาพการใช้งานของท่อ[21, 22, 23, 24, 25]ที่ทำมาจากสแตนเลส, เหล็ก, ทองแดงและพีวีซีเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตารางเมตร ที่ความหนาต่างๆ



รูปที่ 4.39 แสดงถึงความดันที่ทนได้ของท่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 นิ้วที่ความหนาต่างๆ

จากรูป จะแสดงกราฟอยู่ในรูปแบบแกน log-log เพื่อการเปรียบเทียบที่จะให้เห็นชัดเจนขึ้น และจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบจะสามารถทนแรงดันได้ดีกว่าทองแดงและพีวีซีที่ความหนาเดียวกัน แต่ความสามารถในการทนความดันนั้นยังต่ำกว่าวัสดุจำพวกเหล็กและสแตนเลสที่ความหนาเดียวกันโดยแนวโน้มจากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาขึ้น ค่าความดันที่ทนได้จะเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.38, 4.39 และ 4.40 แสดงให้เห็นว่า การนำวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. ไปใช้งานนั้นเป็นงานที่เหมาะสมสำหรับ งานที่ทนแรงดึงได้สูงกว่าพีวีซี ทนความดันได้สูงกว่าพีวีซี และมีความสามารถในการเก็บความร้อน เช่น ภาชนะใส่น้ำ, ภาชนะบรรจุน้ำแข็ง หรือท่อส่งน้ำที่ขนส่งน้ำผ่านบริเวณที่หนาวจัด(ต่ำกว่า 0C)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายวัสดุเชิงประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง ทนต่อความดัน และมีการนำความร้อนต่ำ โดยในการผลิตจากยางธรรมชาติกับใยแก้ว ในงานวิจัยจะศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการเตรียม 2 กระบวนการคือกระบวนการเตรียมแบบจุ่มและกระบวนการเตรียมแบบหล่อ ซึ่งในกระบวนการเตรียมแบบจุ่มนั้นจะศึกษาถึงขนาดของใยแก้วและปริมาณของไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้ว และในกระบวนการเตรียมด้วยวิธีการหล่อนั้นจะศึกษาถึงขนาดของใยแก้ว ปริมาณไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วและความหนาของวัสดุเชิงประกอบ สมบัติที่ทดสอบคือ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความดันที่ทนได้ ความดันที่จุดวิบัติและค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติวัสดุ

5.1.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ

ค่าความต้านทานแรงดึงของใยแก้วจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติมาก โดยใยแก้วจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อใช้ใยแก้วขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากปริมาณใยแก้วต่อพื้นที่ตัดขวางมีนั้นมากขึ้น

5.1.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

ค่าการนำความร้อนของใยแก้วจะต่ำกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากว่าใยแก้วมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นวัสดุทางเซรามิกส์ซึ่งมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ

5.1.3 การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วโดยใช้ไซเลน

การใช้ไซเลนปรับปรุงพื้นผิวนั้นตรวจสอบโดยไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวนั้นจะมีหมู่กำมะถันเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงใช้เครื่อง XRF พบว่าใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วมีปริมาณกำมะถันสูงกว่าใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว แล้วเมื่อนำไปทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยางพบว่าค่าแรงยึดเกาะของใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

กับยางนั้นมีค่าสูงกว่าค่าแรงยึดเกาะของใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวกับยางอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.1$

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

5.2.1 ด้านความแข็งแรง

1. การวัดค่าความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่มีความหนาไม่แน่นอน ไม่สามารถจะเปรียบเทียบได้ว่าปริมาณใยเส้นที่ 5% และ 7% โดยน้ำหนักจะทำค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น
2. ค่าความดันที่ทนได้ของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของยางเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่ใช้ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวมีค่าความดันที่ทนได้ลดลง การเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการจุ่มเหมาะสมกับการใช้เตรียมผลิตภัณฑ์แบบบาง
3. ค่าความดันที่จุดวิบัติของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงที่สุด เมื่อใช้ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม. เนื่องจากว่าขนาดความถี่ของใยแก้วมีขนาดเล็กที่สุด ทำให้การใช้แรงดันทะลุมาก ค่าความดันที่จุดวิบัติจึงสูง

5.2.2 ค่าการนำความร้อน

1. ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.013 – 0.033 W/m K ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน
2. เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ค่าการนำความร้อนจะลดลง เนื่องวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นมีความบางจึงจะประพุดตัวคล้ายใยแก้ว

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

5.2.1 ด้านความแข็งแรง

- ค่าความต้านทานแรงดึง

1. ขนาดของใยแก้วมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงโดยวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ากรใช้ใยแก้วขนาดเล็ก
2. การใช้ใยเส้นในการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ
3. ความหาของวัสดุเชิงประกอบจะมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงโดยเมื่อความหนา

เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบจะลดลง

4. อันตรกิริยาของขนาดใยแก้วกับความหนา มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยที่ขนาดใยแก้วที่เท่ากัน วัสดุเชิงประกอบที่บางกว่าจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า

- ค่าความดันที่ทนได้

1. ขนาดของใยแก้วมีผลต่อความดันที่ทนได้ โดยใยแก้วที่มีขนาดใหญ่จะสามารถทนความดันได้สูงกว่าใยแก้วที่มีขนาดเล็กเนื่องจากใยแก้วที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณใยแก้วต่อพื้นที่หน้าตัดสูงกว่าใยแก้วที่มีขนาดเล็ก

2. วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนสามารถทนความดันได้สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเนื่องจากไซเลนไปเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างยางกับใยแก้ว

3. ความหนาของวัสดุเชิงประกอบมีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ โดยวัสดุเชิงประกอบที่มีหนาจะมีสามารถทนความดันได้สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่บาง

4. อันตรกิริยาของขนาดของใยแก้วและความหนา มีผลต่อค่าความดันที่ทนได้ คือ ที่ใยแก้วขนาดเดียวกับวัสดุเชิงประกอบที่หนากว่าจะสามารถทนแรงดันได้มากกว่า

5. วัสดุเชิงประกอบที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสามารถทนความดันได้ต่ำเนื่องจากว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีความหนามากนั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำแต่สามารถทนความดันได้สูง

- ค่าความดันที่จุดวิบัติ

1. วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาดใหญ่มีค่าความดันที่จุดวิบัติสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาดเล็กเนื่องจากใยแก้วที่มีขนาดใหญ่สามารถรับแรงได้สูงกว่าใยแก้วที่มีขนาดเล็ก

2. การปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้ว โดยไซเลนไม่มีผลต่อค่าความดันที่จุดวิบัติ

3. เมื่อความหนาของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นค่าความดันที่จุดวิบัตินั้นจะลดลง

4. อันตรกิริยาของขนาดของใยแก้วกับปริมาณไซเลนมีผลต่อค่าความดันที่วิบัติได้โดยวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม. และผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าความดันที่จุดวิบัติสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม. แต่วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้ว 300 กรัมต่อตร.ม. และปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าความดันที่จุดวิบัติต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม. และไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน

5. เมื่อค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าความดันที่จุดวิบัติจะเพิ่มขึ้น

5.2.2 ค่าการนำความร้อน

1. ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.175 – 0.399 W/m K

2. ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อนั้นมีความหนา ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงมีพฤติกรรมการนำความร้อนคล้ายยาง

5.3 การประยุกต์ใช้งาน

1. วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC, Polyvinylchloride) พอลิเอทิลีน (PE, Polyethylene) พอลิพรอพิลีน (PP, Polypropylene) และ พอลิสไตรีน (PS, Polystyrene)

2. ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะมีความเป็นฉนวนมากกว่าพีวีซี

3. วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นจะสามารถทนความดันได้สูงกว่าพีวีซีและมีค่าใกล้เคียงกับทองแดง แต่ต่ำกว่าเหล็กและสแตนเลสที่มีความหนาเดียวกัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของใยแก้วด้วยไซเลนินให้เหมาะสมโดยควรจะให้ค่าแรงยึดเกาะระหว่างยางและใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความแตกต่างที่ $\alpha = 0.05$ โดยเปลี่ยนตัวทำละลายที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว

2. ควรจะกราฟต์โคพอลิเมอร์ลงบนวัสดุเชิงประกอบเพื่อให้วัสดุเชิงประกอบส่วนที่เป็นยางนั้นทนต่อสารละลายที่ไม่มีขี้

3. ควรศึกษาการยึดเกาะของชิ้นงานในระดับโมเลกุลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ESEM)

รายการอ้างอิง

1. Hammerfest Strøm. Bring in the reinforcements. Reinforced Plastics. 47(10 2003): 46-47
2. Ron Nelson. Reinforced plastics prevail on the waterfront. Reinforce Plastics. 47(7 2003): 32-33
3. Donald R. Askeland. The Science and Engineering Material. Third Edition. New York :Chapman&Hall, 1992
4. อธิพิศ แจ่มชัด. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, มีนาคม 2544
5. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. ยางธรรมชาติเบื้องต้น. ปัตตานี: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540
6. พิชัย เพชรจันทร์. ยางพารา. (เอกสารนิเทศการศึกษา). กรุงเทพมหานคร : หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมฝึกหัดครู, 2527
7. คณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. น้ำยาง. สงขลา : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2531
8. วราภรณ์ จอร์ไชยกุล, ผลชิต บัวแก้ว และ ภัทรา กานตศิลป์. น้ำยางข้นและการผลิตถุงมือยาง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง, 2539
9. Mohinder L. Nayyar. Piping Handbook. Sixth edition. New York: McGrawHill, 1992
10. Z-6040 Silane (Product Information). Midland : Dow Corning, 2002.
11. Usa Somnuk, Nantaya Yanumet, Johnw. Ellis, Brian P. Grady และ Edgar A. O'Rear. Adhesion Improvement in Glass Fiber Reinforced Polyethylene Composite Via Admicellar Polymerization. Polymer Composite 24(1 2003):171-180
12. Lopez Manchado M.A. และ Arroyo M.. Short Fiber as Reinforcement of Rubber Compounds. Polymer Composite 23(4 2002):666-673
13. Hanafi Ismail, Edyham M.R. และ Wirjosentono B.. Bamboo Fibre Filled Natural Rubber Composites: The Effects Filler Loading and Bonding Agent. Polymer Testing 21(2002), :139-144
14. Aslihan Arikan, Cevdet Kaynak และ Teoman Tincer. Influences of Liquid Elastomer Additive on the Behavior of Short Glass Fiber Reinforced Epoxy. Polymer Composites 23(5 2002):790 – 805

15. Nazareth da Silva A.L. , Teixeira S.C.S. , Widal A.C.C. และ Coutinho F.M.B.,
Mechanical Properties of Polymer Composites Based on Commercial Epoxy
Vinyl Ester Resin and Glass Fiber, Polymer Testing 20(2001): 895 – 899
16. Warren L. McCabe, Julian C. Smith และ Peter Harriott. Unit Operation of Chemical Engineering. Fifth edition New York: McGraw-Hill, 1993
17. R. Byron Bird, Warron E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. Transport Phenomena. 2nd
Edition. USA: John Wiley&Sons Inc, 2002
18. คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์. ความน่าจะเป็นและสถิติ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาคณิตศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530
19. Douglas C.M. Design and analysis of experiments. New York: Prentice Hall, 1995
20. Hall M.M.. Material Selector and Design Guide. England : Morgon-Grompian, 1974
21. BS (British Standard) 2871:1972 ,Dimensions and Working Pressure. Available from :
<http://www.engineeringtoolbox.com> [2004 Mar 21]
22. ASTM A312, Bursting and Collapsing Pressure of Stainless Steel Pipes. Available from
: <http://www.engineeringtoolbox.com> [2004 Mar 21]
23. Dimensions as per ISO 4422-2. Available from :
<http://www.jians.com/pipe%20fittings/pvc%20pipe.htm> [2004 Mar 21]
24. Dimension as per IS 4985. Available from :
<http://www.jians.com/pipe%20fittings/pvc%20pipe.htm> [2004 Mar 21]
25. ASTM A106, API 5L and ASTM A53 , Seamless Carbon Steel Pipes – Pressure at
Temperature Ratings. Available from : <http://www.engineeringtoolbox.com>
[2004 Mar 21]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองของวัสดุดิบ

ตารางที่ ก.1 ผลค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุดิบ

ชนิดของวัสดุดิบ	แรง (N)	ค่าความต้านทานแรงดึง(MPa)
ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.	136	34.1
ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม.	279	55.8
ใยแก้วขนาด 160 กรัมต่อตร.ม.	469	58.6
ใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม.	639	63.9
ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.	1035	86.3
ยาง	20.1	9.5

ตารางที่ ก.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุดิบ

ชนิดของวัสดุดิบ	ค่าการนำความร้อน (Watt/mK)
ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.	0.010
ใยแก้วขนาด 100 กรัมต่อตร.ม.	0.017
ใยแก้วขนาด 160 กรัมต่อตร.ม.	0.024
ใยแก้วขนาด 200 กรัมต่อตร.ม.	0.050
ใยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.	0.074
ยาง	0.490

ตารางที่ ก.3 ค่าแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วและยาง

	แรงต่อพื้นที่ (N/mm ²)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ยางกับใยแก้ว 60 กรัมต่อตร.ม. ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	0.074	0.034
ยางกับใยแก้ว 60 กรัมต่อตร.ม. ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว	0.139	0.029

ตารางที่ ก.4

ผลการวิเคราะห์ธาตุของใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวเทียบกับใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธี XRF
ตัวอย่าง : ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.

Compound	ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว		ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮลเลน 7% โดยน้ำหนักของใยแก้ว	
	Concentration(%)	intensity (kcps)	Concentration(%)	intensity (kcps)
O (OKA)	48.5	0.974	46.5	0.965
Na (NaKA)	0.210	0.400	0.201	0.408
Mg (MgKA)	3.06	22.5	3.39	26.5
Al (AlKA)	6.26	30.0	6.35	32.0
Si (SiKA)	24.3	101	25.7	111
P (PKA)	0.051	0.585	0.058	0.682
S (SKA)	0.012	0.143	0.838	9.93
Cl (ClKA)	0.091	0.382	0.087	0.365
K (KKA)	0.278	1.22	0.297	1.31
Ca (CaKA)	16.6	84.7	16.0	82.7
Ti (TiKA)	0.288	1.43	0.313	1.62
Cr (CrKA)	0.016	0.071	N/A	N/A
Fe (FeKA)	0.317	2.17	0.287	2.04
Sr (SrKA)	0.010	0.237	0.009	0.227
Zr (ZrKA)	0.004	0.157	0.006	0.254
Total	99.9	-	100	-

ตารางที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.

	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	เฉลี่ย
%คาร์บอนคงตัว	0.408	0.287	0.347
%สารระเหยได้	0.087	0.086	0.087
%ความชื้น	0.486	0.500	0.493
%เถ้า	99.0	99.1	99.1
รวม	100	100	100



ภาพที่ ก.1 ไยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.



ภาพ ก.2 ไยแก้วขนาด 300 กรัมต่อตร.ม.



ภาพ ก.3 ไยแก้วตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



ภาพ ก.4 วิธีใส่ใยแก้วตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



ภาพ ก.5 ชิ้นงานทดสอบแรงยึดเกาะระหว่างใยแก้วกับยาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ผลการทดลองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ตารางที่ ข.1 ค่าความหนาของวัสดุเชิงประกอบ(cm)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)				
	0%	1%	3%	5%	7%
60	0.036	0.027	0.018	0.017	0.035
100	0.035	0.030	0.021	0.020	0.044
160	0.050	0.041	0.030	0.024	0.050
200	0.040	0.048	0.029	0.029	0.051
300	0.072	0.084	0.050	0.038	0.068

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)				
	0%	1%	3%	5%	7%
60	30.4	23.3	29.8	45.9	28.8
100	42.3	46.2	71.7	78.6	27.4
160	15.3	35.7	70.6	91.6	52.1
200	69.6	66.0	114	117	78.5
300	45.9	52.9	62.9	80.3	117

ตารางที่ ข.3 ค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)				
	0%	1%	3%	5%	7%
60	7.38	4.07	2.45	1.29	4.97
100	3.13	2.57	0.955	0.921	4.26
160	2.59	1.71	0.954	0.775	2.35
200	1.48	1.90	0.895	0.817	1.90
300	1.82	1.86	0.973	0.407	1.37

ตารางที่ ข.4 ค่าความดันที่ทนได้(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

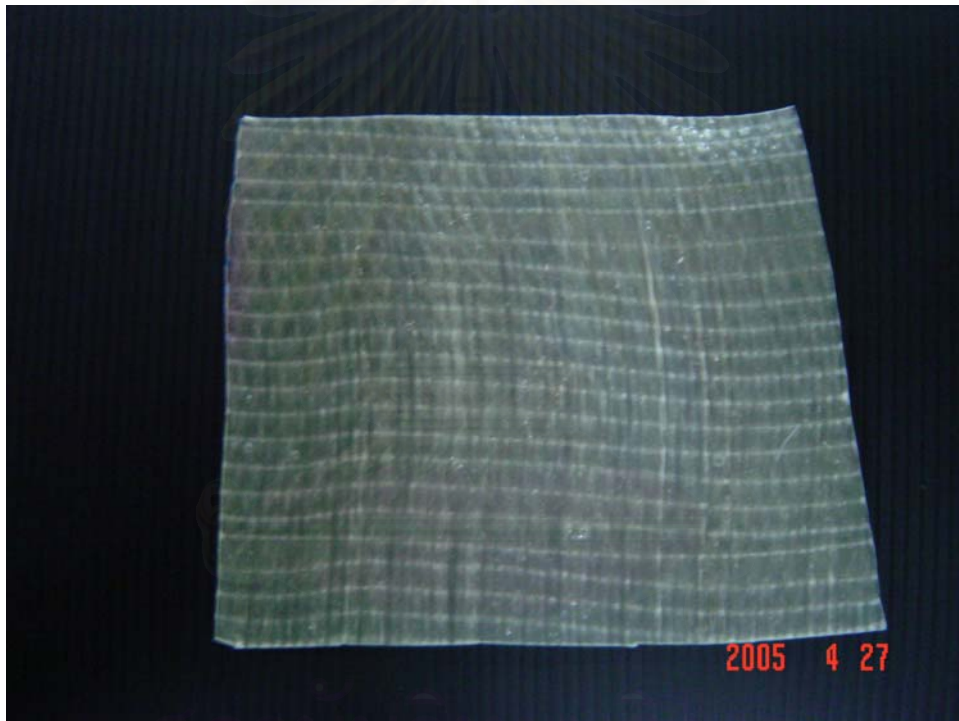
ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)	
	0%	5%
60	1.48	0.6
100	1.45	1.27
160	2.07	0.97
200	1.27	0.6
300	3.7	0.6

ตารางที่ ข.5 ค่าความดันที่จุดวิบัติ (MPa) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)	
	0%	5%
60	280	215
100	432	474.
160	228	256
200	151	63.9
300	445	73.3

ตารางที่ ข.6 ค่าการนำความร้อน (Watt/mK) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ขนาดของใยแก้วที่ใช้เตรียมวัสดุ เชิงประกอบ(กรัม ต่อ ตร.ม.)	ปริมาณ ไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวใยแก้ว (%โดยน้ำหนักใยแก้ว)	
	0%	5%
60	0.033	0.034
100	0.070	0.082
160	0.072	0.090
200	0.049	0.125
300	0.127	0.095



ภาพ ข.1 วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม

ภาคผนวก ค.

ผลการทดลองของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ตารางที่ ค.1 ค่าอัตราส่วน โดยน้ำหนักของยางต่อใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ขนาดของใยแก้ว (กรัมต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลน (%โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	ความหนา (มม.)	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก
60	0	0.7	14.7
60	0	1.5	25.8
60	7	0.7	16.9
60	7	1.5	26.5
300	0	0.7	3.22
300	0	1.5	5.43
300	7	0.7	4.37
300	7	1.5	5.88

ตารางที่ ค.2 ค่าความต้านทานแรงดึง(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ขนาดของใยแก้ว (กรัมต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลน (%โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	ความหนา (มม.)	ค่าความต้านทานแรงดึง (MPa)	
			ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
60	0	0.7	6.56	9.49
60	0	1.5	5.49	5.69
60	7	0.7	7.42	6.23
60	7	1.5	4.42	6.67
300	0	0.7	102	84.1
300	0	1.5	46.0	39.6
300	7	0.7	86.5	46.9
300	7	1.5	45.2	42.8

ตารางที่ ค.3 ค่าความดันที่ทนได้(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

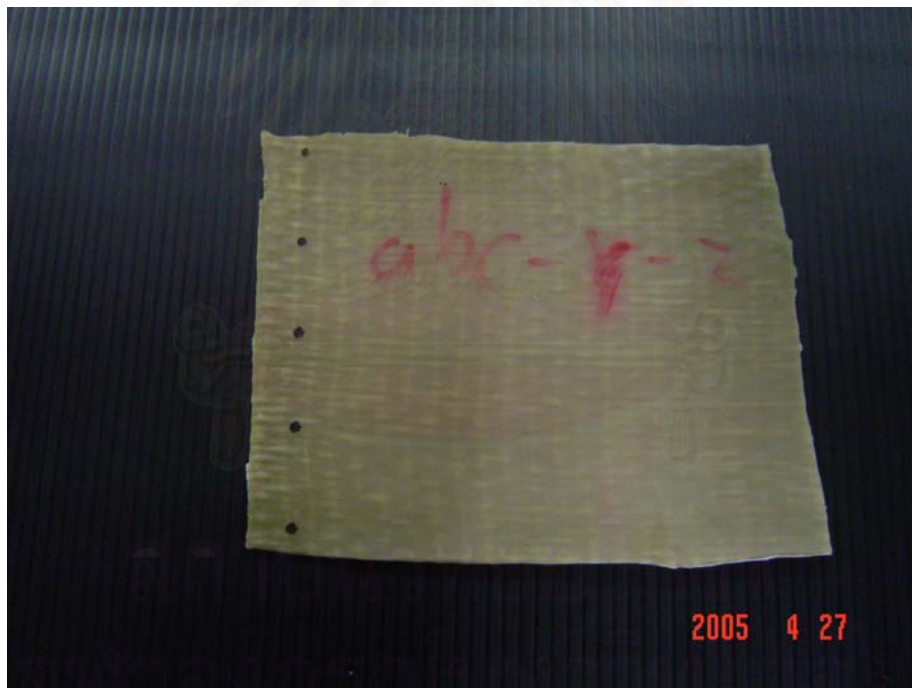
ขนาดของใยแก้ว (กรัมต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลน (%โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	ความหนา (มม.)	ความดันที่ทนได้ (MPa)	
			ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
60	0	0.7	1.60	2.05
60	0	1.5	2.60	2.80
60	7	0.7	1.93	2.10
60	7	1.5	2.95	3.35
300	0	0.7	3.00	3.10
300	0	1.5	3.60	4.15
300	7	0.7	3.65	3.10
300	7	1.5	3.06	4.05

ตารางที่ ค.4 ค่าความดันที่จุดวิบัติ(MPa)ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ขนาดของใยแก้ว (กรัมต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลน (%โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	ความหนา (มม.)	ความดันที่จุดวิบัติ (MPa)	
			ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
60	0	0.7	224	214
60	0	1.5	219	185
60	7	0.7	250	260
60	7	1.5	252	281
300	0	0.7	346	380
300	0	1.5	312	338
300	7	0.7	319	296
300	7	1.5	282	244

ตารางที่ ค.4 ค่าการนำความร้อน (Watt/mK) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ขนาดของใยแก้ว (กรัมต่อ ตร.ม.)	ปริมาณไซเลน (%โดยน้ำหนักของใยแก้ว)	ความหนา (มม.)	ค่าการนำความร้อน (Watt/mK)
60	0	0.7	0.175
60	0	1.5	0.295
60	7	0.7	0.262
60	7	1.5	0.318
300	0	0.7	0.275
300	0	1.5	0.384
300	7	0.7	0.381
300	7	1.5	0.399



รูปที่ ค.1 วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อ

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณ t-test หาความแตกต่างของแรงยึดเกาะระหว่างยางกับใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบ

พื้นที่ทดสอบ 300 มม.² ใยแก้วขนาด 60 กรัมต่อตร.ม.

ตัวอย่าง	แรงต่อพื้นที่ (นิวตัน/มม. ²)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว	0.074	0.0342
ใยแก้วที่ปรับปรุงด้วยไซเลน 7% โดยน้ำหนัก	0.139	0.0285

จากผลทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test จะตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \mu_{\text{ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิว}} = \mu_{\text{ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว}}$$

$$H_1: \mu_{\text{ใยแก้วที่ปรับปรุงพื้นผิว}} \neq \mu_{\text{ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว}}$$

$$\text{กำหนดให้ } \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$t = \frac{X_{1,\text{ave}} - X_{2,\text{ave}}}{SD_p \cdot (1/n_1 + 1/n_2)^{1/2}}$$

$$SD_p = \frac{(n_1 - 1)SD_1^2 + (n_2 - 1)SD_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$\text{d.f.} = n_1 + n_2 - 2$$

$$X_{1,\text{ave}} = 0.139 \text{ N/mm}^2 \quad SD_1 = 0.0342 \quad n_1 = 3$$

$$X_{2,\text{ave}} = 0.074 \text{ N/mm}^2 \quad SD_2 = 0.0285 \quad n_2 = 3$$

$$SD_p = 0.0315 \quad t = 2.53 \quad \text{d.f.} = 4$$

$$\text{ที่ } \alpha = 0.1, t_{0.05,4} = 2.13 \quad t_{\text{ทดสอบ}} > t_{0.05,4}$$

ดังนั้น ปฏิเสธสมมติฐานว่าง กล่าวคือค่าเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ใยแก้วปรับปรุงพื้นผิวและที่ใช้ใยแก้วที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.1$

การคำนวณค่าการนำความร้อน

จากสมการ Newton's law of cooling

$$m\Delta H_{\text{vap}} = UA\Delta T/Y$$

$$m = (m_1 - m_2)/t$$

$$1/U = 1/k_1 + 1/k_2$$

โดยที่

m_1 = น้ำหนักอะซีโตนและชุดทดสอบก่อนได้รับความร้อน (กรัม)

m_2 = น้ำหนักอะซีโตนและชุดทดสอบหลังได้รับความร้อน (กรัม)

m = อัตราการไหลของอะซีโตน (กรัม/วินาที)

ΔH_{vap} = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของอะซีโตน มีค่า 512 kJ/kg ที่ 56 C

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Watt/mK)

A = พื้นที่การถ่ายโอนความร้อน (cm²)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ (C)

Y = ความหนาของวัสดุทดสอบ (cm)

k_1 = ค่าการนำความร้อนของชุดทดสอบ = 0.064 Watt/mK

k_2 = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Watt/mK)

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักอะซีโตนและชุดทดสอบก่อนได้รับความร้อน = 194.63 กรัม

น้ำหนักอะซีโตนและชุดทดสอบหลังได้รับความร้อน = 192.57 กรัม

เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 60 วินาที

อุณหภูมิอะซีโตนเดือด 56.2 C

อุณหภูมิน้ำเดือด 100 C

ความหนาของชิ้นงานทดสอบ = 0.024 ซม.

ดังนั้น

อัตราการไหลของอะซีโตน = 0.034 กรัมต่อวินาที

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม = 0.058 Watt/mK

ค่าการนำความร้อนของวัสดุ = 0.064 Watt/mK

การคำนวณความดันที่วิบัติ(Bursting Pressure)

$$\text{Bursting Pressure} = (P \times A)/(C \times Y)$$

โดยที่

P = ความดันที่ทนได้ (MPa)

A = พื้นที่ที่รับความดัน = 13.023 cm²

C = เส้นรอบวงของบริเวณที่ทะลุ = 1.734 cm

Y = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (cm)

ตัวอย่างการคำนวณ

ความดันที่ทนได้ 1.2 MPa

ความหนาของชิ้นงานทดสอบ 0.038 cm

ดังนั้น

ความดันที่จุดวิบัติ 230.29 MPa



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปริญญา เลิศสถิตย์พงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ จบการศึกษาระดับประถมและมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญ(2540) เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2541 เคยคณะกรรมการบัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2544) ประธานฝ่ายวิชาการคณะวิทยาศาสตร์(2543) อุปนายกสโมสรโรตารี่แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย(2543) ประธานฝ่ายบริการสโมสร สโมสรโรตารี่แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2542) เลขานุการอินเตอร์แรคท์ภาค 3350 โรตารี่สากลประจำปี 2540-2541 งานวิจัยในระดับปริญญาตรีคือ การหาความสัมพันธ์ของสารลดแรงตึงผิวกับแยกน้ำมันออกจากน้ำด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ (Relationship between surfactant and oil removal by statistical analysis) จบการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค แขนงวิชาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง (2544) และเข้าศึกษาต่อที่ระดับบัณฑิตศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย