

การเตรียมวัสดุคอมพิวเตอร์ที่ได้จากยางธรรมชาติ/เส้นใยคาร์บอนและยางธรรมชาติ/เส้นใยไหม
ซึ่งหล่อด้วยรังสี



นางสาวสุชีรา รัชญูรักษ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

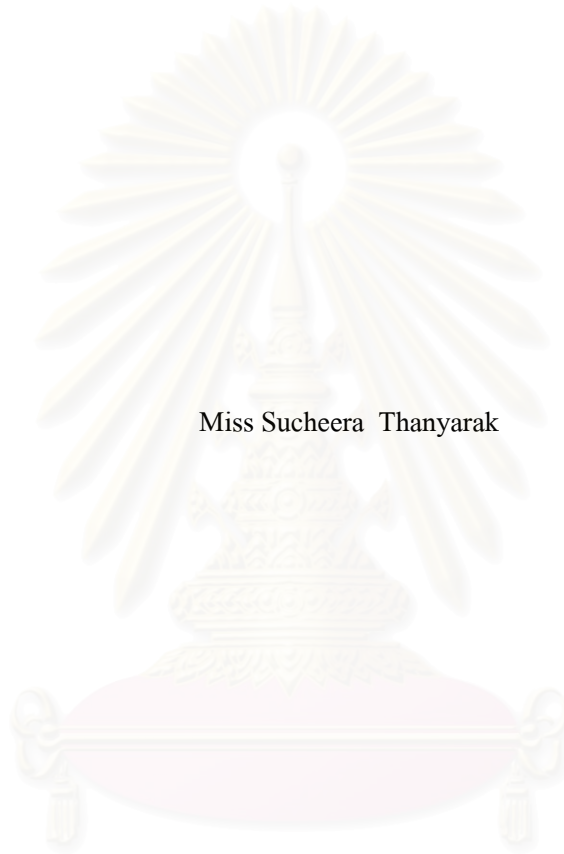
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-1907-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF RADIATION CROSSLINKED NATURAL RUBBER/CARBON FIBER
AND NATURAL RUBBER/SILK FIBER COMPOSITES



Miss Sucheera Thanyarak

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-1907-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากยางธรรมชาติ/เส้นใยคาร์บอน
และยางธรรมชาติ/เส้นใยไหมซึ่งครอสลิงค์ด้วยรังสี

โดย

นางสาวสุชีรา รัชฎงษ์

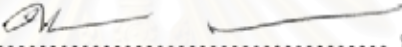
สาขาวิชา

นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี

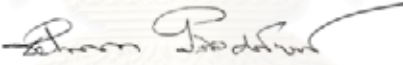
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

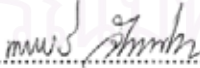
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

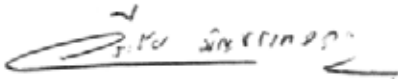

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชากกริต ศิริอุปลัมภ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... กรรมการ
(ดร.วีระชัย บัญชรเทวกุล)

สุชีรา รัชญูรักษ์ : การเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากยางธรรมชาติ/เส้นใยคาร์บอนและ
ยางธรรมชาติ/เส้นใยไหมซึ่งครอสลิงก์ด้วยรังสี (PREPARATION OF RADIATION
CROSSLINKED NATURAL RUBBER/CARBON FIBER AND NATURAL
RUBBER/SILK FIBER COMPOSITES) อ. ที่ปรึกษา :รศ. ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, 89 หน้า
ISBN 974-53-1907-4

ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการวัลคาไนซ์
น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีปริมาณ 16 กิโลเกรย์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมหรือเส้นใยคาร์บอน
โดยใช้แผ่นยางที่ไม่ได้เสริมแรงเป็นวัสดุอ้างอิง พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการเสริมแรงด้วย
เส้นใยไหมหรือเส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงตัวแบบสุ่มจะมีความต้านทานการฉีกขาด โมดูลัสความยืด-
หยุ่น และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการดึงจนขาดและ % ความยาวที่ยืดออกจน-
ขาดจะลดลง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาบทบาทของตัวแปรอื่นเช่นความยาวของเส้นใย ปริมาณของ
เส้นใยและทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทางที่มี
ผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพที่กล่าวข้างต้น พบว่าความต้านทานการดึงจนขาด ความต้านทานการ-
ฉีกขาด และโมดูลัสความยืดหยุ่นในทิศทางตามยาวของเส้นใยจะมีค่าสูงกว่าค่าเหล่านี้ในทิศทาง
ตามขวาง ในขณะที่ % ความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตในทิศทางตามขวางของเส้น
ใยจะมีค่าสูงกว่า % ความยาวที่ยืดออกจนขาดในทิศทางตามยาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต..... สุชีรา รัชญูรักษ์
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล
ปีการศึกษา...2548

#4670642021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: COMPOSITE / REINFORCED / SILK FIBER / CARBON FIBER / MECHANICAL PROPERTIES / NATURAL RUBBER LATEX

SUCHEERA THANYARAK : PREPARATION OF RADIATION CROSSLINKED NATURAL RUBBER/CARBON FIBER AND NATURAL RUBBER/SILK FIBER COMPOSITES. THESIS ADVISOR : PROF. SIRIWATANA BANCHORNDHEVAKUL, 89 pp. ISBN 974-53-1907-4.

Physical property changes of radiation vulcanization at 16 kGy of either silk fibers reinforced or carbon fibers reinforced rubber composites were studied. With fiber free rubber composite as a control, it was revealed that either silk fibers or carbon fibers loaded composites (with randomized direction) had higher tear strength, modulus of elasticity and hardness with lower in tensile strength and % elongation at break. Effect of fiber length, fiber content, fiber orientation (unidirectional and bidirectional) and fiber spacing on the above mentioned physical properties of fiber reinforced rubber composites had tensile strength, tear strength and modulus of elasticity in the longitudinal direction higher than those properties in transverse. In contrast, % elongation at break in the transverse direction was higher than % elongation at break in the longitudinal direction.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Nuclear Technology..... Student's signature..... *Sucheera Thanyarak*.....

Field of study....Nuclear Technology..... Advisor's signature..... *Prof. Siriwatana Banchorndhevakul*.....

Academic year 2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำในทุก ๆ ด้าน รวมถึงอาจารย์ทุกท่านภาควิชานิเวศศาสตร์ เทคโนโลยีที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ต่าง ๆ มากมาย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณอารักษ์ วิทิตธีรานนท์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการใช้เครื่องวัดปริมาณรังสี

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยยาง ส่วนอุตสาหกรรมยาง ที่กรุณาให้คำแนะนำ อำนวยความสะดวก และลดหย่อนค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์รวมทั้งความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณธนศ จงรุจินันท์ สำหรับความห่วงใย กำลังใจ และความช่วยเหลือในช่วงเวลาที่ยากลำบากต่าง ๆ ให้ผ่านไปได้

ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านในภาควิชานิเวศศาสตร์เทคโนโลยี โดยเฉพาะเพื่อนนิสิตที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ท้ายสุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านจนทำให้งานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการจากการวิจัย.....	5
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีผ่านวัตถุ.....	6
2.2 ผลของรังสีที่มีต่อน้ำ.....	8
2.3 การเกิดครอสลิงค์ของโพลีเมอร์อันเนื่องมาจากผลของการฉายรังสี.....	9
2.4 ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุล.....	11
2.5 วัสดุคอมโพสิต.....	13
3. การทดลอง.....	25
3.1 การทดลองหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ น้ำยางธรรมชาติ.....	25
3.2 ทดลองหาปริมาณเส้นใย (load of fiber) ความยาวเส้นใย (length of fiber) และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม สำหรับใช้เสริมแรงในน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี.....	30

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ น้ำยางธรรมชาติ.....	40
4.2 ผลการหาความยาว, ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม....	42
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก ใบ Certificate of rubber latex.....	66
ภาคผนวก ข วิธีคำนวณเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีเพื่อให้ได้ ปริมาณรังสีที่ต้องการ.....	67
ภาคผนวก ค ใบ Certificate of carbon fiber.....	69
ภาคผนวก ง ผลการหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ น้ำยางธรรมชาติ.....	70
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม.....	74
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม.....	77
ภาคผนวก ช ผลการทดสอบ Modulus of elasticity 100 % เพื่อหา ความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม.....	80
ภาคผนวก ซ ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม.....	83
ภาคผนวก ฌ ผลการทดสอบค่าความแข็ง เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน.....	18
2.2 โครงสร้างทางเคมีของขนสัตว์ และเส้นใยไหม.....	19
2.3 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยไหมและเส้นใยอื่นๆ.....	20
3.1 สูตรที่ใช้ผลิต RVNRLZ.....	26
3.2 ผลการทำ Dose mapping ปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆ ณ วันที่ 26 สิงหาคม 2548...	34
3.3 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม.....	36
3.4 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน.....	36
3.5 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง.....	37

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการเกิดครอสลิงค์เมื่อฉายรังสีโพลีเมอร์.....	10
2.2 การเชื่อมโยงโมเลกุล (---) ของโพลีเอทิลีน.....	11
2.3 แสดงสูตรโครงสร้างของยาง (cis 1, 4 polyisoprene).....	13
2.4 แสดงสูตรโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber).....	16
2.5 แสดงการแบ่งแยกเส้นใย.....	17
2.6 แสดงโครงสร้างของเส้นใยไหม (silk fiber).....	18
2.7 แสดงรูปร่าง ขนาด ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรง.....	22
2.8 แสดงทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างๆ.....	23
2.9 แสดงแรงดึงขนานกับทิศทางของเส้นใย.....	24
2.10 แสดงแรงดึงตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย.....	24
3.1 รูปตำแหน่งที่ใช้วางขวดใน Rack ที่ใช้ฉายรังสี.....	27
3.2 รูปตำแหน่ง Rack วางในเครื่องฉายรังสี.....	27
3.3 รูปเครื่องทดสอบความต้านทานการดึงขนาด Universal Testing Machine.....	28
3.4 รูปเครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง.....	29
3.5 รูปตู้อบยี่ห้อ Heraeus.....	29
3.6 รูปการทำ Reflux เพื่อหาสัดส่วนความเป็นเจล.....	30
3.7 รูปเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยไหม.....	30
3.8 รูปเครื่องทดสอบความต้านทานการดึงขนาดแบบ manual.....	31
3.9 รูปเครื่องทดสอบความต้านทานการฉีกขาด Universal Testing Machine.....	31
3.10 รูปแผ่น Acrylic มีขอบ เจาะรูที่ขอบทุกด้าน แต่ละรูห่างกัน 5 มิลลิเมตร ขนาด 15 × 15 เซนติเมตร และแผ่นกระจกขนาด 15 × 15 เซนติเมตร.....	32
3.11 รูป dosimeter ติดรอบๆ ขวดพลาสติก 4 ด้าน.....	32
3.12 ตำแหน่งที่ใช้วางขวดสำหรับฉายรังสี	33
3.13 รูปการร้อยเส้นใยไหมแบบสองทิศทาง ที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร.....	34
3.14 รูปการใช้ดินน้ำมันน้ำหนัก 3 กรัม ถ่วงน้ำหนักเส้นใยทั้งสองข้างของเส้นใย.....	35
3.15 รูปเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ซึ่งนำมาใช้เสริมแรงในน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี.....	35

3.16	รูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร.....	35
3.17	รูปฟิล์มยางทำเป็นชิ้นงานทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดในทิศทางทางการจัดเรียงตัวต่างๆ.....	38
3.18	รูปฟิล์มยางทำเป็นชิ้นงานทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดในทิศทางทางการจัดเรียงตัวต่างๆ.....	38
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า Tensile strength, % Elongation at break, Modulus of elasticity และ % Gel content.....	41
4.2	แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความต้านทานการดึงจนขาด.....	44
4.3	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหม และเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความต้านทานการดึงจนขาด.....	44
4.4	รูปชิ้นทดสอบที่ทดสอบความต้านทานการดึงจนขาดแล้ว.....	45
4.5	แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด.....	47
4.6	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด.....	47
4.7	แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่า Modulus of elasticity 100 %	50

4.8	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่า Modulus of elasticity 100 %.....	50
4.9	แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรง ในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าแรงต้านทานการฉีกขาด.....	52
4.10	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าแรงต้านทานการฉีกขาด.....	52
4.11	แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความแข็ง.....	55
4.12	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความแข็ง.....	55
5.1	แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบสุ่มเสริมแรงที่ความยาวและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	58
5.2	แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยไหมจัดเรียงตัวแบบสุ่มเสริมแรงที่ความยาวและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	59
5.3	แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยไหมจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง.....	60
5.4	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีความยาวและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด.....	61
5.5	แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุคอมโพสิต (composite materials) มาประยุกต์เป็นวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายด้านเช่น อุตสาหกรรมเกี่ยวกับยาง อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ พลาสติกทนความร้อน อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ

วัสดุคอมโพสิตที่ผลิตขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วยวัสดุสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นวัสดุหลัก (matrix materials) และส่วนที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) เส้นใยเป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต เส้นใยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) และเส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber) ถึงแม้ว่าเส้นใยที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรงมักเป็นเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นเส้นใยที่มนุษย์ผลิตขึ้นเอง เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีคุณสมบัติเชิงกล, คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีที่ดีเช่น มีค่าความต้านทานการดึงจนขาดสูง (high tensile strength), ค่ามอดุลัสสูง (high modulus), ความหนาแน่นต่ำ (low density), มีการนำความร้อนที่ดีและไม่ละลายในสารละลาย เป็นต้น แต่เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีราคาค่อนข้างแพง เช่น เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำเส้นใยธรรมชาติที่หาได้ง่ายกว่าเช่น เส้นใยไหม (silk fiber) มาใช้แทนเส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากเส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากที่สุด และมีคุณสมบัติเชิงกล, คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีที่ดี คือ มีความหนาแน่นต่ำ ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นด่าง นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้ว เส้นใยไหมสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และยังมีราคาที่ถูกลงกว่าเส้นใยคาร์บอนสองถึงสามเท่า นอกจากการใช้เส้นใยเสริมแรงเพื่อทำให้วัสดุมีความแข็งแรงแล้ว การฉายรังสีทำให้โมเลกุลของวัสดุมีการเชื่อมโยงกันแบบร่างแหหรือเกิดการครอสลิงค์ (crosslink) จึงทำให้โมเลกุลของวัสดุมีการเชื่อมโยงกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความยาวของเส้นใย (length of fiber), ปริมาณของเส้นใย (load of fiber) และทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแบบต่างๆ ที่มีผลต่อวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการนำน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ (vulcanize) ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม แล้วนำมาทำเป็นฟิล์มยางเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) คือ ค่าความต้านทานการดึงจนขาด (Tensile

strength), ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด (% Elongation at break), ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity), ค่าความต้านทานการฉีกขาด (Tear Strength) และค่าความแข็ง (Hardness)

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการนำน้ำยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และน้ำยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. หาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ และหาความยาว, ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยไหม ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสี
2. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในรูปของฟิล์มยางที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ได้แก่ค่าความต้านทานการดึงจนขาด, ค่าความต้านทานการฉีกขาดและค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ
3. หาความยาว, ปริมาณและทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยไหมที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสี
4. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในรูปของฟิล์มยางที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ได้แก่ ค่าความต้านทานการดึงจนขาด, ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด, ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น, ค่าความต้านทานการฉีกขาด และค่าความแข็ง
5. สรุปผลงานวิจัยและเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 Geethamma, V.G., Joseph, Reethamma., และ Thomas, Sabu. [1] ได้ทำการศึกษาถึงความยาวของเส้นใย ที่มีผลต่อการคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใย coir ขนาดสั้น โดยความยาวของเส้นใยที่ใช้ในการศึกษา มีความยาวเป็น 6,10 และ 14 มิลลิเมตร พบว่าค่า tensile strength ,tear strength, % elongation at break และ modulus มีค่าสูงสุดที่ความยาว 10 มิลลิเมตร

1.5.2 Haque, M.E., Dafader, N.C., Akhtar, F. Akhtar., และ Ahmad,M.U. [2] ได้ศึกษาถึงปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยาง เมื่อใช้สารไวปฏิกิริยาหลาย ๆ ชนิด พบว่าสารไว

ปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือ n-butyl acrylate ปริมาณ 5 phr. เมื่อใช้เวลาในการผสม 30-40 นาที และ ปริมาณรังสี 12 kGy เป็นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยาง

1.5.3 Geethamma, V.G., Mathew, K. Thomas, Lakshminarayanan, R., และ Thomas, Sabu [3] ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณของเส้นใย ที่มีผลต่อการคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใย coir ขนาดสั้น พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงมากขึ้น ค่า tensile strength ลดลงอย่างรวดเร็ว และที่ปริมาณเส้นใย 30 phr. ขึ้นไป ค่า tensile strength ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

1.5.4 Setua, D.K., และ Mathur, G.N. [4] ได้ทำการศึกษาถึงการวิเคราะห์ความร้อนของ คอมโพสิตโพลีคลอโรพรีนอีลาสโตเมอร์เสริมแรงด้วย ซิลิกา (silica), คาร์บอนแบล็ค (carbon black) และเส้นใยไหมขนาดสั้น พบว่าเมื่ออีลาสโตเมอร์เสริมแรงด้วยซิลิกามีค่า tensile strength, tear strength และ elongation at break สูงสุด แต่เมื่อนำอีลาสโตเมอร์เสริมแรงด้วยซิลิกา และเส้นใยไหม พบว่าค่า hardness มีค่าสูงสุด และค่า % elongation at break ต่ำสุด

1.5.5 Ismail, Hanafi., Edyham, M.R., และ Wirjosentono, B. [5] ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณ ใยไผ่ (bamboo fiber) ที่นำมาใช้เสริมแรงในยางธรรมชาติ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารเชื่อมประสาน (bonding agent) พบว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น tensile strength, elongation at break และ tear strength มีค่าลดลง ส่วน modulus และ hardness มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเท่ากันแต่ใส่สารเชื่อม ประสาน พบว่าคุณสมบัติต่าง ๆ มีค่าสูงขึ้น ยกเว้น % elongation at break มีค่าต่ำลง

1.5.6 Jacob, Maya., Thomas, Sabu., และ Varughese, K.T. [6] ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใย sisal และ oil plam ที่ยังไม่ได้ ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใย ซึ่งมีความยาวของเส้นใยแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปริมาณ ของเส้นใย และ การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยที่นำมาใช้ในการเสริมแรง พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมาก ขึ้น ค่า tensile strength และค่า tear strength ลดลง แต่ค่า modulus เพิ่มขึ้น

1.5.7 Herrera, P.J. และ Valasdez-gonzalez, A. [7] ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลของ high density polyethylene (HDPE) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใย henequen แบบต่อเนื่อง พบว่า tensile strength และ tensile modulus ของการจัดเรียงตัวแบบตามยาว (longitudinal) มีค่าสูงกว่าการจัดเรียง ตัวแบบตามขวาง (transverse) ทั้งแบบที่ไม่ได้เติม และเติมซิลเลน (silane treated) แต่เมื่อเติม silane treated พบว่าค่า tensile strength และ tensile modulus สูงกว่าแบบที่ไม่ได้เติม silane treated

1.5.8 Sharif, J., Yunus, W., Zaman, K., Dahlan, M., และ Ahmad, M. [8] ได้ทำการศึกษา ถึงการเตรียมและคุณสมบัติของนาโนคอมโพสิตที่ได้จากยางธรรมชาติ (NR) ที่เสริมแรงด้วยดิน เหนียว (Clay) ซึ่งครอสลิงค์ด้วยรังสี โดยใช้ยางธรรมชาติของ Standard Malaysian Rubber และดิน เหนียว sodium montmorillonite (Na-MMT) ที่ได้รับการปรับประจุที่ผิวด้วย dodecyl ammonium chloride (DDA) และ octadecylamine ammonium chloride (ODA) นาโนคอมโพสิตของ NR ที่ เสริมแรงด้วยดินเหนียว เตรียมโดยการผสมได้เป็น NR/Na-MMT, NR/DDA-MMT และ NR/ODA-

MMT พบว่าปริมาณรังสีที่ทำให้เกิดการครอสลิงค์คือ 250 kGy ค่า gel content และ tensile strength มีค่าสูงสุดในช่วงปริมาณดินเหนียว 3.0-5.0 phr. และยังพบว่า NR/DDA-MMT มีค่า tensile strength สูง ส่วน NR/ODA-MMT มีค่า tensile modulus สูงสุด ค่า tensile strength สูงสุดของ NR/DDA-MMT และ NR/ODA-MMT คือ 12.1 และ 9.5 MPa ตามลำดับ

1.5.9 Kaynak, Cavdet., Orgun, Ozgur., และ Tincer, Teoman. [9] ได้ทำการศึกษาถึงการยึดเกาะของ carbon fiber แบบสั้น ที่ใช้เสริมแรงในอีพอกซี (epoxy) พบว่าปริมาณเส้นใยเพื่อขึ้นคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น เมื่อใช้ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย silane coupling agent และ ปรับปรุง epoxy ด้วย hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลต่างดีขึ้นกว่าใช้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ยกเว้น flexural modulus มีค่าสูงสุดเมื่อใช้ hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) ปรับปรุง epoxy เพียงอย่างเดียว

1.5.10 ปารรณนา คิวสุวรรณ [10] ได้ทำการศึกษาถึงการทำให้แผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีมีความเสถียร โดยเติมสารป้องกันยางเสื่อม โดยได้ทดลองใช้สารป้องกันยางเสื่อมชนิดต่างๆ เติมลงในน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสีจากแหล่งยางภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศไทย โดยใช้ 2-เอทิลเฮกซิลอะครีเลตร่วมกับคาร์บอนเตตราคลอไรด์ (2-EHA:CCl₄) และนอร์มอลบิวทิลอะครีเลตร่วมกับคาร์บอนเตตราคลอไรด์ (n-BA:CCl₄) เป็นสารไวปฏิกิริยา พบว่าค่าความต้านแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณรังสี 13-17 kGy เมื่อใช้ 2-EHA:CCl₄ และปริมาณรังสีประมาณ 12 kGy เมื่อใช้ n-BA:CCl₄ สำหรับการล้างฟิล์มยางด้วย 1 % แอมโมเนียจะทำให้ฟิล์มยางมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดในเวลาที่น้อยกว่าล้างด้วยน้ำกลั่น จากการทดลองพบว่า สารป้องกันยางเสื่อม Valcanox MB และ Valcanox MB2 /Mg ที่ปริมาณ 0.8-1 phr. ทำให้ฟิล์มยางมีค่าความต้านแรงดึงหลังบ่มเร่งดีที่สุดเหมาะสมสำหรับยางทั้ง 2 แหล่ง และสารไวปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด น้ำยางที่ใช้ 2-EHA:CCl₄ จะมีความหนืดมากกว่าน้ำยางที่ใช้ n-BA:CCl₄ ส่วนค่าความเป็นด่างของน้ำยางทั้ง 2 แหล่ง จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อทิ้งน้ำยางไว้ตั้งแต่ 3 สัปดาห์ แต่ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งจะลดลงอย่างมากเมื่อทิ้งน้ำยางไว้ก่อนนำไปทำฟิล์มตั้งแต่ 3 สัปดาห์ เป็นต้นไป

1.5.11 จิตติมา ชาญญาติ [11] ได้ทำการศึกษาถึงการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี โดยการเติมซิลิกาเปรียบเทียบกับฟิล์มยางที่ไม่เติมซิลิกา และการศึกษาถึงปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้ในฟิล์มยางภายหลังการเติมซิลิกา พบว่าการเติมซิลิกาเป็นส่วนผสมในน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีทำให้คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางดีขึ้นพอสมควร ค่าความต้านทานการฉีกขาด (Tear Strength) เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 % เมื่อเติมซิลิกาในปริมาณ 4 phr. ปริมาณโปรตีนจะลดลงมากเหลือเพียง 27 µg/g เมื่อล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 35 °C และ ซิงค์ออกไซด์ ทำให้โปรตีนจำนวนมากไม่สามารถเคลื่อนที่มาที่ผิวของฟิล์มยางได้ ซึ่งจะทำให้ลดอัตราเสี่ยงที่จะเกิดอาการภูมิแพ้สำหรับผู้สวมใส่ที่แพ้โปรตีนยางธรรมชาติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

เพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติโดยทำให้อยู่ในรูปของวัสดุคอมโพสิต ที่สามารถนำไปใช้งาน
ด้านต่างๆ ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

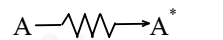
รังสีแกมมา (Gamma ray) เกิดขึ้นจากภายในนิวเคลียส มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุ รังสีแกมมาเรียกอีกแบบหนึ่งว่า โฟตอน (photon)

รังสีแกมมาเป็นรังสีที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการทางรังสี เพื่อให้เกิดประโยชน์ทางอุตสาหกรรม เช่น ทำให้เกิดการ โพลิเมอไรเซชัน (polymerization) การกราฟต์ (grafting) การครอสลิงค์ (crosslinking) และการดีเกรด (degradation)

แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในกระบวนการรังสีในปัจจุบันได้แก่ แหล่งกำเนิดรังสี โคบอลต์-60 (Co-60) และ ซีเซียม-137 (Cs-137) เนื่องจากรังสีแกมมาจาก Co-60 มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแกมมาจาก Cs-137 จึงนิยมใช้ Co-60 ในอุตสาหกรรมมากกว่า Cs-137 โคบอลต์-60 ให้รังสีแกมมา 2 พลังงาน คือ 1.17 และ 1.33 MeV. พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV. มีค่าครึ่งชีวิต (half life) 5.27 ปี

2.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีผ่านวัตถุ [10, 11]

เมื่อรังสีไม่ว่าจะเป็นประเภทใดก็ตามผ่านเข้าไปในวัตถุ จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางนั้นและเป็นผลให้อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางดังกล่าวเกิดการแตกตัว (ionization) เป็นไอออนบวกและไอออนลบหรือถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาพถูกกระตุ้น (excitation) คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานสถานะพื้นฐาน (ground state) ตามสมการดังนี้

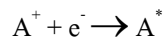


เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นแล้วอะตอมและโมเลกุลดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยามากอาจจะเข้าร่วมตัวกันเองหรือไปทำปฏิกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอะตอมหรือโมเลกุลนั้นดังต่อไปนี้

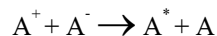
2.1.1 ปฏิกิริยาของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในรูปของไอออนหรืออยู่ในรูปสถานะถูกกระตุ้น

2.1.1.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากไอออน

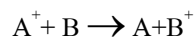
- ปฏิกิริยา Ion Recombination



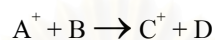
A^* คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น



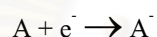
- ปฏิกิริยา Charge Transfer



- ปฏิกิริยา Ion-Molecule

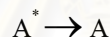


- ปฏิกิริยา Electron Addition

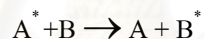


2.1.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลในสถานะกระตุ้น

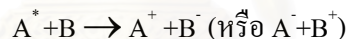
- ปฏิกิริยา Radiative or nonradiative conversion to the ground state no chemical change



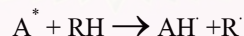
- ปฏิกิริยา Nonradiative Energy Transfer



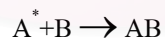
- ปฏิกิริยา Electron Transfer



- ปฏิกิริยา Hydrogen Abstraction



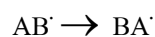
- ปฏิกิริยา Addition



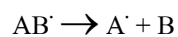
จากปฏิกิริยาของไอออนหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นดังกล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าในบางปฏิกิริยาเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา มาก และมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาด้านเคมีรังสี

2.1.2.3 ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

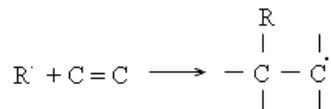
- ปฏิกิริยา Radical Rearrangement



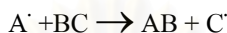
- ปฏิกิริยา Radical Dissociation



- ปฏิกิริยา Addition



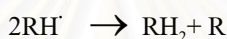
- ปฏิกิริยา Abstraction



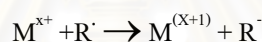
- ปฏิกิริยา Radical Combination



- ปฏิกิริยา Disproportionate



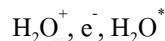
- ปฏิกิริยา Electron Transfer



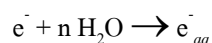
2.2 ผลของรังสีที่มีต่อน้ำ

เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางสำคัญในสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย และน้ำยังเป็นตัวกลางหรือตัวทำละลายในกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางชีวะ ดังนั้น จึงมีการศึกษาเคมีรังสีของน้ำอย่างกว้างขวาง เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในน้ำแล้วเกิดอะไรขึ้น

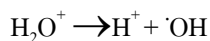
ดังกล่าวข้างต้น เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในน้ำก็จะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรือโมเลกุลอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นซึ่งจะเกิดขึ้นภายในช่วงเวลาประมาณ 10^{-18} ถึง 10^{-13} วินาที ภายหลังที่รังสีผ่าน และสามารถเขียนเป็นรูปสมการดังนี้



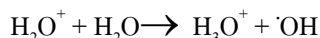
อิเล็กตรอน (e^-) เมื่อเกิดขึ้นมาแล้วก็จะสูญเสียพลังงาน โดยการชนกับอะตอมหรือโมเลกุลรอบๆจนกระทั่งพลังงานถึงระดับที่เรียกว่า thermal energy (0.025 eV) อิเล็กตรอนนั้นก็就会被ล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะเรียกว่าอิเล็กตรอนนี้ว่า Solvated electron ใช้สัญลักษณ์ e^-_{aq} ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นประมาณ 10^{-11} วินาทีหลังจากที่รังสีผ่าน อาจเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้



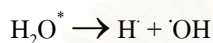
ไอออนบวก (H_2O^+) เมื่อเกิดขึ้นจะไม่อยู่ตัวจะสลายตัวกลายเป็น H^+ และ $\cdot OH$ ภายใน 10^{-13} วินาที หลังจากรังสีผ่านซึ่งอาจเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



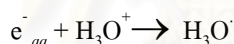
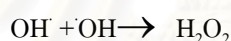
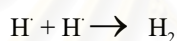
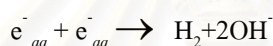
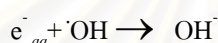
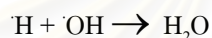
หรือ



โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (H_2O^*) เมื่อเกิดขึ้นจะไม่อยู่ตัวเช่นเดียวกับ H_2O^+ จะสลายให้ H^+ และ $\cdot\text{OH}$ และเกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-13} วินาทีหลังจากรังสีผ่าน และสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



ถ้าพิจารณาถึง e^-_{aq} , H^+ , $\cdot\text{OH}$ และ H_3O^+ จะเกิดขึ้น ณ บริเวณรังสีผ่าน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่สามารถจะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันได้มาก และสามารถจะเขียนสมการแสดงถึงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นประมาณ 10^{-8} วินาที หลังจากรังสีผ่าน ดังนั้นเมื่อรังสีผ่านเข้าไปในน้ำ หลังจาก 10^{-8} วินาที ก็จะเกิดผลิตภัณฑ์หลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งรวมเรียกว่า primary species โดยสามารถเขียนในรูปสมการสรุปได้ดังนี้



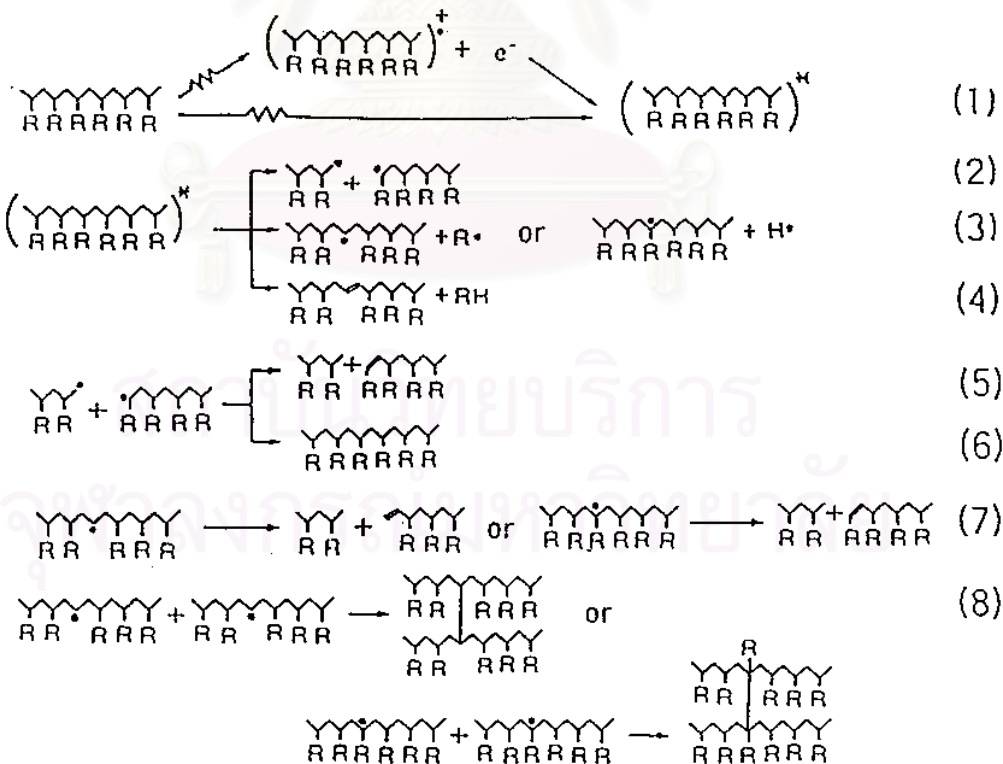
และ primary species เหล่านี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปอีกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่มีน้ำเป็นตัวกลางอยู่

2.3 การเกิดครอสลิงค์ของโพลีเมอร์อันเนื่องมาจากผลของการฉายรังสี

เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสี (irradiation) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญคือ การเกิดครอสลิงค์ และการเสื่อมสลายไปพร้อม ๆ กัน ขึ้นกับว่าโพลีเมอร์ชนิดใดจะเกิดปฏิกิริยาครอสลิงค์และเสื่อมสลายมากกว่ากัน เนื่องจากโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่เกิดการครอสลิงค์นั้นจะมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแบบร่างแหสามมิติ จึงทำให้โมเลกุลของโพลีเมอร์แข็งแรงมากขึ้น เช่น มีความแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงมอดูลัสสูงขึ้น ทนต่อความร้อน เปลวไฟ ตัวทำละลายมากยิ่งขึ้น และมีการขีดที่ทำให้เกิดผลเสียน้อยลงเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอื่น ๆ เกิดขึ้น

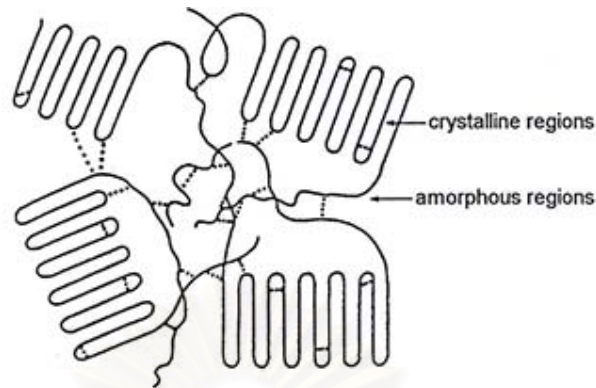
ภายหลังจากการฉายรังสีให้โพลิเมอร์ ได้แก่ การเกิดก๊าซ (gas formation) การเปลี่ยนแปลงพันธะเคมี (change unsaturation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เป็นวง (cyclization) และการรวมตัวกับออกซิเจน (oxidation)

เมื่อโพลิเมอร์ถูกฉายรังสี รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้โมเลกุลนั้นอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excitation) โมเลกุลจะมีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานสภาวะพื้น (ground state) จากรังสีโดยตรงและจากการรวมตัวของอนุภาคลิสงหรือไอออนบวกกับไอออนลบหรืออิเล็กตรอนที่เกิดการแตกตัว (ionizing) (สมการที่ 1) โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะแตกตัว (dissociate) ทำให้สายโซ่ขาด เกิดเป็นอนุภาคลิสงของโพลิเมอร์สองสายที่มีโมเลกุลเล็กลง (สมการที่ 2) หรือแยกเป็นอนุภาคลิสงอัลคิล (alkyl radical) หรืออนุภาคลิสงไฮโดรเจน (hydrogen radical) (สมการที่ 3) โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นสูงอาจจะแตกตัวเป็นหมู่ RH และเกิดพันธะคู่ในสายโซ่ (สมการที่ 4) อนุภาคลิสงของโพลิเมอร์สองสายในสมการที่ 2 พยายามที่จะกลับเข้าสู่สภาวะพื้น แต่การกลับสู่สภาวะพื้นยังไม่ได้สัดส่วน (disproportion) ทำให้เกิดเป็นโพลิเมอร์โมเลกุลเล็กสองสาย (สมการที่ 5) หรือรวมตัวกลายเป็นโพลิเมอร์โมเลกุลเดิม (สมการที่ 6) โมเลกุลของโพลิเมอร์ในสมการที่ 3 เกิดการขาดที่สายโซ่หลักและสร้างพันธะคู่ (สมการที่ 7) โมเลกุลของโพลิเมอร์ในสมการที่ 3 จะเกิดการเชื่อมโยงกันเป็น โมเลกุลใหม่ หรือเรียกว่าเกิดการครอสลิงค์ (สมการที่ 8)



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดครอสลิงค์เมื่อฉายรังสีโพลิเมอร์

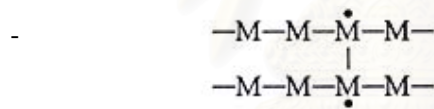
2.4 ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุล [12]



รูปที่ 2.2 การเชื่อมโยงโมเลกุล(---)ของโพลีเอทีลีน[13]

ทฤษฎีของการเชื่อมโยงโมเลกุลเสนอโดย ชาร์ลสบี (Charlesby) โดยตั้งสมมติฐานของการเชื่อมโยงโมเลกุลดังนี้

- การเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นการเชื่อมโยงแบบ “tetrafunctional”



- การเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดแบบสุ่มตามโครงสร้าง
- ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking density, q) คือ สัดส่วนของจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่เกิดการเชื่อมโยง

$$q = q_0 \times D \quad (2.1)$$

โดย q_0 คือ สัดส่วนของจำนวนโมโนเมอร์ทั้งหมดที่เกิดการเชื่อมโยงต่อปริมาณรังสี

D คือ ปริมาณรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก

q_0 สามารถแสดงในรูปของจำนวนการเชื่อมโยงต่อ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ (G(crosslinked units)) ถ้า n คือจำนวนโมโนเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงหลังจากได้รับปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ และ n_0 คือจำนวนโพลีเมอร์ 1 กรัม ดังนั้นจะได้

$$q_0 = \frac{n}{n_0} \quad (2.2)$$

$$n = G (\text{crosslink unit}) \times 6.24 \times 10^{16} \quad (2.3)$$

เมื่อปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ เท่ากับการดูดซับพลังงาน 6.24×10^{16} อิเล็กตรอน
โวลต์ต่อกรัม และ

$$n_0 = \frac{6.02 \times 10^{23}}{M_0} \quad (2.4)$$

โดย M_0 คือ น้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์จากสมการ(2.2)ถึง(2.4)จะได้

$$q_0 = \frac{M_0 \times G(\text{crosslinked unit})}{0.96 \times 10^7} \quad (2.5)$$

ให้

$$\delta = q \times X_w \quad (2.6)$$

โดย δ คือ จำนวนของหน่วยที่เกิดการเชื่อมโยงต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (crosslinking coefficient)
เมื่อ δ มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้ค่า M_w มีค่าไม่จำกัด ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิด โครงสร้างเจล โดยปริมาณ
รังสีที่จุดนี้เรียกว่า “the gelling dose (D_{gel})”

จากสมการ (2.1) และ (2.6) จะได้

$$\delta = q_0 \times X_w \times D$$

จากนิยามของ D_{gel} จะได้

$$1 = q_0 \times X_w \times D_{gel} \text{ และ } D_{gel} = \frac{1}{q_0 \times X_w} \quad (2.7)$$

จากสมการ(2. 5) และ(2.7) จะได้

$$G (\text{crosslinked units}) = \frac{0.96 \times 10^7}{D_{gel} \times M_w} \quad (2.8)$$

เมื่อหนึ่งการเชื่อมโยง เกิดจากหน่วยที่เกิดการเชื่อมโยง 2หน่วยและ $G(x)$ คือค่าของการ
เชื่อมโยงโมเลกุล (G value for crosslinking) จะได้

$$G(x) = \frac{0.48 \times 10^7}{D_{gel} \times M_w} \quad (2.9)$$

2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composite Material)

คือวัสดุซึ่งเกิดจากการนำวัสดุโพลิเมอร์มาใช้ร่วมกับวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์หรือไม่เป็นโพลิเมอร์ก็ได้ วัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นวัสดุคอมโพสิตนั้นต้องประกอบด้วยวัสดุอย่างน้อย 2 ชนิด (หรือมากกว่า 2 ชนิด) ซึ่งในการรวมกันของวัสดุหมายถึง การรวมกันทางกายภาพแล้วทำให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้นั้นมีคุณสมบัติหรือคุณภาพที่ดีขึ้น วัสดุคอมโพสิตประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือ วัสดุหลัก (Matrix Material) และ วัสดุเสริมแรง (Reinforcing Material)

2.5.1. วัสดุหลัก (Matrix Material)

วัสดุหลัก แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ:-

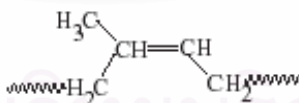
2.5.1.1 โพลิเมอร์หรือพลาสติกเรซิน (Polymer or Plastic resin) เช่น เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics), เทอร์โมเซต (Thermosets), ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

2.5.1.2 เซรามิก (Ceramic Matrices) เช่น ออกไซด์ (Oxides), ไนไตรด์ (Nitrides) c และแก้วเซรามิก (Glass ceramic)

2.5.1.3 โลหะ (Metal matrices) เช่น อลูมิเนียม (Aluminium), ไททาเนียม (Titanium), และทองแดง (Copper)

2.5.2 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม มีสูตรเคมีคือ C_5H_8 มีชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (isoprene) เมื่อมีการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุลจะมีการต่อเชื่อมกันแบบ head to tail โครงสร้างโมเลกุลอย่างเป็นแบบ cis-configuration เรียกว่า cis-polyisoprene



รูปที่ 2.3 แสดงสูตร โครงสร้างของยาง (cis 1, 4 polyisoprene) [14]

2.5.3 ชนิดของยางธรรมชาติ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันยางธรรมชาติ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง มีจำหน่ายหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ 1. ยางแห้ง (Dry Rubber) และ 2. น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

2.5.3.1 ยางแห้ง

ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งอาจแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิตคือ:-

2.5.3.1 ยางแบบธรรมดา ผลิตโดยวิธีทั่วไป (Conventional Process) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ

2.5.3.2 ยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ผลิตโดยมีเงื่อนไขการระบุคุณภาพมาตรฐานตามสากล (technically specified process) ได้แก่ ยางแท่ง (Block Rubber)

2.5.3.3 ยางแบบอื่น ๆ มีการผลิตเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ

2.5.3.2 น้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ผลิตจำหน่ายทั่วไป อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือน้ำยางข้นธรรมดาที่ไม่ได้ผ่านการทรีต (Treat) กับสารเคมีหรือวิธีการใด ๆ ให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลงไป ส่วนอีกประเภทหนึ่ง เป็นน้ำยางที่ได้ผ่านกระบวนการทรีตด้วยเคมี หรือด้วยการฉายรังสีให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลง ประเภทหลังนี้เรียกว่า “น้ำยาง พรีวัลคาไนซ์” (Prevulcanized or Vulcanized)

2.5.4 การผลิตน้ำยางข้น [15]

การผลิตน้ำยางข้นที่มีความเข้มข้น 60 % คือการทำให้น้ำยางนั้นมีส่วนประกอบของน้ำ 40 % และเนื้อยางแห้ง 60 % ซึ่งเป็นน้ำยางข้นที่เหมาะสมที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ การผลิตน้ำยางข้นเป็นการคงสภาพน้ำยางที่ได้จากสวนให้อยู่ในสภาพของเหลว โดยปกติแล้วน้ำยางที่ได้จากสวนทั่วไปจะมีความเข้มข้นของเนื้อยางแห้ง (dry rubber content) ประมาณ 25-45 % หลังจากนั้นจึงนำน้ำยางที่ได้จากสวนมาทำการแยกส่วนที่เป็นน้ำออกโดยวิธีการผลิตต่าง ๆ จนทำให้ได้เนื้อยางแห้งที่มีปริมาณมากขึ้นถึง 60 %

วิธีการผลิตน้ำยางข้นมี 4 วิธีคือ วิธีทำให้เกิดครีม (creamed concentrate) วิธีใช้เครื่องปั่น (centrifuged concentrate) วิธีการระเหยของน้ำ (evaporated concentrate) และวิธีแยกด้วยไฟฟ้า (electrode cantation) ในการผลิตน้ำยางข้นทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมา วิธีที่นิยมทำกันมากที่สุดได้แก่วิธีใช้เครื่องปั่น เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้น้ำยางสะอาดมากขึ้น ทำได้เร็ว สะดวกต่อผู้ปฏิบัติงาน และง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ

2.5.5 วิธีการผลิตน้ำยางข้นแบบใช้เครื่องปั่น [16, 17]

การผลิตน้ำยางข้นต้องใช้น้ำยางที่ได้จากสวนซึ่งผ่านการรักษาสภาพน้ำยางด้วยสารเคมี เพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน สารเคมีที่นิยมใช้คือแอมโมเนีย อาจจะใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวในการรักษาสภาพน้ำยาง หรือใช้แอมโมเนียร่วมกับสารช่วยอื่น ๆ อย่างเช่น tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) กับ zinc oxide (ZnO) จากนั้นจึงนำน้ำยางที่ผ่านการรักษาสภาพน้ำยาง

มาเข้าเครื่องปั่นที่เรียกว่า Latex seperator น้ำยางที่ผ่านเข้าไปในเครื่องนี้จะถูกเหวี่ยงด้วยจานหมุนด้วยความเร็ว 2,000-3,000 รอบต่อนาที อนุภาคยางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจะถูกเหวี่ยงขึ้นข้างบนและไหลออกทางช่องออกในส่วนบนของเครื่อง ส่วนน้ำจะถูกแยกออกไปช่องด้านล่างอีกช่องหนึ่ง โดยวิธีนี้น้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นน้ำยางข้นที่มีความเข้มข้น 60 % ตามที่ต้องการ อีกส่วนหนึ่งคือน้ำที่มียางแห้งปนอยู่ประมาณ 3-5 % ที่เรียกว่าหางน้ำยาง (skim latex)

2.5.6 การเก็บรักษาน้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ผลิตได้นั้นจะต้องเติมหรือปรับแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง โดยทั่วไประบบรักษาน้ำยางข้นมี 2 ระบบ คือ

2.5.6.1 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 % (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) เรียกว่าน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (High Ammonia)

2.5.6.2 รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียน้อย ประมาณ 0.2 % (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) ร่วมกับมีสารช่วยบางชนิดเช่น TMTD/ZnO เรียกว่าน้ำยางชนิดนี้ว่า LATZ (Low Ammonia Tetramethyl thiuram disulphide Zinc oxide)

2.5.7 วัสดุเสริมแรง (Reinforcing Material)

วัสดุเสริมแรง (reinforcing material) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ:-

2.5.7.1 เสริมแรงด้วยเส้นใย (reinforcing fiber) ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ, เส้นใยแร่ (mineral fiber) และเส้นใยสังเคราะห์

2.5.7.2 เสริมแรงด้วยสารเติมที่ไม่ใช่เส้นใยและสารเติมแต่ง (nonfibrous fillers and additive) ได้แก่ เม็ดแก้ว (glass sphere), อีลาสโตเมอร์ และสารหล่อลื่น (lubricant)

2.5.8 เส้นใยคาร์บอน

เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่มนุษย์ผลิตขึ้น จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นใยสังเคราะห์อนินทรีย์ (synthetic inorganic fiber) ได้แก่ เส้นใยโลหะ (metal fiber), เส้นใยเซรามิก (ceramic fiber) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีการขยายตัวตามความร้อนต่ำ (low CTE) ทนต่อสารเคมี (chemical resistance) เมื่อนำเส้นใยคาร์บอนมาเปรียบเทียบกับเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นเส้นใยในกลุ่มเดียวกัน พบว่าเส้นใยคาร์บอนมีข้อดีกว่าเส้นใยแก้วคือ เส้นใยคาร์บอนมีค่าความหนาแน่นต่ำ, มีค่าความแข็งแรงและค่ามอดูลัสสูง, นำไฟฟ้าได้ดี และนำความร้อนได้ดีมาก (excellent thermal conductivity) จึงนิยมนำมาใช้ในการเสริมแรงในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องบินและรถยนต์ แต่เส้นใยคาร์บอนมีข้อเสียคือ เส้นใยคาร์บอนมีราคาแพงกว่า

เส้นใยแก้วมาก เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยาก เส้นใยคาร์บอนผลิตได้จากแหล่งกำเนิด 3 ชนิด คือ 1. เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่เส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยเรยอน (cellulose or rayon fiber) 2. เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ polyacrylonitrile (PAN) fiber และ 3. ของเหลือที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Petroleum and Coal-Tar Pitches) แหล่งกำเนิดที่นิยมนำมาผลิตเส้นใยคาร์บอนมากที่สุด คือ เส้นใยสังเคราะห์พวก polyacrylonitrile (PAN) fiber

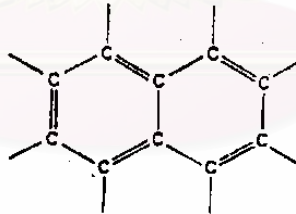
2.5.9 การผลิตเส้นใยคาร์บอนจาก polyacrylonitrile (PAN) fiber

ในการผลิตเส้นใยคาร์บอนนั้นมี 3 ขั้นตอนคือ

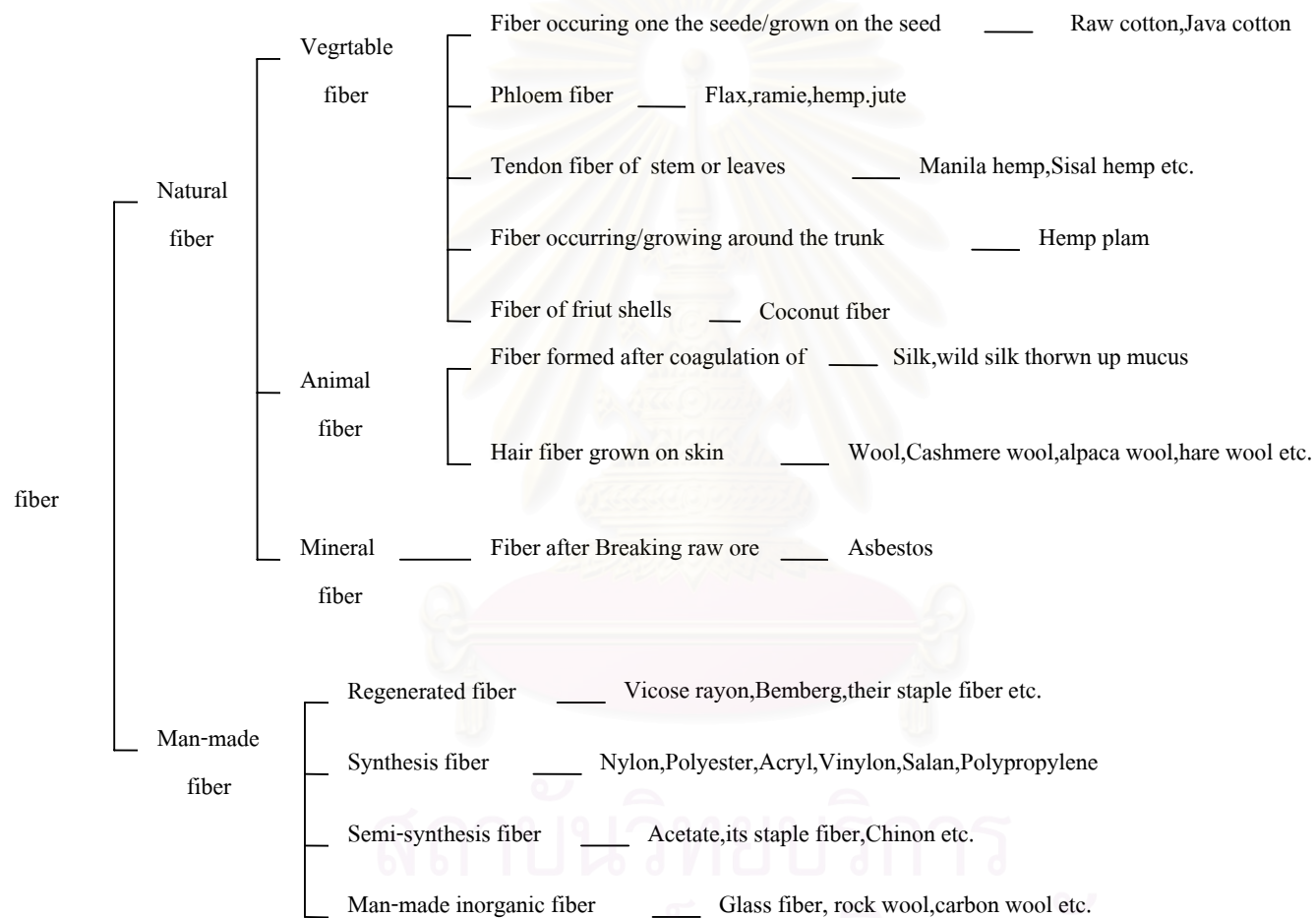
2.5.9.1 การทำให้มีความคงตัว (Stabilization) เป็นขั้นตอนที่นำเส้นใย PAN มายืดออก (Stretching) 500-1300% แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส ทำให้โมเลกุลของ PAN เกิดการจัดเรียงตัวใหม่มีลักษณะเป็นโพลิเมอร์แบบชั้นบันได หลังจากนั้นจะมีการเติมออกซิเจนเข้าไปทำให้เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ที่เรียกว่า oxyPAN

2.5.9.2 การทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization) เป็นขั้นตอนการใช้ความร้อนเผา (pyrolyze) oxyPAN ในก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรือ อาร์กอน (Ar) ที่อุณหภูมิ 1000-1500 องศาเซลเซียส จะได้เส้นใยคาร์บอนที่มีค่ามอดูลัสสูงและมีความแข็งแรงสูง

2.5.9.3 การทำให้เกิดกราฟไฟต์ (Graphitization) เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนกับเส้นใยคาร์บอนในก๊าซอาร์กอน (Ar) ที่อุณหภูมิ 1800-2800 องศาเซลเซียส จะได้เส้นใยกราฟไฟต์ที่มีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 2.4 แสดงสูตร โครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) [18]



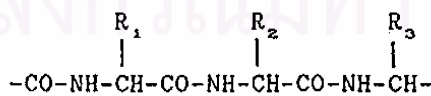
รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งแยกเส้นใย [19]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน [20]

Property	Low modulus	Intermediate modulus	Ultra-high modulus
Specific gravity	1.8	1.9	2.2
Young modulus, GPa (Msi)	230(34)	370(53)	900(130)
Tensile strength, MPa (Msi)	3450(500)	2480(360)	3800(550)
Elongation, %	1.1	0.5	0.4
Coefficient of thermal Expansion, $\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ($\mu\text{in.}/\text{in}/^{\circ}\text{F}$)	-0.4(-0.2)	-0.5(-0.3)	-0.5(-0.3)

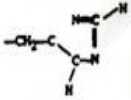
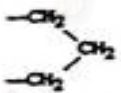
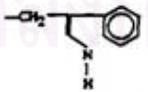
2.5.10 เส้นใยไหม [21]

เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เป็นเส้นใยที่ได้จากสัตว์ซึ่งเกิดจากการที่หนอนไหมคายใยออกมา ใยที่คายออกมานั้นมีลักษณะเป็นเส้นคู่ (bave) ที่เรียกว่าไฟโบรอิน (fibroin) ยาวต่อเนื่องกันและมีกาวไหมที่เรียกว่าเซรีซิน (sericin) เคลือบไฟโบรอินไว้ เส้นใยไหมประกอบด้วยไฟโบรอิน 70-75 % และกาวไหมเซรีซิน 25-30 % เส้นใยไหมมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้สูงได้แก่ กลุ่มเคมีจำพวกไฮดรอกซิล (hydroxyl group), กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) และกลุ่มอะมิโน (amino group) ไฟโบรอินเป็นโปรตีนที่มีแต่เพปไทด์ (peptide) มาต่อกันเป็นโพลีเพปไทด์ (polypeptide) ที่เกิดมาจากปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation) ของ α -amino acids ไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญ 4 ชนิดคือ Glycine, Alanine, Serine และ Tyrosine ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของเส้นใยไหม (silk fiber) [22]

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงโครงสร้างทางเคมีของกรดอะมิโนและเส้นใยไหม [23]

Type	Side group	Amino acid	Mass Percent Amino Acid	
			Silk Fibroin	Wool Keratin
Inert	-H	Glycine	43.8	6.5
	-CH ₃	Alanine	26.4	4.1
	-CH(CH ₃) ₂	Valine	3.2	5.5
	-CH ₂ CH(CH ₃) ₂	Leucine	0.8	9.7
	-CH(CH ₃)CH ₂ CH ₃	Isoleucine	1.37	-
	-CH ₂ C ₆ H ₅	Phenylalanine	1.5	1.6
Acidic	-CH ₂ COOH	Aspartic acid	3.0	7.27
	-CH ₂ CH ₂ COOH	Glutamic acid	2.03	16.0
Basic	-(CH ₂) ₄ NH ₂	Lysine	0.88	2.5
	-(CH ₂) ₃ NHC(NH)NH ₂	Arginine	1.05	8.6
Hydroxyl		Histidine	0.47	0.7
	-CH ₂ OH	Serine	12.6	9.5
	-CH(OH)CH ₃	Threonine	1.5	6.6
	-CH ₂ C ₆ H ₄ OH	Tyrosine	10.6	6.1
Ring		Proline	1.5	7.2
Double	-CH ₂ -S-S-CH ₂ -	Cysteine	-	11.8
Other	-CH ₂ CH ₂ -S-CH ₃	Methionine	-	0.35
		Tryptophane	-	0.7

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของเส้นใยไหมและเส้นใยอื่น ๆ [24]

Material	UTS (MPa.)	Modulus (GPa.)	% Strain at break
<i>B.mori</i> silk (w/ sericin) ^a	500	5-12	19
<i>B.mori</i> silk (w/o sericin) ^b	610-690	15-17	4-16
<i>B.mori</i> silk ^c	740	10	20
Sider silk ^d	875-972	11-13	17-18
Collagen ^e	0.9-7.4	0.0018-0.046	24-68
Collagen X-linked ^f	47-72	0.4-0.8	12-16
PLA ^g	28-50	1.2-3.0	2-6
Tendon (comprised of mainly collagen)	150	1.5	12
Bone	160	20	3
Kevlar (49 fiber)	3600	130	2.7
Synthesis Rubber	50	0.001	850

2.5.11 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิต [25]

วัสดุคอมโพสิตสามารถแบ่งประเภทจากวัสดุที่ใช้เสริมแรงได้เป็น 2 ประเภทคือ การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาค (particle reinforced composite) และอีกประเภทหนึ่งคือ การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใย (fiber reinforced composite) ซึ่งในวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนั้นยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.5.11.1 วัสดุคอมโพสิตแบบชั้นเดียว (single-layer composite) ซึ่งในการเสริมแรงแบบนี้ยังแบ่งเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- การใช้เส้นใยที่มีความต่อเนื่องในการเสริมแรง (continuous fiber reinforced composite) ได้แก่ การเสริมแรงแบบทิศทางเดียว (unidirectional reinforced) และ การเสริมแรงแบบสองทิศทาง (bidirectional reinforced or woven reinforced)
- การใช้เส้นใยที่ไม่ต่อเนื่องในการเสริมแรง (discontinuous fiber reinforced composite) ได้แก่ ทิศทางการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (random orientation) และ ทิศทางการจัดเรียงตัวแบบกำหนดทิศทาง (preferred orientation)

2.5.11.2 วัสดุคอมโพสิตแบบหลายชั้น (multilayer composite) ได้แก่ แบบเป็นแผ่นๆ (laminates) และแบบไฮบริด (hybrids)

2.5.12 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตคือ สัดส่วนและคุณสมบัติของวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรง การยึดกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุที่นำมาประกอบ ขนาดของผลึกของวัสดุหลักก็เป็นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนั้นมีหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแบบต่าง ๆ เช่น การจัดเรียงตัวแบบสุ่ม, การจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว และการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทาง นอกจากเรื่องทิศทางของการจัดเรียงตัวของเส้นใยแล้ว ขนาด, ปริมาณ และความยาวของเส้นใย ก็เป็นสิ่งที่มีความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

2.5.12.1 ความยาวของเส้นใย (length of fiber; l)

เส้นใยที่ใช้เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตมีทั้งเส้นใยสั้น (short fiber หรือ discontinuous fiber) และเส้นใยยาว (long fiber หรือ continuous fiber) เส้นใยที่นำมาใช้ควรมีความยาวมาก เส้นผ่าศูนย์กลางน้อย จะทำให้ aspect ratio มีค่ามากซึ่งสามารถคำนวณค่า aspect ratio ได้ดังสมการ (2.) โดยที่ l = fiber length และ d = diameter of fiber

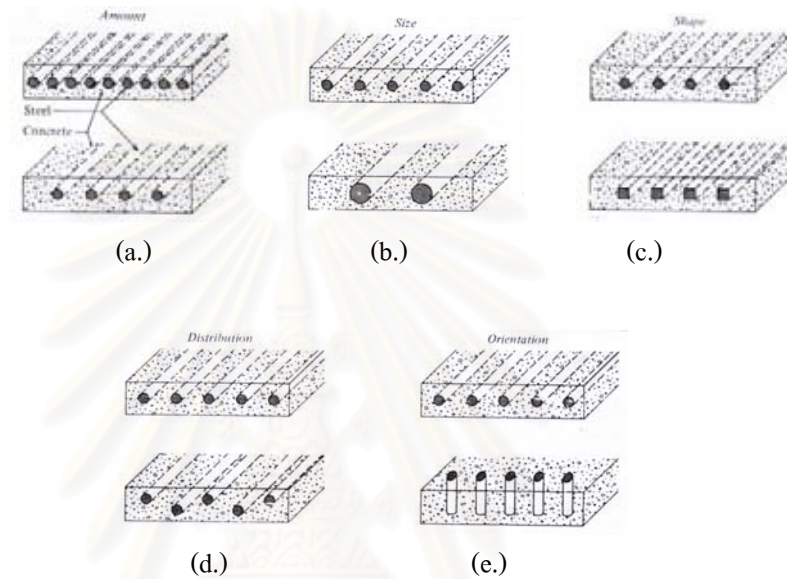
$$\text{Aspect ratio} = l / d \quad (2.10)$$

นอกจากค่า aspect ratio แล้วยังต้องคำนึงถึงค่า critical fiber length (L_c) ความยาวเส้นใยมากกว่า L_c 15 เท่า ($l > 15L_c$) จัดเป็น continuous fiber ความยาวเส้นใยน้อยกว่านี้ ($l < 15L_c$) จัดเป็น discontinuous fiber แต่ถ้าความยาวเส้นใยน้อยกว่า L_c ($l < L_c$) จัดเป็นอนุภาค (particle) สามารถคำนวณค่า critical fiber length (L_c) ได้ดังสมการ(2.11) [27] โดยที่ σ_f = tensile strength of the fiber, d = diameter of fiber และ τ_c = shear strength of the bond between the matrix and the fiber

$$L_c = (\sigma_f d / \tau_c) \quad (2.11)$$

2.5.12.2 ปริมาณของเส้นใย (load of fiber)

วัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงนั้น ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงต่อวัสดุคอมโพสิต เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้น

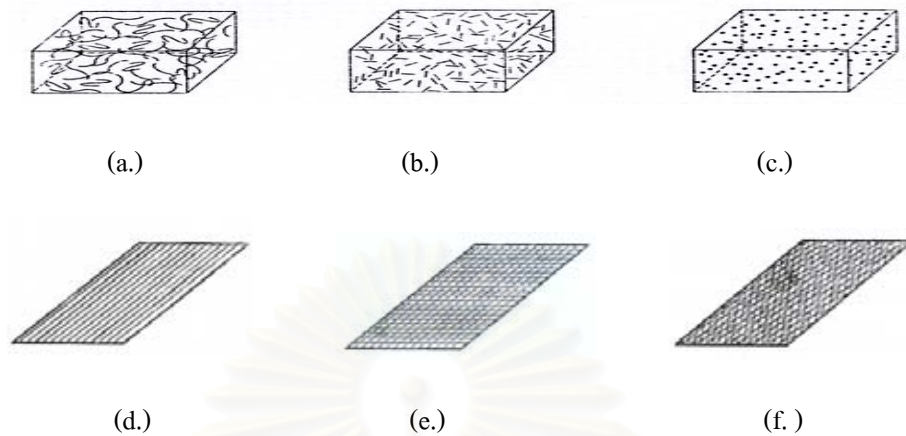


รูปที่ 2.7 แสดงรูปร่าง ขนาด ปริมาณ การกระจายตัวและการจัดวางตัวของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรง (a) : แสดงปริมาณของเส้นใย, (b) : แสดงขนาดของเส้นใย, (c) : แสดงรูปร่างของเส้นใย, (d) : แสดงการกระจายตัวของเส้นใย และ (e) : แสดงการจัดวางของเส้นใยรูปแบบต่าง ๆ [26]

2.5.12.3 การจัดเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation)

ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใย ปริมาณของเส้นใยเท่านั้น การจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆ ก็มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตด้วยเช่นกัน

เส้นใยสั้นนิยมนำมาทำวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ส่วนการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง ทั้งแบบทิศทางเดียว สองทิศทาง และหลายทิศทาง นิยมนำเส้นใยยาวมาใช้ในการเสริมแรง



รูปที่ 2.8 แสดงทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในทิศทางต่างๆ (a), (b) และ (c): เป็นการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม(random) ของเส้นใยขนาดยาว(long fiber),เส้นใยขนาดสั้น (short fiber) และอนุภาค (particle) ตามลำดับ [27] (d), (e) และ (f): เป็นการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว (unidirectional),สองทิศทาง(bidirectional or woven)และแบบหลายทิศทาง (multidirectional) ตามลำดับ [20]

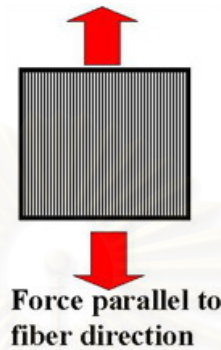
เมื่อนำเส้นใยสั้นมาใช้ในการเสริมแรง ค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่มีความยาวเส้นใยมากกว่า L_c ($l > L_c$) และความยาวเส้นใยน้อยกว่า L_c ($l < L_c$) ค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าต่างกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับโดยที่ S = tensile strength, E = modulus of elasticity, V =Volume Fraction, m = matrix, f = fiber, l = length of fiber และ c = composite

$$S_c = (l \tau_c / d) V_f + S_m (1 - V_f) \quad (2.12)$$

$$S_c = S_f V_f \{1 - (L_c / 2l)\} + S_m (1 - V_f) \quad (2.13)$$

เมื่อนำเส้นใยยาวมาใช้ในการเสริมแรง ค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง ค่าความต้านทานการดึงขนาดและค่ามอดูลัสมีค่าต่างกันตามทิศทางการดึง เมื่อดึงวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยตามยาว (longitudinal loading) คือดึงขนานกับทิศทางของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถคำนวณ ค่าความ

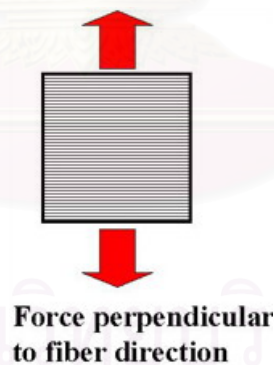
ด้านทานการดึงขนาดและค่ามอดูลัสได้จากสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ และเมื่อดึงวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยตามขวาง (transverse loading) ก็คือดึงตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อ $S_c = S_m = S_f$ สามารถคำนวณค่ามอดูลัสได้จากสมการ (2.16)



รูปที่ 2.9 แสดงแรงดึงขนานกับทิศทางของเส้นใย [28]

$$S_c = S_m V_m + S_f V_f \quad (2.14)$$

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.10 แสดงแรงดึงตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย [28]

$$\text{เมื่อ } S_c = S_m = S_f$$

$$E_c = \left\{ E_m V_f / (V_m E_f + V_f E_m) \right\} \quad (2.16)$$

บทที่ 3

การวิจัย

3.1 การหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัดคาบในชั้นน้ำยางธรรมชาติ

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- น้ำยางชั้น DRC 60% จาก THAI RUBBER CORPORATION (THAILAND)

โดยมีคุณสมบัติตามภาคผนวก ก

- สารไวปฏิกิริยา normal Butyl acrylate (n-BA) AR-grade
- สารรักษาความเสถียรของน้ำยาง (stabilizer) คือ Potassium hydroxide (KOH)

AR- grade

- สารเคมีอื่นๆ เช่น Ammonium hydroxide (NH₄OH) AR- Grade และ Toluene

AR-grade

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 รุ่น BSV-06 ของบริษัท Institute of isotope Co.,Ltd. Hungary

- เครื่องทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาด Universal testing machine รุ่น LLOYD LR 5K LLOYD INSTRUMENTS จากศูนย์เทคโนโลยี และวัสดุแห่งชาติ

- เครื่องตัดแผ่นฟิล์มยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter)

- Magnetic Stirrer และ Magnetic Bar

- ขวดแก้วขนาด 80 มิลลิลิตร

- แผ่นแก้วมีขอบขนาด 15 × 15 เซนติเมตร

- บีกเกอร์ขนาดต่างๆ

- ตะแกรงขนาด 100 เมช

- เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง

- เดซิเคเตอร์ (Desiccators)

- ตู้อบ ยี่ห้อ Heraeus

- ไมโครมิเตอร์ (micrometer) สำหรับวัดความหนา

- เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle)

- ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 2000 มิลลิลิตร

- ท่อคอนเดนเซอร์ (Reflux condenser)

- ตัวจับยึดอุปกรณ์สำหรับ Reflux
- กล้องตะแกรงขนาด 100 เมช ขนาด 1.5×1.5×1.5 ลบ.ซม
- ถาดอะลูมิเนียม
- สายยาง
- กรรไกร
- ถุงซิป

3.1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1.3.1 ทดลองหาปริมาณรังสีที่เหมาะสม สำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติโดยเตรียมน้ำยางตามสูตรในตารางที่ 3.1 ตามขั้นตอนในข้อ 3.1.3.2

ตารางที่ 3.1 สูตรที่ใช้ผลิต RVNRLZ [11]

ส่วนผสม	ความเข้มข้น (phr.)
น้ำยางชั้น 50%	100
10% KOH	0.2
n-BA	5

3.1.3.2 การเตรียมน้ำยางก่อนฉายรังสี

- กรองน้ำยางชั้น 60 % ด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช ลงในบีกเกอร์ วางบีกเกอร์บน magnetic stirrer ใส่ magnetic bar กวนน้ำยางตลอดเวลา
- เติมสารละลาย 1 % NH_3 เพื่อเจือจาง น้ำยางชั้น 60 % เป็น 50 % DRC กวนน้ำยางประมาณ 15 นาที
- เติมสารละลาย 10 % KOH กวนน้ำยางประมาณ 15 นาที
- ค่อยๆ เติมสารไวปฏิกิริยา (n-BA) ลงทีละน้อยและกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง

3.1.3.3 การฉายรังสีน้ำยาง

- บรรจุน้ำยางที่เตรียมเสร็จแล้วลงในขวดพลาสติกขนาด 80 มิลลิลิตร จำนวน 15 ขวด นำ 1 ขวดเก็บไว้เป็น control อีก 14 ขวด นำไปฉายรังสีปริมาณ 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 และ 30 kGy
- คำนวณเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีน้ำยางตามภาคผนวก ข เพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามที่กำหนดไว้ โดยวางขวดที่ตำแหน่ง A, B, C, D, E และ F ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปตำแหน่งที่ใช้วางขวดใน Rack ที่ใช้ฉายรังสี



รูปที่ 3.2 รูปตำแหน่ง Rack วางในเครื่องฉายรังสี

3.1.3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางทดสอบ

- แบ่งน้ำยางจากขวดที่เก็บเป็น control และขวดที่ฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างๆ มาอย่างละ 25 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแก้วให้เข้ากันแล้วเทผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ลงบนกระดาษที่มีขนาด 15×15 เซนติเมตรที่ปรับระดับไว้แล้ว ทิ้งแผ่นฟิล์มไว้ให้แห้งจนใส นำแผ่นฟิล์มไปล้างด้วยน้ำสะอาดโดยแช่แผ่นฟิล์มไว้ได้ระดับผิวน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มยางที่ล้างด้วยน้ำแล้วไปตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทาด้วยแป้งฝุ่น ใสในถุงพลาสติกแล้วเก็บไว้ใน desiccator ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

3.1.3.5 การทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของฟิล์มยาง

ในการทดสอบความต้านทานการดึงขนาด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412-98a [29] โดยเครื่อง Universal testing machine ใช้ Load cell 500 นิวตัน ตามรูปที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ตัดฟิล์มยางทำเป็นชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ วัดความหนาของชิ้นงาน 3 จุดโดยใช้ไมโครมิเตอร์ แล้วบันทึกค่ากลางไว้
- นำชิ้นงานมายึดจับด้วยหัวจับ (grip) และดึงชิ้นงานทดสอบด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตร/ นาที จนชิ้นงานทดสอบขาด ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบ และเครื่องคอมพิวเตอร์จะคำนวณค่า Tensile strength, % Elongation at Break และ Modulus of elasticity 100 %
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile strength กับปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่น้ำยางได้รับ เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงขนาดสูงสุด
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Elongation at Break กับปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่น้ำยางได้รับ
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of elasticity 100 % กับปริมาณรังสีต่าง ๆ ที่น้ำยางได้รับ



รูปที่ 3.3 รูปเครื่องทดสอบความต้านทานการดึงขนาด Universal Testing Machine รุ่น LR 5K จากบริษัท LLOYD INSTRUMENTS

3.1.3.6 การทดสอบหาค่าความเป็นเจล

- ชั่งน้ำหนักกล่องตะแกรงที่คิดผลตกและบันทึกค่าที่ได้
- ตัดฟิล์มยางที่ฉายรังสีจากข้อ 3.1.3.3 เป็นชิ้นเล็ก นำไปชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 0.3 กรัม และบันทึกค่าที่ได้ไว้ นำไปใส่ในกล่องตะแกรง

- นำกล่องตะแกรงใส่ลงในขวดก้นกลม ใส่สารละลาย Toluene ลงในขวดก้นกลมให้ท่วมกล่องตะแกรง ทำการ Reflux 16 ชั่วโมง นำกล่องตะแกรงออกจากขวดก้นกลม และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้น แล้วจึงนำกล่องตะแกรงไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าที่ได้ไว้

- นำน้ำหนักฟิล์มยางก่อน Reflux และหลัง Reflux มาคำนวณหาค่าความเป็นเจล

$$\% \text{ Gel Content} = (W_2 / W_1) \times 100$$

โดยที่ W_1 = น้ำหนักฟิล์มยางก่อน Reflux (g)

W_2 = น้ำหนักฟิล์มยางหลัง Reflux (g)



รูปที่ 3.4 รูปเครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.5 รูปตู้อบยี่ห้อ Heraeus ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

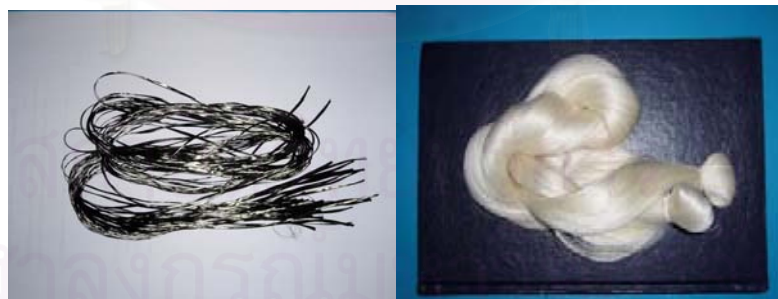


รูปที่ 3.6 รูปการทำ Reflux เพื่อหาค่าความเป็นเจล

3.2 หาปริมาณเส้นใย (load of fiber) ความยาวเส้นใย (length of fiber) และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงในน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- น้ำยางที่ผ่านการ วัลคาไนซ์ด้วยรังสีที่ปริมาณรังสี 16 kGy
- เส้นใยคาร์บอน ACELIN TZ -307 จากห้างหุ้นส่วนจำกัด พีวเจอร์ไฟเบอร์
- เส้นใยไหม พันธุ์ลูกผสมจากจังหวัดบุรีรัมย์



รูปที่ 3.7 รูปเส้นใยคาร์บอน (ด้านซ้าย) และเส้นใยไหม (ด้านขวา)

- Gamma dosimeter ชนิด Red 4034 perspex ผลิตจากประเทศอังกฤษ
- เครื่องทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดแบบ manual

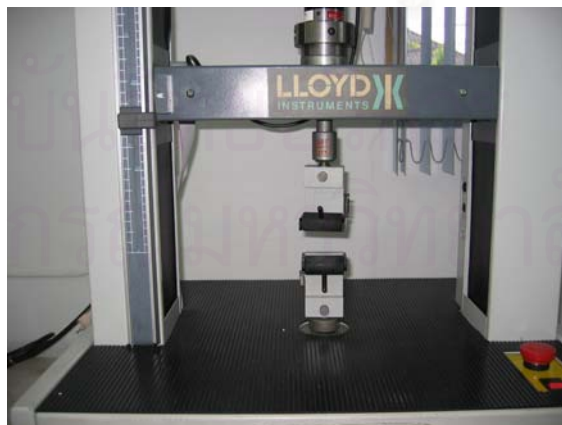
- เครื่อง ทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาด Universal Testing Machine จาก
บริษัท LLOYD INSTRUMENTS

- เครื่องทดสอบค่าความแข็ง
- แผ่น Acrylic มีขอบขนาด 15 ×15 เซนติเมตร ขอบแต่ละด้านเจาะรูห่างกันรูละ 5
มิลลิเมตร

- แผ่นกระจกมีขอบขนาด 15 ×15 เซนติเมตร
- คินน้ำมัน



รูปที่ 3.8 รูปเครื่องทดสอบความทานการดึงขนาดแบบ manual



รูปที่ 3.9 รูปเครื่องทดสอบความต้านทานการฉีกขาด Universal Testing Machine จาก
บริษัท LLOYD INSTRUMENTS

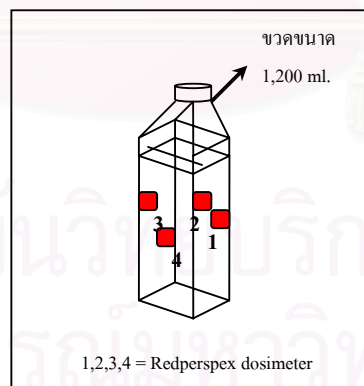


รูปที่ 3.10 รูปแผ่น Acrylic มีขอบ เจาะรูที่ขอบทุกด้าน แต่ละรูห่างกัน 5 มิลลิเมตร ขนาด 15 ×15 เซนติเมตร (ด้านซ้าย) และแผ่นกระจกขนาด 15 ×15 เซนติเมตร (ด้านขวา)

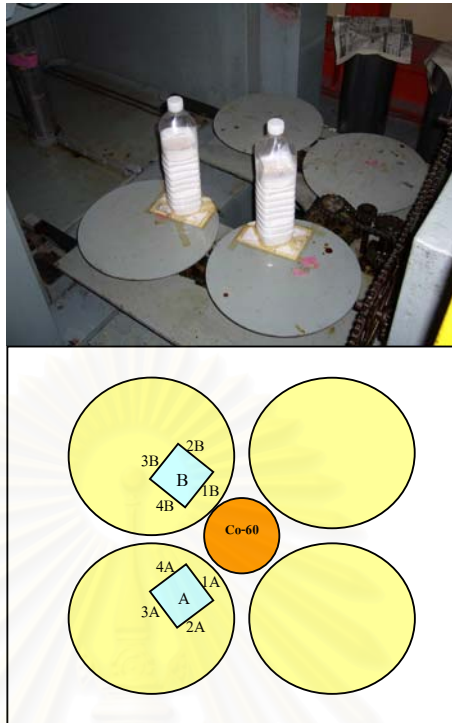
3.2.2). ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.2.1 การทำ Dose mapping ปริมาณรังสีที่จะใช้ฉาย

- นำน้ำยาล้างขวดพลาสติก ขนาด 1200 มิลลิลิตร ติด Redperspex dosimeter รอบ ๆ ขวดพลาสติกทั้ง 4 ด้าน แสดงในรูปที่ 3.11 นำขวดไปวางในเครื่องฉายรังสี 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B แสดงในรูปที่ 3.12 เป็นเวลา 40 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 รูป dosimeter ติดรอบๆขวดพลาสติก 4 ด้าน



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งที่ใช้วางขวดสำหรับฉายรังสี

- นำ dosimeter ไปอ่านค่าที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ผลการทำ Dose mapping ปริมาณรังสี แสดงในตารางที่ 3.2 คำนวณเวลาที่จะใช้ฉายรังสีให้ได้ปริมาณ 16 kGy
- ที่ตำแหน่ง A ต้องใช้เวลาในการฉายรังสี 20 ชั่วโมง 34 นาที และที่ตำแหน่ง B ต้องใช้เวลาในการฉายรังสี 30 ชั่วโมง 20 นาที

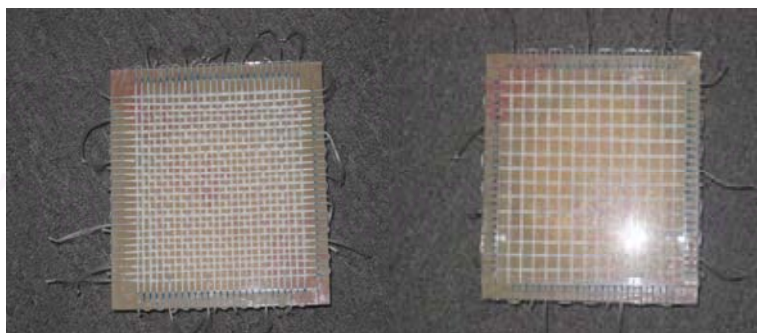
3.2.2.2 การหาปริมาณเส้นใย, ความยาวเส้นใย (length of fiber) และทิศทางการจัดเรียงตัวแบบสุ่มที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงในน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี

- นำเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนมาตัดให้ได้ความยาว 6, 10 และ 14 มิลลิเมตร เพื่อใช้หาความยาวที่เหมาะสม
- นำน้ำยางที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 มาผสมกับเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 เทลงในแผ่นกระจกมีขอบขนาด 15×15 เซนติเมตรเกลี่ยเส้นใยให้กระจายทั่วแผ่นกระจก หลังจากนั้นทำตามข้อ 3.1.3.4

ตารางที่ 3.2 ผลการทำ Dose mapping ปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในรูปที่ 3.12
ณ วันที่ 26 สิงหาคม 2548

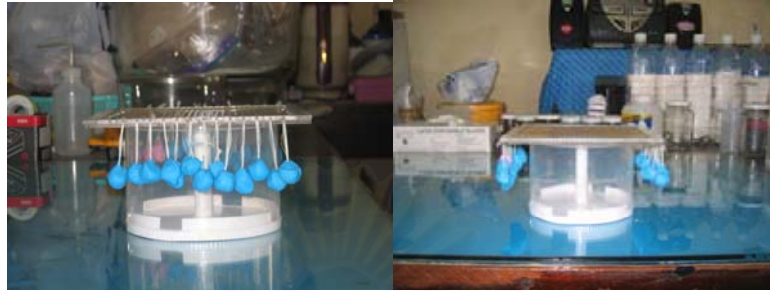
จำนวน dosimeter	รหัส dosimeter	Dose rate (kGy/40hr.)	Dose rate (kGy/hr.)	Dose rate เฉลี่ย (kGy/hr.)
1	1A	35.43	0.89	
2	2A	28.46	0.72	
3	3A	34.46	0.86	0.83
4	4A	29.23	0.73	
5	1B	22.35	0.56	
6	2B	21.04	0.53	
7	3B	22.09	0.55	0.54
8	4B	21.07	0.53	

3.2.2.3 การหาปริมาณเส้นใย, ความยาวเส้นใย และทิศทางการจัดเรียงตัวแบบ
ทิศทางเดียว และสองทิศทางที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงในน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี
- นำเส้นไหมและ เส้นใยคาร์บอนมาตัดให้ได้ความยาว 30 เซนติเมตรแล้ว
นำมาพันเป็นเกลียวให้แน่น ใช้ไมโครมิเตอร์วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งสองให้มีขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลางเท่ากันคือ 0.40 มิลลิเมตรนำเส้นใยร้อยใส่แผ่น Acrylic ที่เจาะรูให้มีการจัดเรียงตัว
แบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง ให้มีระยะห่าง 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตรดังในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปการร้อยเส้นใยไหมแบบสองทิศทางที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตร
(ด้านซ้าย) และ 10 มิลลิเมตร (ด้านขวา)

- นำดินน้ำมันน้ำหนัก 3 กรัม ถ่วงน้ำหนักที่ปลายทั้งสองข้างของเส้นใย เพื่อให้แรงดึงแต่ละเส้นเท่ากัน ดังในรูปที่ 3.14

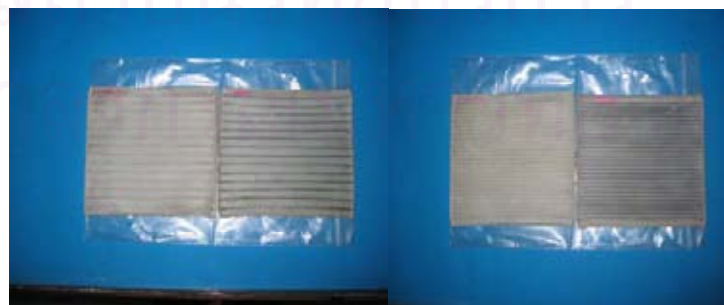


รูปที่ 3.14 รูปการใช้ดินน้ำมันน้ำหนัก 3 กรัม ถ่วงน้ำหนักเส้นใยทั้งสองข้างของเส้นใย

- นำน้ำยางที่ได้จากข้อ 3.2.2.1 เทลงในแผ่น Acrylic ที่มีเส้นใยจัดเรียงตัว จากข้อ 3.2.2.3 ดังแสดงส่วนผสมในตารางที่ 3.5 ทำตามข้อ 3.1.3.4



รูปที่ 3.15 รูปเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ซึ่งนำมาใช้เสริมแรงใน น้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี



รูปที่ 3.16 รูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบ ทิศทางเดียวระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตร (ด้านขวา) และ 10 มิลลิเมตร (ด้านซ้าย)

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

ส่วนผสม	Control	S6/1	S6/3	S6/5	S6/10	S10/1	S10/3	S10/5	S610/10	S14/1	S14/3	S14/5	S14/10
RUBBER50%(phr.)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
KOH10%(phr.)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
n-BA(phr.)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Length of fiber(mm.)	-	6	6	6	6	10	10	10	10	14	14	14	14
Silk fiber(phr.)	-	1	3	5	10	1	3	5	10	1	3	5	10
Carbon fiber(phr.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

S = Silk fiber, C = Carbon fiber

ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

ส่วนผสม	Control	C6/1	C6/3	C6/5	C10/1	C10/3	C10/5	C14/1	C14/3	C14/5
RUBBER50%(phr.)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
KOH10%(phr.)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
n-BA(phr.)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Length of fiber(mm.)	-	6	6	6	10	10	10	14	14	14
Silk fiber(phr.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carbon fiber(phr.)	-	1	3	5	1	3	5	1	3	5

ตารางที่ 3.5 แสดงส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยปริมาณรังสี 16 kGy และเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง

ส่วนผสม	Control	SU5	SU10	SB5	SB10	CU5	CU10	CB5	CB10
RUBBER50%(phr.)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
KOH10%(phr.)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
n-BA(phr.)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Unidirectional(mm.)	-	5 ^a	10 ^a	-	-	5 ^b	10 ^b	-	-
Bidirectional(mm.)	-	-	-	5 ^a	10 ^a	-	-	5 ^b	10 ^b

a = Silk fiber , b = Carbon fiber

3.2.2.4 การทดสอบ Tensile Strength ขั้นตอนการทดสอบเหมือนกับข้อ 3.1.3.5 ทุกอย่าง ยกเว้นเครื่องที่ใช้ทดสอบค่า Tensile Strength ของการทดสอบนี้เป็นเครื่อง manual จึงต้องคำนวณค่า Tensile Strength, % Elongation at Break และ Modulus of elasticity 100 % เอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสูตรด้านล่าง

$$\text{Tensile Strength (MPa.)} = (F/A) \times 9.806$$

โดยที่ F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (kgf)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

$$\text{Elongation at Break (\%)} = \{(L - L_0)/L_0\} \times 100$$

โดยที่ L_0 = ความยาวก่อนทำการทดสอบ (mm.) = 25 mm.

L = ความยาวที่ชิ้นทดสอบถูกยึดตัวออกจนขาด (mm.)

$$\text{Modulus (MPa.)} = (F_m/A) \times 9.806$$

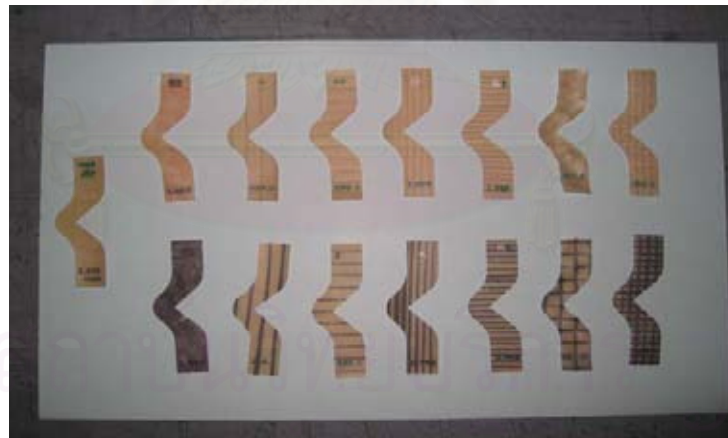
โดยที่ F_m = แรงดึงขณะที่ชิ้นทดสอบยืดออก (kgf) ที่ค่าความยืด 100 %, 300 % และ 500 %

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

3.2.2.5 การทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มยาง ในการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D642-00 [30] โดยเครื่อง Universal Testing Machine ใช้ Load cell 500 นิวตัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบคล้ายกับการทดสอบความต้านทานการดึงจนขาด ต่างกันตรงขั้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปฟิล์มยางทำเป็นชิ้นงานทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดในทิศทางทางการจัดเรียงตัวต่าง ๆ



รูปที่ 3.18 รูปฟิล์มยางทำเป็นชิ้นงานทดสอบความต้านทานการฉีกขาดในทิศทางทางการจัดเรียงตัวต่าง ๆ

3.2.2.6 การทดสอบค่าความแข็งของฟิล์มยาง ในการทดสอบความแข็ง ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 [31] โดยเครื่อง Zwick ประเภท Shore Durometer ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น Shore A โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- เตรียมชิ้นทดสอบขนาด 3×3 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร
- นำชิ้นทดสอบไปเข้าเครื่องวัดความแข็ง กดเครื่องวัดความแข็งค้างไว้

วินาที จึงอ่านค่าที่ได้และบันทึกค่าไว้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองนำน้ำยางธรรมชาติไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างๆเพื่อหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติโดยนำน้ำยางที่ผ่านการฉายรังสีไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยาง เพื่อทดสอบ เช่น ค่าความต้านทานการดึงจนขาด แสดงไว้ในภาคผนวก ง

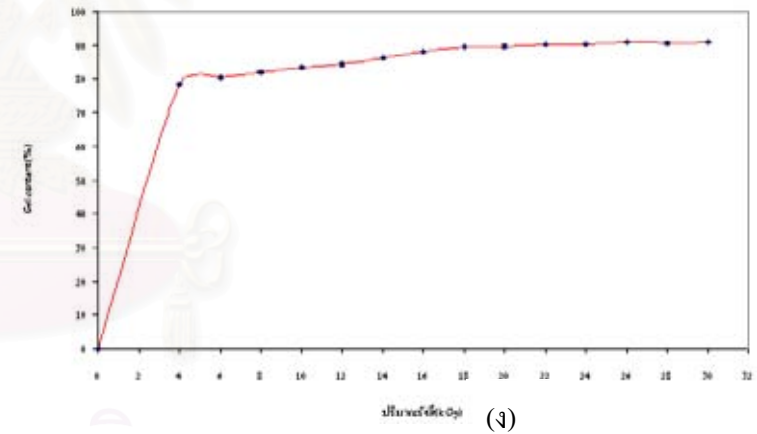
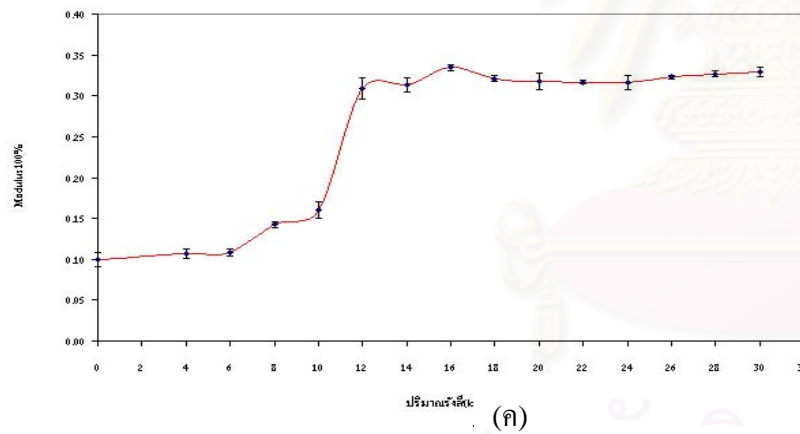
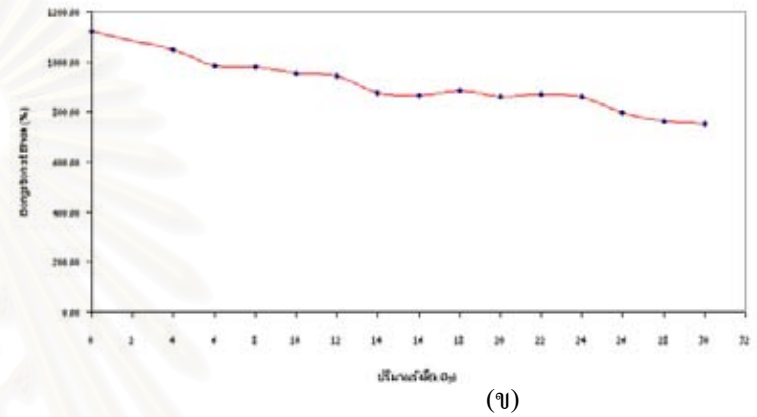
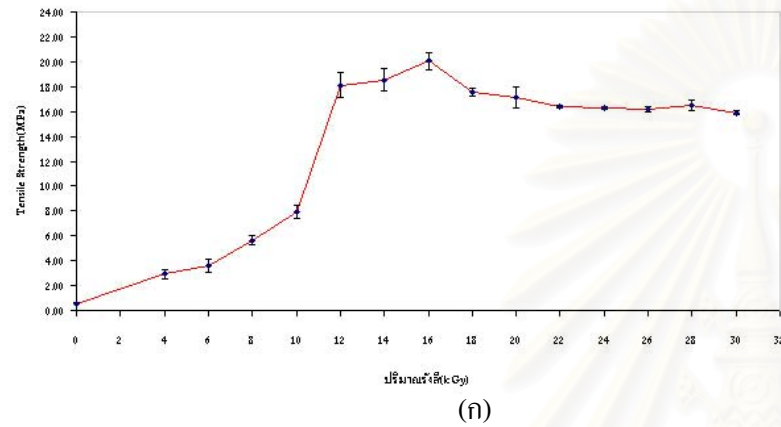
4.1.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดที่ปริมาณรังสี 4-30 kGy ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก (ดูตารางที่ ง.1 ประกอบ) พบว่าเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นค่าความต้านทานการดึงจนขาดเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานการดึงจนขาดมีค่าสูงในช่วงปริมาณรังสี 12-20 kGy และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณรังสี 16 kGy คือ 20.07 MPa. หลังจากนั้นเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นค่าความต้านทานการดึงจนขาดจะค่อยๆลดลง

4.1.2 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดที่ปริมาณรังสี 4-30 kGy ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข (ดูตารางที่ ง.2 ประกอบ) พบว่าเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดลดลง เช่น ที่ปริมาณรังสี 0, 10, 20 และ 30 kGy มีค่าความยาวยืดออกจนขาดเท่ากับ 1119.57, 956.33, 860.83 และ 750.40 % ตามลำดับ

4.1.3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 100 % ที่ปริมาณรังสี 4-30 kGy พบว่าค่ามอดูลัส 100 % มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปริมาณรังสี 4 -10 kGy และที่ปริมาณรังสี 12 -30 kGy ค่ามอดูลัส 100 % มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ค (ดูตารางที่ ง.3 ประกอบ) เช่น ที่ปริมาณรังสี 12, 18, 24 และ 30 kGy มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 0.31, 0.32, 0.32 และ 0.33 MPa. ตามลำดับ ที่ปริมาณรังสี 16 kGy ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 100 % มีค่าสูงสุดคือ 0.34 MPa.

4.1.4 ผลการทดสอบค่าความเป็นเจลที่ปริมาณรังสีต่างๆ พบว่าค่าความเป็นเจลมีค่าสูงขึ้น 78.50 % เมื่อฉายรังสีปริมาณ 4 kGy ที่ช่วงปริมาณรังสี 6-16 kGy ค่าความเป็นเจลค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อย หลังจากนั้นเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นค่าความเป็นเจลมีค่าคงที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ง (ดูตารางที่ ง.4 ประกอบ)

จากผลการวิจัยพบว่าแผ่นฟิล์มยางที่เตรียมจากน้ำยางที่ฉายรังสีที่ปริมาณรังสีในช่วง 12-20 kGy มีค่าความต้านทานการดึงจนขาดสูง, มอดูลัสความยืดหยุ่น 100 % มีค่าสูงใกล้เคียงกัน และค่าความเป็นเจลสูง ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติในการวิจัยนี้คือ ปริมาณรังสีที่ 16 kGy เนื่องจากมีค่าความต้านทานการดึงจนขาด และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 100 % สูงสุด



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า Tensile strength (ก), % Elongation at break (ข), Modulus of elasticity 100 % (ค) และ % Gel content (ง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิต แสดงไว้ในภาคผนวก จ.

4.2.1.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. ในรูปที่ 4.2 (ดูตารางที่ จ.1 ประกอบ) พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยไหมมากขึ้นค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าลดลงในทุกความยาวที่ศึกษา เช่น ความยาว 6 mm. ที่ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. มีค่าความต้านทานการดึงขนาดเท่ากับ 11.94, 4.79, 3.02, 2.72 และ 1.70 MPa. ตามลำดับ และที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันแต่ความยาวของเส้นใยต่างกันผลที่ได้คือเมื่อเส้นใยไหมมีความยาวเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยเกิดการพันกัน (entanglement) เมื่อความยาวเพิ่มขึ้น [1] เช่นที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่าความต้านทานการดึงขนาดเท่ากับ 2.72, 2.64 และ 2.62 MPa. ตามลำดับ

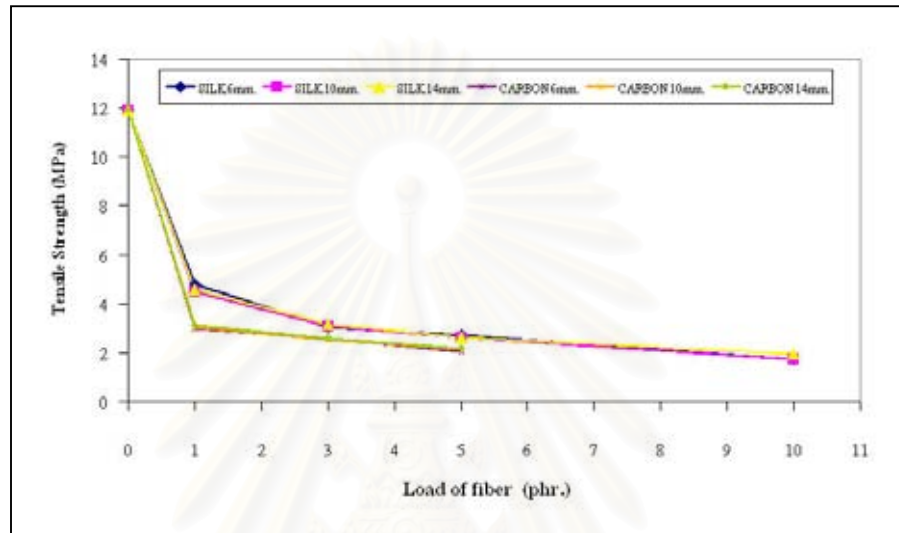
4.2.1.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. และปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. ในรูปที่ 4.2 (ดูตารางที่ จ.2 ประกอบ) พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนมากขึ้นค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าลดลงในทุกความยาวที่ศึกษาเช่น ความยาว 6 mm. ที่ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. มีค่าความต้านทานการดึงขนาดเท่ากับ 11.94, 2.99, 2.57 และ 2.04 MPa. ตามลำดับและที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันแต่ความยาวของเส้นใยต่างกันผลที่ได้คือ เมื่อเส้นใยคาร์บอนมีความยาวเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีการกระจายตัวดี ไม่เกิดการพันกันของเส้นใย ทำให้เกิดการเสริมแรงกันระหว่างยางกับเส้นใยคาร์บอน เช่นที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่าความต้านทานการดึงขนาดเท่ากับ 2.04, 2.13 และ 2.18 MPa. ตามลำดับ

4.2.1.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่มที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่างๆ พบว่าทั้งเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนมีค่าความต้านทานการดึงขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้เส้นใยปริมาณ 1 phr. เช่นที่ความยาว 6 mm. ของเส้นใยไหม และเส้นใยคาร์บอน มีค่าความต้านทานการดึงขนาดเท่ากับ 4.79 และ 2.99 MPa. และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 3, 5 และ 10 phr. ค่าความต้านทานการดึงขนาดมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อใช้เส้นใยเสริมแรงในยางทำให้ยางสูญเสียความเป็นผลึก จึงทำให้ค่าความต้านทานการ

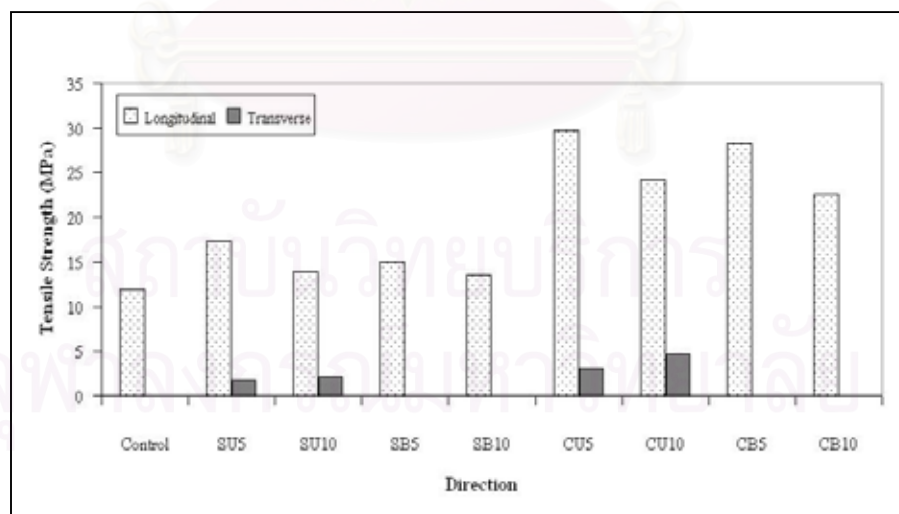
ดึงจนขาดลดลงเมื่อใช้เส้นใยเสริมแรง [6] และพบว่าปริมาณเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนเท่ากัน ค่าความต้านทานการดึงจนขาดของเส้นใยไหมสูงกว่าเส้นใยคาร์บอนเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยไหมเมื่อนำมาใช้เสริมแรง น้ำหนักเส้นใยที่เท่ากัน ปริมาณเส้นใยคาร์บอนจึงมีปริมาณมากกว่าทำให้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดมีค่าต่ำกว่าเส้นใยไหม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูตารางที่ จ.1 และตารางที่ จ.2 ประกอบ)

4.2.1.4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางที่นำมาใช้เสริมแรง พบว่าเมื่อนำเส้นใยมาจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง ยกเว้นการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวาง (Transverse) ค่าความต้านทานการดึงจนขาดมีค่าสูงขึ้นมาจาก control และค่าความต้านทานการดึงจนขาดของเส้นใยคาร์บอนมีค่าสูงกว่าเส้นใยไหมในทิศทางการจัดเรียงตัวเดียวกัน แต่เส้นใยคาร์บอนเมื่อนำมาจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางเดียวตามยาว (Longitudinal) และสองทิศทางไม่สามารถดึงเส้นใยคาร์บอนขาดได้ เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีค่าความต้านทานการดึงจนขาดสูงกว่าอย่างมาก ซึ่งในการทดสอบเมื่อแรงที่ใช้ในการดึงสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งยางไม่สามารถทนแรงดึงได้ จึงทำให้ยางขาดส่วนเส้นใยคาร์บอนถูกดึงหลุดออกมาจากตัวชิ้นงานดังรูปที่ 4.4 ประกอบกับเส้นใยที่นำมาใช้ไม่ได้ผ่านการทำความสะอาดผิวของเส้นใยจึงอาจทำให้แรงยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นใยไม่ดีเท่าที่ควร และที่การจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวาง ค่าความต้านทานการดึงจนขาดมีค่าต่ำกว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวมาก เนื่องจากเส้นใยที่จัดเรียงตัวตามยาวแรงที่ใช้ในการดึงเป็นแรงที่ขนานกับทิศทางของเส้นใยทำให้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดเป็นค่าระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงยางและเส้นใย ส่วนเส้นใยที่จัดเรียงตัวตามขวางแรงที่ใช้ในการดึงเป็นแรงที่ตั้งฉากกับเส้นใยทำให้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดของยาง, เส้นใย และวัสดุคอมโพสิตมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าความต้านทานการดึงจนขาดของการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวจึงมีค่าสูงกว่าการจัดเรียงแบบทิศทางเดียวตามขวาง เช่น เส้นใยไหมระยะห่าง 5 mm. จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางและตามยาว มีค่าเท่ากับ 1.76 และ 17.34 MPa. ตามลำดับ และที่การจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางมีค่าต่ำกว่า control เนื่องจากเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในยางทำให้ยางสูญเสียความเป็นผลึก จึงทำให้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดต่ำกว่า control นอกจากนี้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดของการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาว และสองทิศทางที่ระยะห่างเท่ากันคือ 5 และ 10 mm. ของเส้นใยชนิดเดียวกันมีค่าต่างกันเล็กน้อย เช่นการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาว และการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางที่ระยะห่าง 5 mm. ของเส้นใยไหม ค่าความต้านทานการดึงจนขาดเท่ากับ 17.34 และ 15.93 MPa.ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อนำชิ้นตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ เส้นใยที่อยู่ตรงกลาง (gauge range) มีเส้นใยเพียงเส้นเดียวเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว

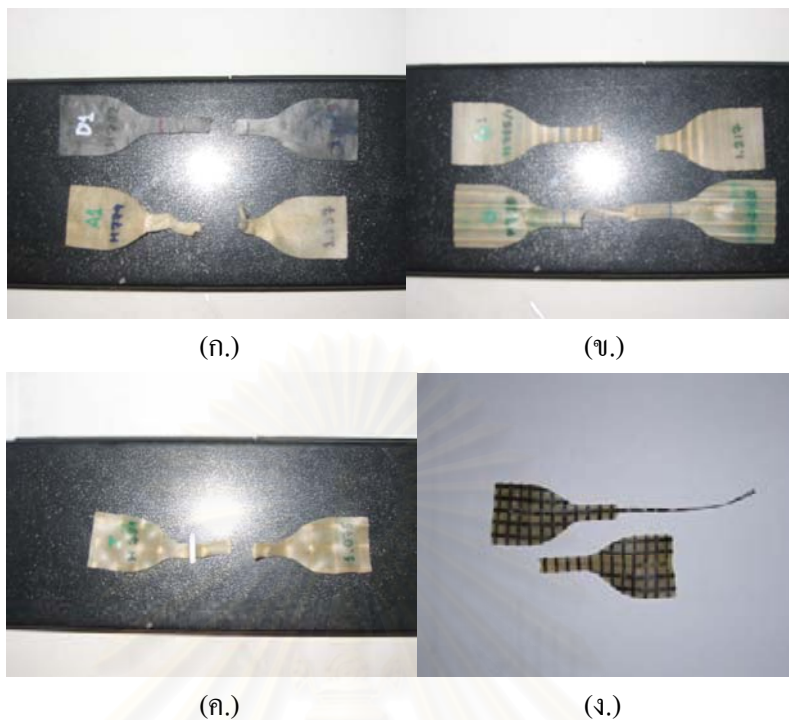
ตามยาวและสองทิศทางดังรูปที่ 3.17 ทำให้ค่าความต้านทานการดึงจนขาดมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ที่การจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางมีค่าต่ำกว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว เนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางมีเส้นใยตามขวางด้วย ทำให้เกิดการขวางโมเลกุลของยาง 2 ทิศทาง ทั้งแนวตามยาว และแนวตามขวาง ดังนั้นค่าความต้านทานการดึงจนขาดจึงต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูตารางที่ จ.3 ประกอบ)



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบคู่ของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความต้านทานการดึงจนขาด



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความต้านทานการดึงจนขาด



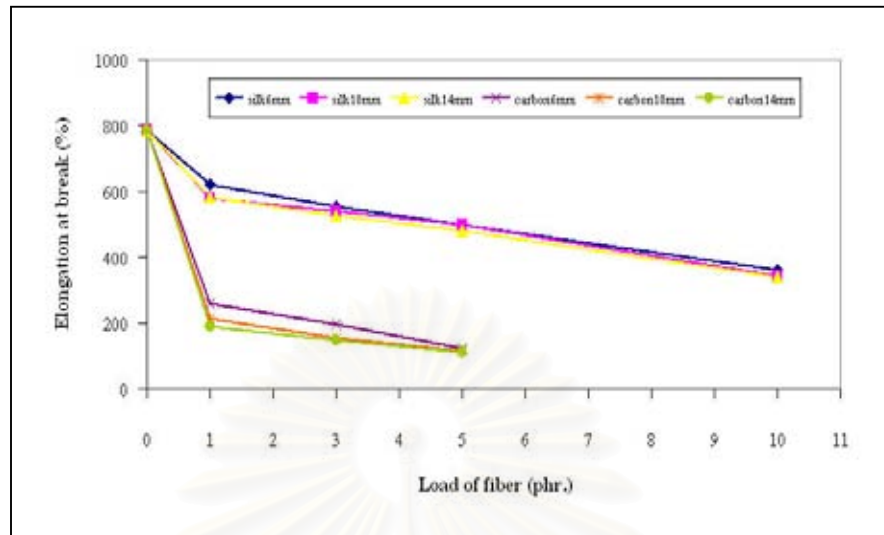
รูปที่ 4.4 รูปชิ้นทดสอบที่ทดสอบความต้านทานการดึงจนขาดแล้ว : (ก.) ชิ้นทดสอบจัดเรียงตัวแบบคู่, (ข.) ชิ้นทดสอบจัดเรียงตัวทิศทางเดียวตามยาวและตามขวาง, (ค.) ชิ้นทดสอบจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางระยะห่างระหว่างเส้นใย 10 mm. และ (ง.) ชิ้นทดสอบจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm.

4.2.2 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิต แสดงไว้ในภาคผนวก จ

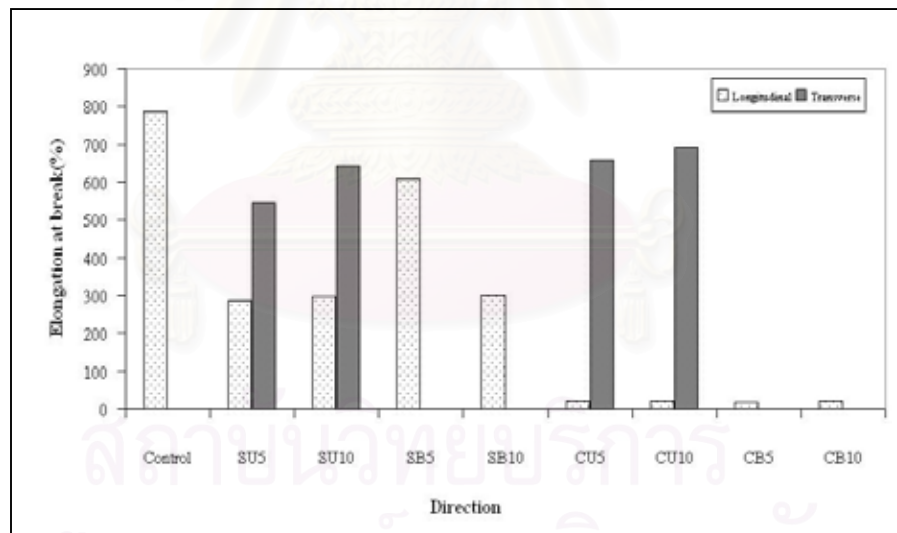
4.2.2.1 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ซึ่งจัดเรียงตัวแบบคู่ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. พบว่าค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของเส้นใยไหมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเช่น ที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. มีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดเท่ากับ 786.00, 578.67, 539.20, 499.33 และ 345.33 % ตามลำดับ และเมื่อความยาวของเส้นใยมากขึ้นค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดมีค่าต่างกันไม่มากเช่น ที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดมีค่าเท่ากับ 500, 499.33 และ 480 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูตารางที่ จ.1 ประกอบ)

4.2.2.2 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. พบว่าค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของเส้นใยคาร์บอนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. มีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดเท่ากับ 786.00, 215.07, 154.67 และ 116.67 % และเมื่อความยาวของเส้นใยมากขึ้นค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดมีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยที่ความยาวน้อยค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดสูงกว่าความยาวมาก เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดมีค่าเท่ากับ 124.40, 116.67 และ 112.80 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูตารางที่ ฉ.2 ประกอบ)

4.2.2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่างๆ พบว่าเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดลดลง โดยที่เส้นใยคาร์บอนมีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดลดลงอย่างรวดเร็วกว่าเส้นใยไหมที่ปริมาณเส้นใย 1 phr. หลังจากนั้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของเส้นใยทั้งสองจะค่อยๆลดลงทีละน้อย เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเสริมแรงในยางนั้นจะทำให้วัสดุที่มีความแข็งมากขึ้น (harder) ทำให้ความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิม และความเหนียวลดลงจึงทำให้ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดลดลง [5, 6] และยังพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใย และความยาวเส้นใยเท่ากันค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของเส้นใยไหมสูงกว่าเส้นใยคาร์บอนมากเช่น ที่ปริมาณเส้นใย 1 phr. ความยาวเส้นใย 14 mm. ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดจนขาดของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 583.33 และ 189.33 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยไหมมีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดสูงกว่าเส้นใยคาร์บอนถึง 3.08 เท่า และมีค่าสูงเป็น 4.26 เท่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มเป็น 5 phr. ที่ความยาวของเส้นใยเท่ากันคือ 14 mm. เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยไหมเมื่อนำมาใช้เสริมแรง น้ำหนักเส้นใยที่เท่ากัน ปริมาณเส้นใยคาร์บอนจึงมีปริมาณมากกว่าทำให้ค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดมีค่าต่ำกว่าเส้นใยไหม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูตารางที่ ฉ.1 และตารางที่ ฉ.2 ประกอบ)



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าในซัดด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าในซัดด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด

4.2.2.4 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง พบว่าค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของเส้นใยไหม และเส้นใยคาร์บอนมีค่าน้อยลงจาก control ดังในรูปที่ 4.6 (ดูตารางที่ ๓.3 ประกอบ) โดยที่เส้นใยคาร์บอนมีค่าต่ำกว่าเส้นใยไหมในทิศทางการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาว และสองทิศทาง เช่น การจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดที่ระยะห่างของเส้นใยไหม 5 และ 10 mm. มีค่าต่างกันเล็กน้อยคือ 285.33 และ 295.87 % ส่วนเส้นใยคาร์บอนที่ระยะห่างของเส้นใยคาร์บอน 5 และ 10 mm. มีค่าเท่ากันคือ 20 % ในการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางที่ระยะห่างของเส้นใยไหม 5 และ 10 mm. มีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดต่ำกว่าเส้นใยคาร์บอนเล็กน้อยที่ระยะห่างระหว่างเส้นใยเท่ากัน เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่เส้นน้อยกว่าเส้นใยไหม ทำให้มีช่องว่างระหว่างสายกับเส้นใยน้อยกว่าจึงสามารถยืดออกได้มากกว่า การจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางเส้นใยไหมที่ระยะห่างของเส้นใย 5 mm. มีค่าความยาวยืดออกจนขาดสูงกว่าระยะห่างของเส้นใย 10 mm. เนื่องจากมีเส้นใยตามขวางมากกว่าทำให้ยังสามารถยืดออกได้มากกว่า ส่วนในเส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงตัวแบบสองทิศทางที่ระยะห่างของเส้นใยคาร์บอน 5 และ 10 mm. มีค่าเท่ากันคือ 20 % ซึ่งจะเห็นได้จากการวิจัยนี้ไม่ว่าเส้นใยคาร์บอนจะจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวหรือจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางมีค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดไม่ต่างกัน เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีค่าความยาวที่ยืดออก 1.5 % ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยไหมประมาณ 10 เท่า ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เสริมแรงในยางทำให้ความสามารถในการยืดของวัสดุคอมโพสิตมีค่าต่ำตามวัสดุที่นำมาเสริมแรง

4.2.3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 100 % ของวัสดุคอมโพสิต ดังแสดงในภาคผนวก ข

4.2.3.1 ผลการทดสอบค่ามอดูลัส 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. ในรูปที่ 4.7 (ดูตารางที่ ๓.1 ประกอบ) พบว่าค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เช่นที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 0.19, 0.34, 0.68, 0.73 และ 1.06 MPa. ตามลำดับ แต่เมื่อความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสมีค่าใกล้เคียงกัน เช่นปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่ามอดูลัส 100 % มีค่าเท่ากับ 0.73, 0.73 และ 0.75 MPa. ตามลำดับ

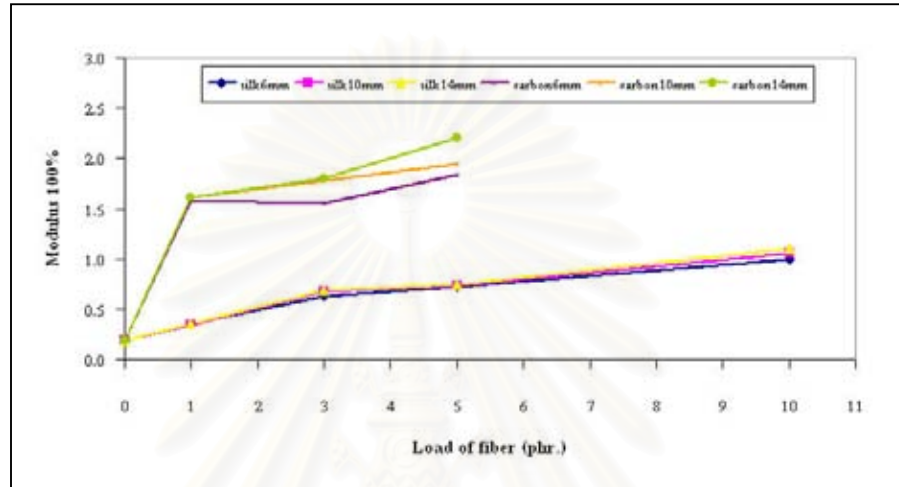
4.2.3.2. ผลการทดสอบค่ามอดูลัส 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย

6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. ในรูปที่ 4.7 (ดูตารางที่ ข.2 ประกอบ) พบว่าค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเช่นที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 0.19, 1.61, 1.78, และ 1.95 MPa. ตามลำดับ และเมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้นค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ค่ามอดูลัส 100 % มีค่าเท่ากับ 1.84, 1.95 และ 2.21 MPa. ตามลำดับ

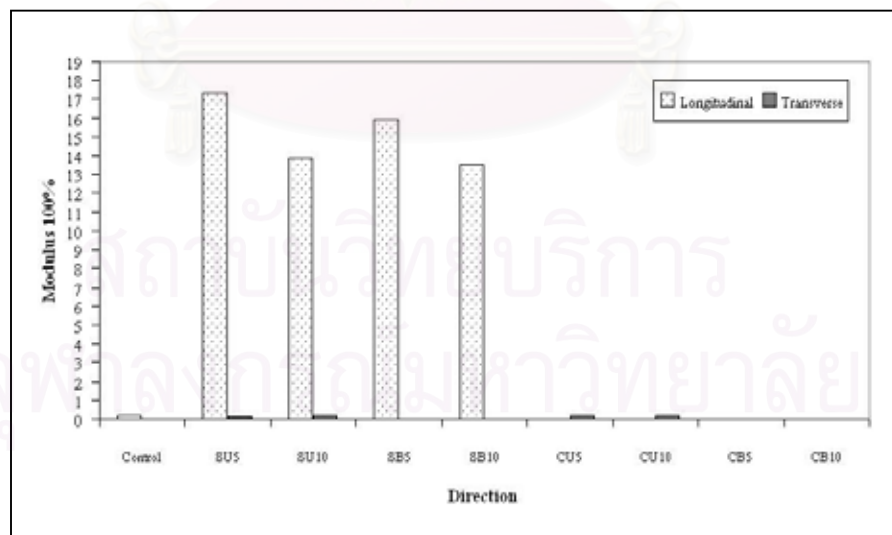
4.2.3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่ามอดูลัส 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่างๆ ในรูปที่ 4.7 (ดูตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2 ประกอบ) พบว่าวัสดุคอมโพสิตเมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเส้นใยเพิ่มมากขึ้นวัสดุคอมโพสิตจะสามารถทนแรงดึงมากขึ้น [6] แต่เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงค่ามอดูลัสมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรงมาก และค่ามอดูลัสเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงเพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรง เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 1 phr. ที่ความยาว 6 mm. เมื่อใช้เส้นใยไหมและ เส้นใยคาร์บอนเสริมแรง มอดูลัส 100 % มีค่าเท่ากับ 0.36 และ 1.58 MPa. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยคาร์บอนมีค่ามอดูลัส 100 % สูงกว่าเส้นใยไหม 4.4 เท่า เนื่องจากน้ำหนักเส้นใยที่เท่ากันเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าเส้นใยไหมจึงต้องใช้แรงในการดึงเพื่อให้ขึ้นทดสอบยืดออกมากกว่าทำให้ค่ามอดูลัสเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรง นอกจากนี้ยังพบว่าค่ามอดูลัส 100 % เมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรงไม่ต่างกันเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น เช่น ที่ปริมาณเส้นใยไหม 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. มีค่ามอดูลัส 100 % เท่ากับ 0.73, 0.73 และ 0.75 MPa. ตามลำดับ และเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงได้ค่ามอดูลัส 100 % สูงขึ้นเล็กน้อย เช่น ที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอน 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. มีค่ามอดูลัส 100 % เท่ากับ 1.84, 1.95 และ 2.21 MPa. ตามลำดับ

4.2.3.4 ผลการทดสอบค่ามอดูลัส 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสี พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยไหมเสริมแรงซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวมีค่ามอดูลัส 100 % สูงกว่าเส้นใยไหมที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวาง ซึ่งเป็นไปตามกฎของผสม (rule of mixture) [7] และเมื่อเส้นใยไหมที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวและสองทิศทางที่ระยะห่าง 5 mm. พบว่ามีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยไหมที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาว และสองทิศทางที่ระยะห่าง 10 mm. ส่วนเส้นใยคาร์บอนเมื่อจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวและจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางที่ระยะห่าง 5 และ 10 mm. ไม่สามารถหาค่ามอดูลัส 100 %

ได้เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนสามารถยึดออกได้น้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นใยไหม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางมีค่ามอดูลัส 100 % เท่ากับ 0.15, 0.16, 0.18 และ 0.17 MPa. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่างจากค่ามอดูลัส 100 % ของ control เล็กน้อย โดยที่ค่ามอดูลัส 100 % ของ control มีค่าเท่ากับ 0.19 MPa. ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูตารางที่ ข.3 ประกอบ)



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าในซัดด้วยรังสีกับค่า Modulus of elasticity 100 %



รูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าในซัดด้วยรังสีกับค่า Modulus of elasticity 100 %

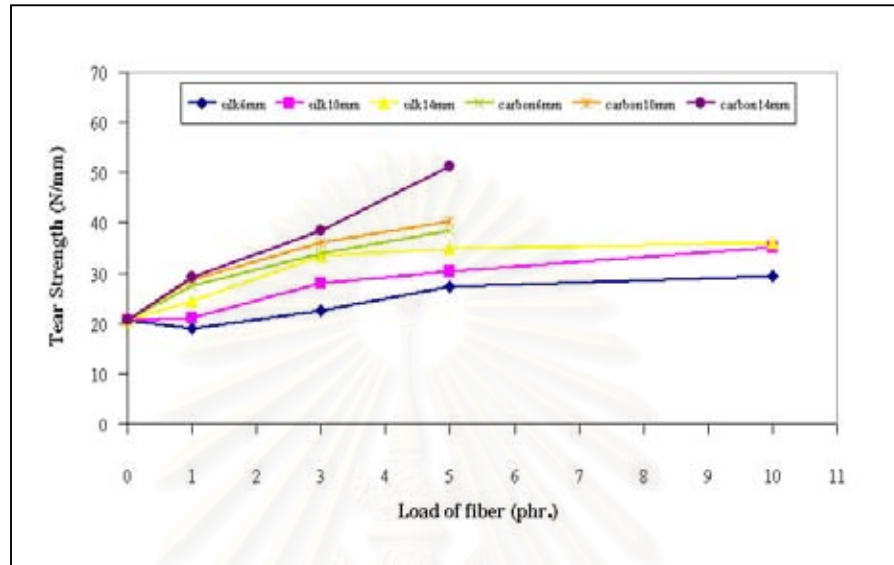
4.2.4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิต ดังแสดงในภาคผนวก ข

4.2.4.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. ดังในรูปที่ 4.9 (ดูตารางที่ ซ.1 ประกอบ) พบว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเช่น ที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าเท่ากับ 20.63, 21.01, 27.96, 30.42 และ 35.22 N/mm. และพบว่าเมื่อความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทาน-การฉีกขาดเพิ่มขึ้นเช่นที่ปริมาณเส้นใย 1 phr. ค่าความต้านทานการฉีกขาดที่ความยาว 6mm. ต่ำกว่า control เล็กน้อย คือ ค่าความต้านทานการฉีกขาดของ control เท่ากับ 20.63 N/mm. ส่วนค่าความต้านทานการฉีกขาดของปริมาณเส้นใยไหม 1 phr. ความยาว 6 mm. มีค่าเท่ากับ 19.06 N/mm. และเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 14 mm. ค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเป็น 21.01 และ 24.35 N/mm.. ตามลำดับ

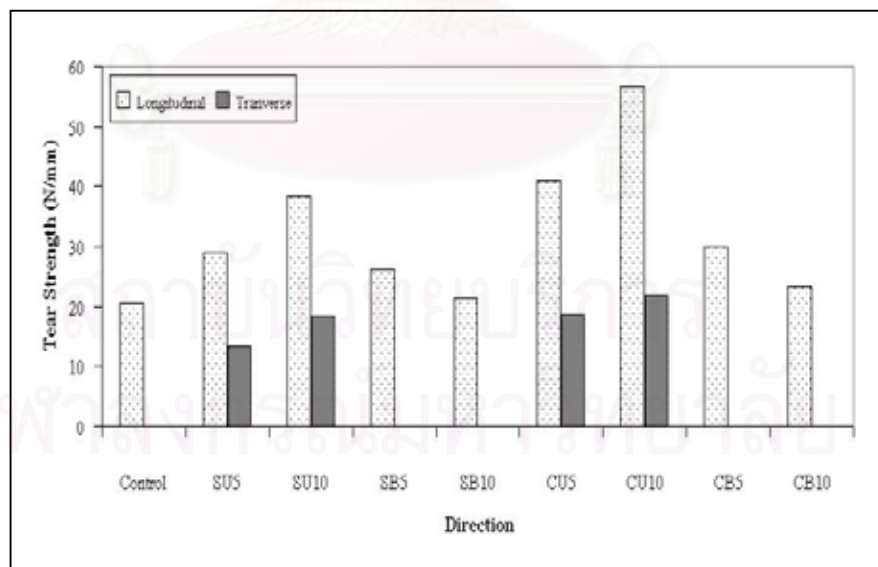
4.2.4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. พบว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเช่น ที่ความยาวเส้นใย 10 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าเท่ากับ 20.63, 28.80, 36.01 และ 40.39 N/mm. ดังในรูปที่ 4.9 (ดูตารางที่ ซ.2 ประกอบ) และพบว่าเมื่อความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเช่น ที่ปริมาณเส้นใย 1 phr. ค่าความต้านทานการฉีกขาดที่ความยาวเส้นใย 6 mm. มีค่าสูงกว่า control คือค่าความต้านทานการฉีกขาดของ control เท่ากับ 20.63 N/mm. ส่วนค่าความต้านทานการฉีกขาดของปริมาณเส้นใยคาร์บอน 1 phr. ความยาว 6 mm. มีค่าเท่ากับ 27.51 N/mm. และค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเป็น 28.80 และ 29.07 N/mm. เมื่อความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 14 mm. ตามลำดับ

4.2.4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่างๆ ในรูปที่ 4.12 (ดูตารางที่ ซ.1 และตารางที่ ซ.2 ประกอบ) พบว่าทั้งเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอน ค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยและความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากทิศทางของเส้นใยทำให้ทิศทางการฉีกขาดเปลี่ยนไปเมื่อเจอเส้นใย ทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น [4, 32] ที่ปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยที่เท่ากัน พบว่าเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหม

เสริมแรงเช่นที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. เส้นใยคาร์บอนมีค่าสูงกว่าเส้นใยไหมเป็น 1.41, 1.32 และ 1.47 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าเส้นใยไหม



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าแรงต้านทานการฉีกขาด



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าแรงต้านทานการฉีกขาด

4.2.4.4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน พบว่าในการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางของเส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่า control และต่ำกว่าการจัดเรียงแบบทิศทางเดียวตามยาว เนื่องจากการฉีกขาดของการจัดเรียงตามขวางเป็นไปตามการจัดเรียงตัวของเส้นใยทำให้แรงต้านทานการฉีกขาดมีน้อย [33] และในการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวของเส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่า control โดยที่เส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวที่ระยะห่าง 10 mm. มีค่าสูงสุดคือ 56.70 N/mm. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.7 เท่าจาก control ในการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางของเส้นใยไหมมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่าเส้นใยคาร์บอนไม่ว่าระยะห่างเส้นใย 5 mm. หรือ 10 mm. และยังพบว่าที่ระยะห่าง 5 mm. ของเส้นใยทั้งสองมีค่าสูงกว่าที่ระยะห่าง 10 mm. เนื่องจากที่ระยะ 5 mm. มีเส้น-ใยที่จัดเรียงตัวมากกว่าทำให้การฉีกขาดเปลี่ยนทิศทางไปตามทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่ามากกว่าที่ระยะ 10 mm. ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูตารางที่ ซ.3 ประกอบ)

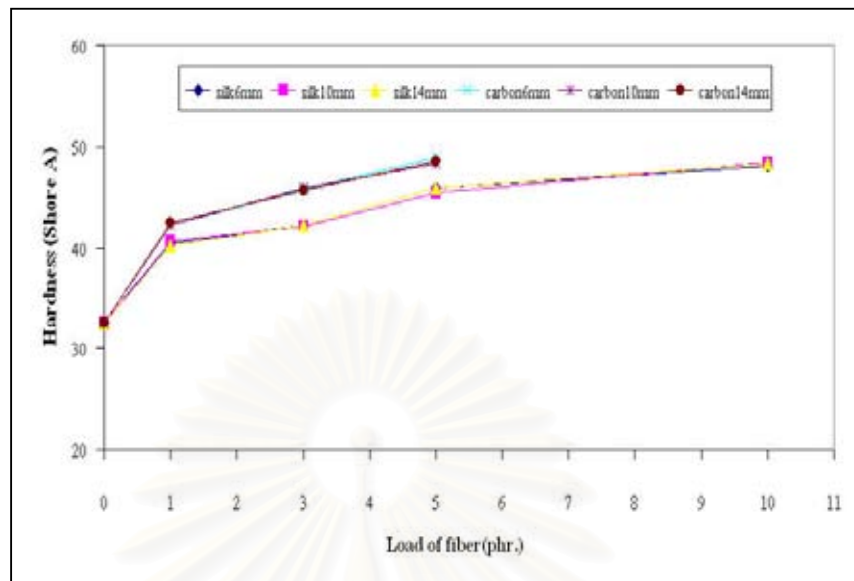
4.2.5 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิต แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

4.2.5.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6,10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3, 5 และ 10 phr. ในรูปที่ 4.11 (ดูตารางที่ ฉ.1 ประกอบ) พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณเส้นใย 1, 3, 5 และ 10 phr. มีค่าความแข็งเป็น 1.24, 1.30, 1.41 และ 1.48 เท่าจากค่า control ตามลำดับ ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน พบว่าเมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีค่าคงที่ เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. มีค่าความแข็งเท่ากับ 45.86, 45.42 และ 45.88 ตามลำดับ

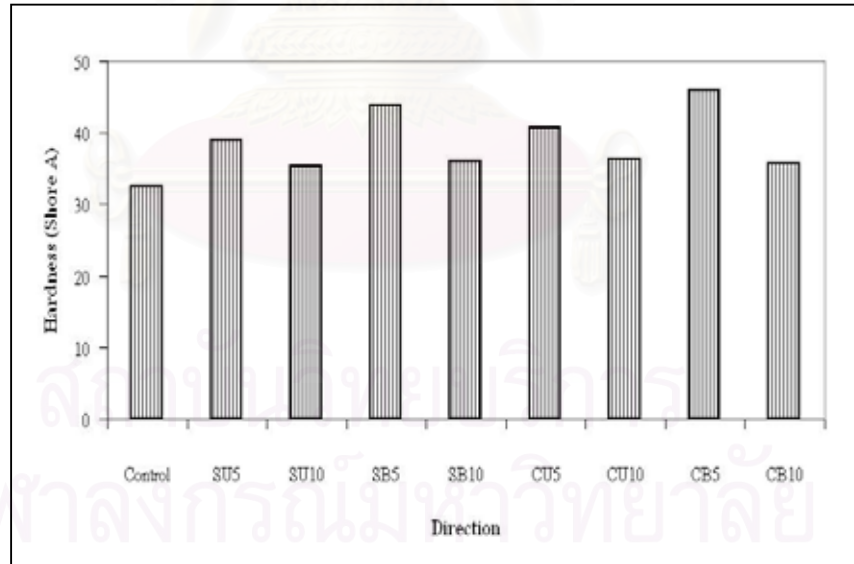
4.2.5.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. ปริมาณเส้นใย 0, 1, 3 และ 5 phr. ในรูปที่ 4.11 (ดูตารางที่ ฉ.2 ประกอบ) พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณเส้นใย 1, 3 และ 5 phr. มีค่าความแข็งเป็น 1.30, 1.41 และ 1.49 เท่าจากค่า control ตามลำดับ ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันพบว่าเมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีค่าคงที่ เช่น ที่ปริมาณเส้นใย 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. มีค่าความแข็งเท่ากับ 48.84, 48.32 และ 48.54 ตามลำดับ

4.2.5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่างๆ ในรูปที่ 4.11 (ดูตารางที่ ฉ.1 และตารางที่ ฉ.2 ประกอบ) พบว่าเส้นใยทั้งสองเมื่อนำมาใช้เสริมแรงมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงเมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงมีค่าความแข็งสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรงเช่น ที่มีปริมาณเส้นใยคาร์บอน 5 phr. ความยาวเส้นใย 6, 10 และ 14 mm. มีค่าความแข็งเท่ากับ 48.84, 48.32 และ 48.54 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเส้นใยไหมที่มีปริมาณและความยาวเส้นใยเดียวกันถึง 1.06 เท่า เนื่องจากปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าเส้นใยไหม

4.2.5.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมและวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ในรูปที่ 4.12 (ดู ตารางที่ ฉ.3 ประกอบ) พบว่าเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงมีค่าความแข็งสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรงเล็กน้อยในทิศทางการจัดเรียงตัวแบบเดียวกันและระยะห่างระหว่างเส้นใยเท่ากันเช่น ในการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบทิศทางเดียว ที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. เมื่อใช้เส้นใยไหม และเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในยางค่าความแข็งมีค่าเท่ากับ 38.98 และ 40.82 ตามลำดับ และในการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทาง ที่ระยะห่าง 5 mm. เมื่อใช้เส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงมีค่าเท่ากับ 43.94 และ 45.90 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางของเส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวเช่น เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. ที่จัดเรียงตัวแบบสองทิศทางเสริมแรงจะมีค่าความแข็งสูงเป็น 1.12 เท่าของเส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวที่ระยะห่างระหว่างเส้นใยเท่ากัน เนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางมีปริมาณเส้นใยมากกว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว ซึ่งในการศึกษานี้พบว่าค่าความแข็งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 45.90 เมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรง โดยมีระยะห่างระหว่างเส้นใยเป็น 5 mm. และมีการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทาง



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยต่าง ๆ ที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความแข็ง



รูปที่ 4.12 แผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความแข็ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสี 16 kGy เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

-กรณีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบสุ่มพบว่าค่า Modulus of elasticity 100 %, Tear strength และ Hardness ต่ำกว่า control มากในทุกเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า Modulus of elasticity 100 %, Tear strength และ Hardness เพิ่มขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมคือความยาวเส้นใย 14 mm. และปริมาณเส้นใย 10 phr. ส่วนวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนคือความยาวเส้นใย 14 mm. และปริมาณเส้นใย 5 phr.

-กรณีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางพบว่าค่า Tensile strength, Modulus of elasticity 100 %, Tear strength และ Hardness ต่ำกว่า control มากไม่ว่าจะจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวหรือจัดเรียงตัวแบบสองทิศทาง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะห่างระหว่างเส้นใยที่ 5 mm. ให้ค่า Tensile strength, Modulus of elasticity 100 % และ Hardness สูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 10 mm. ทั้งเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอน ส่วนค่า Tear strength พบว่าระยะห่างระหว่างเส้นใย 10 mm. ต่ำกว่าที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. เมื่อจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาว และเมื่อจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. ต่ำกว่าที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 10 mm. กรณีการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางมีค่า Tensile strength ต่ำกว่า control มาก ส่วนค่า Modulus of elasticity 100 % และ Tear strength มีค่าใกล้เคียง control นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 10 mm. มีค่า Tensile strength และ Tear strength สูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. และที่ระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 mm. และ 10 mm. มีค่า Modulus of elasticity 100 % ไม่ต่างกัน ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตที่จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวมีค่าคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางดังแสดงในรูปที่ 5.3 ยกเว้นค่า % Elongation at break ของการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามขวางมีค่าสูงกว่า การจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวตามยาวดังแสดงในรูปที่ 5.5

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต พบว่าการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวในวัสดุคอมโพสิตเป็นการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมจะนำมาใช้เสริมแรงในยาง เนื่องจากให้ค่า Tensile strength, Modulus of elasticity 100% และ Tear strength สูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทาง, การจัดเรียงตัวแบบสุ่ม และมีค่าสูงกว่าค่า control มาก (unidirectional > bidirectional > random > control) และมีค่าสูงกว่าค่า control มาก แต่ค่า Hardness ของการจัดเรียงตัวแบบสุ่มมีค่าสูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบสองทิศทางและการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว (random > bidirectional > unidirectional > control) และยังพบว่าเส้นใยคาร์บอนมีค่า Tensile strength, Modulus of elasticity 100 %, Tear strength และ Hardness สูงกว่าเส้นใยไหม และเมื่อใช้เส้นใยไหมเสริมแรงในยางค่า % Elongation at break จะมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่าค่า % Elongation at break ไม่ว่าจะจัดเรียงตัวแบบใดค่าที่ได้ต่ำกว่า control มาก (control > random > bidirectional > unidirectional) เมื่อใช้เส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สามารถนำวัสดุคอมโพสิตที่ได้ไปใช้ทางการแพทย์เช่น ทำที่ปิดฝาขวดยา, ถุงเก็บปัสสาวะผู้ป่วย, ถุงหน้าท้องสำหรับเก็บอุจจาระผู้ป่วย และถุงบรรจุเลือดหรือนำมาใช้ในครัวเรือนเช่น ยางปูโต๊ะ, ถุงมือเสริมแรงด้วยเส้นใย, สายรองเท้าแตะ และพื้นรองเท้าแตะ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ (Sulfur) เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนที่ก่อให้เกิดการแพ้ต่ำมาก และไม่มีสารเคมีตกค้างทำให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภคถึงแม้ว่าจะมีราคาสูงกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

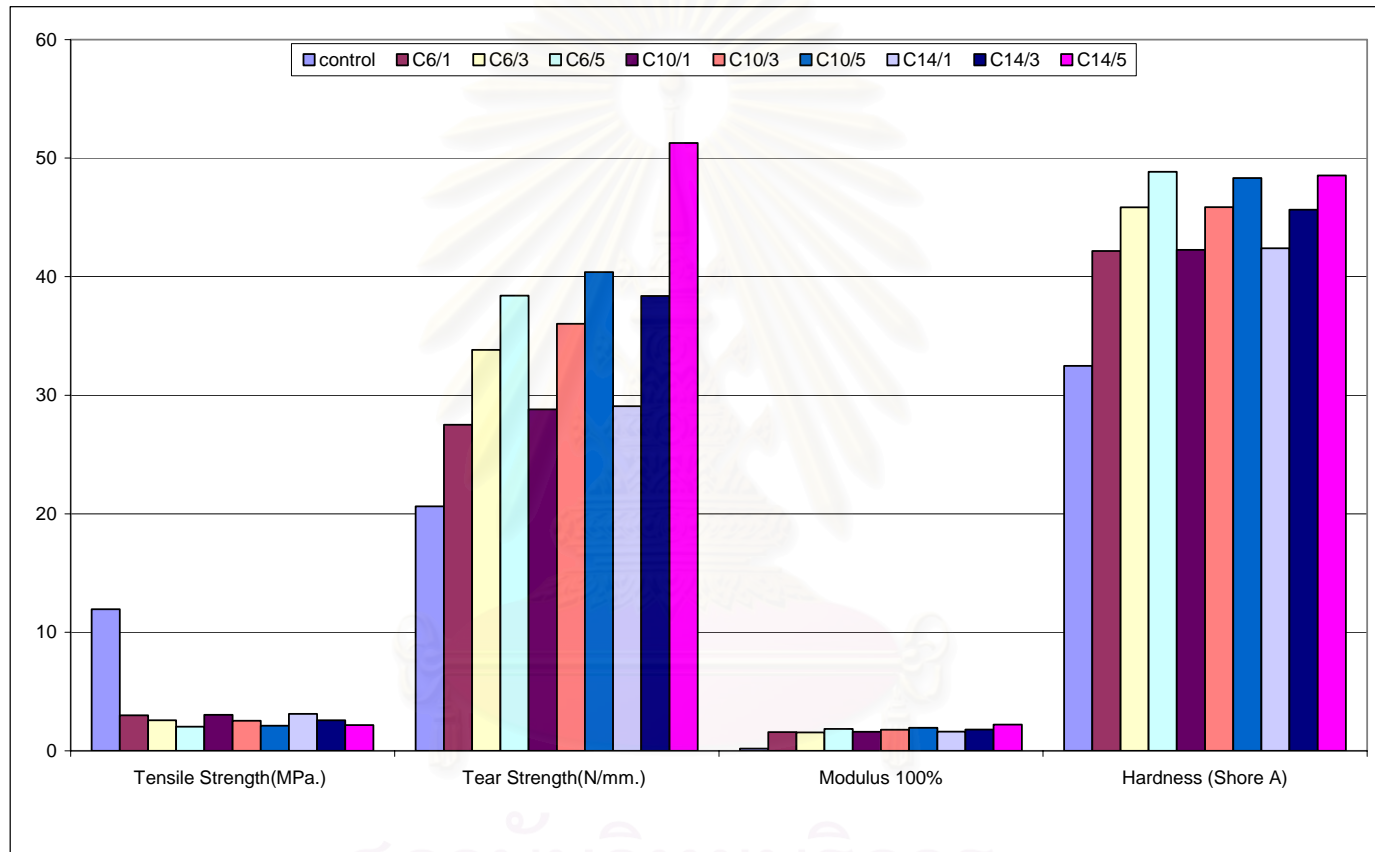
1. ก่อนนำเส้นใยมาใช้งานควรมีการทำความสะอาดเส้นใยเพื่อให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและยางดีขึ้น

2. ควรจะนำเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงใส่ลงในน้ำยางธรรมชาติก่อนนำไปวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับยาง ในกรณีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม

3. ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตควรจะใช้ Bonding agent เช่น Silane เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นใย และเติมสารป้องกันยางเสื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น

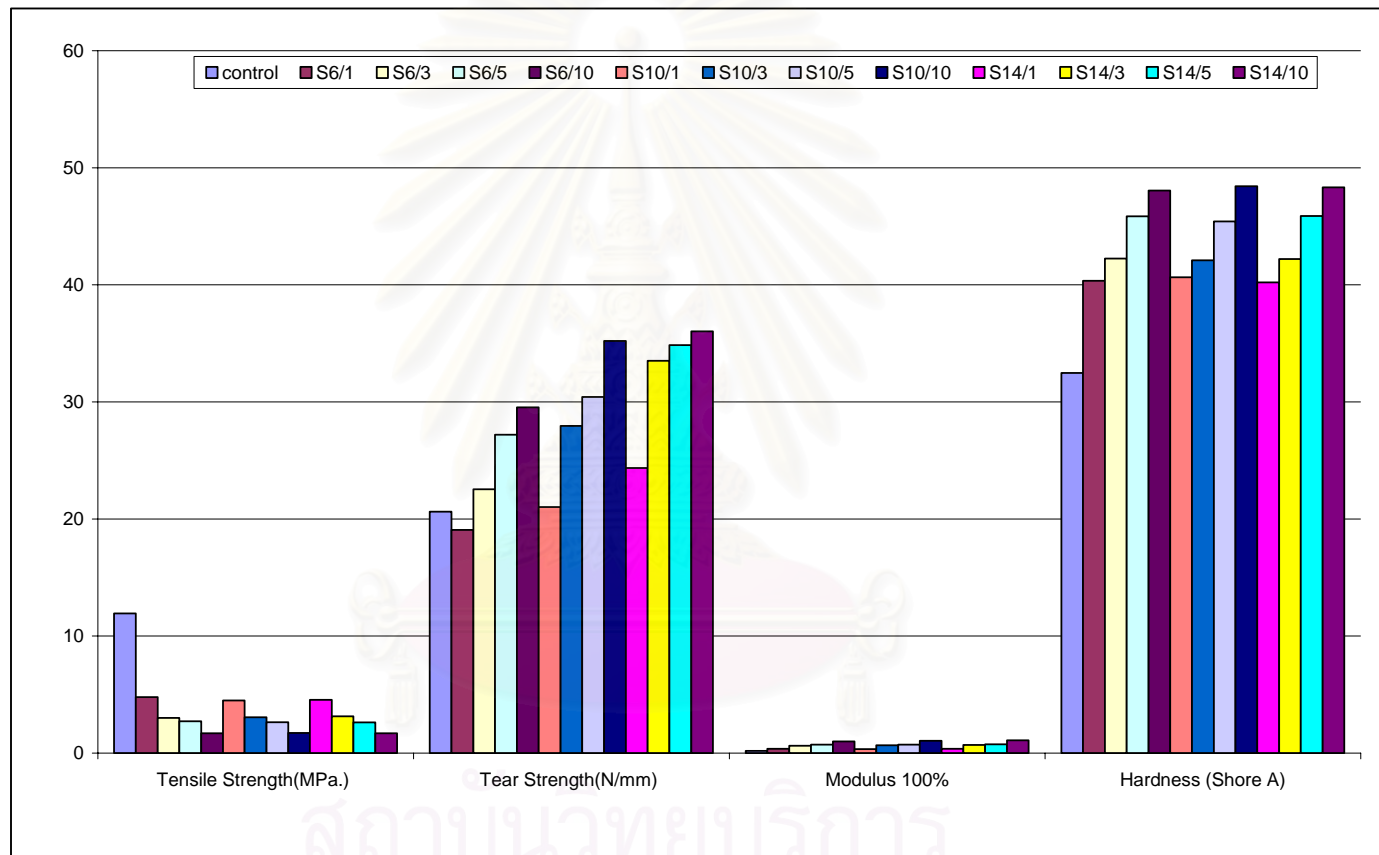
4. เนื่องจากในการทดลองดึงขึ้นตัวอย่างเพื่อหาค่าความต้านทานการดึงจนขาดนั้นเครื่องที่ใช้ดึงตัวอย่างที่เป็นแบบอัตโนมัติ ที่จับขึ้นงานไม่สามารถจับขึ้นงานให้อยู่ได้ขณะทำการดึง จึงต้องเปลี่ยนมาใช้เครื่องแบบ manual ดังนั้นควรจะใช้เครื่องที่ทดสอบแบบอัตโนมัติที่จับขึ้นงานสามารถจับขึ้นงานขณะดึงได้เพื่อหาค่าที่ได้เกิดการผิดพลาดน้อยลง

5. ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตแบบมีทิศทางต้องคำนึงถึงปริมาณของเส้นใยและระยะห่างของเส้นใยที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวแทนของชิ้นงาน



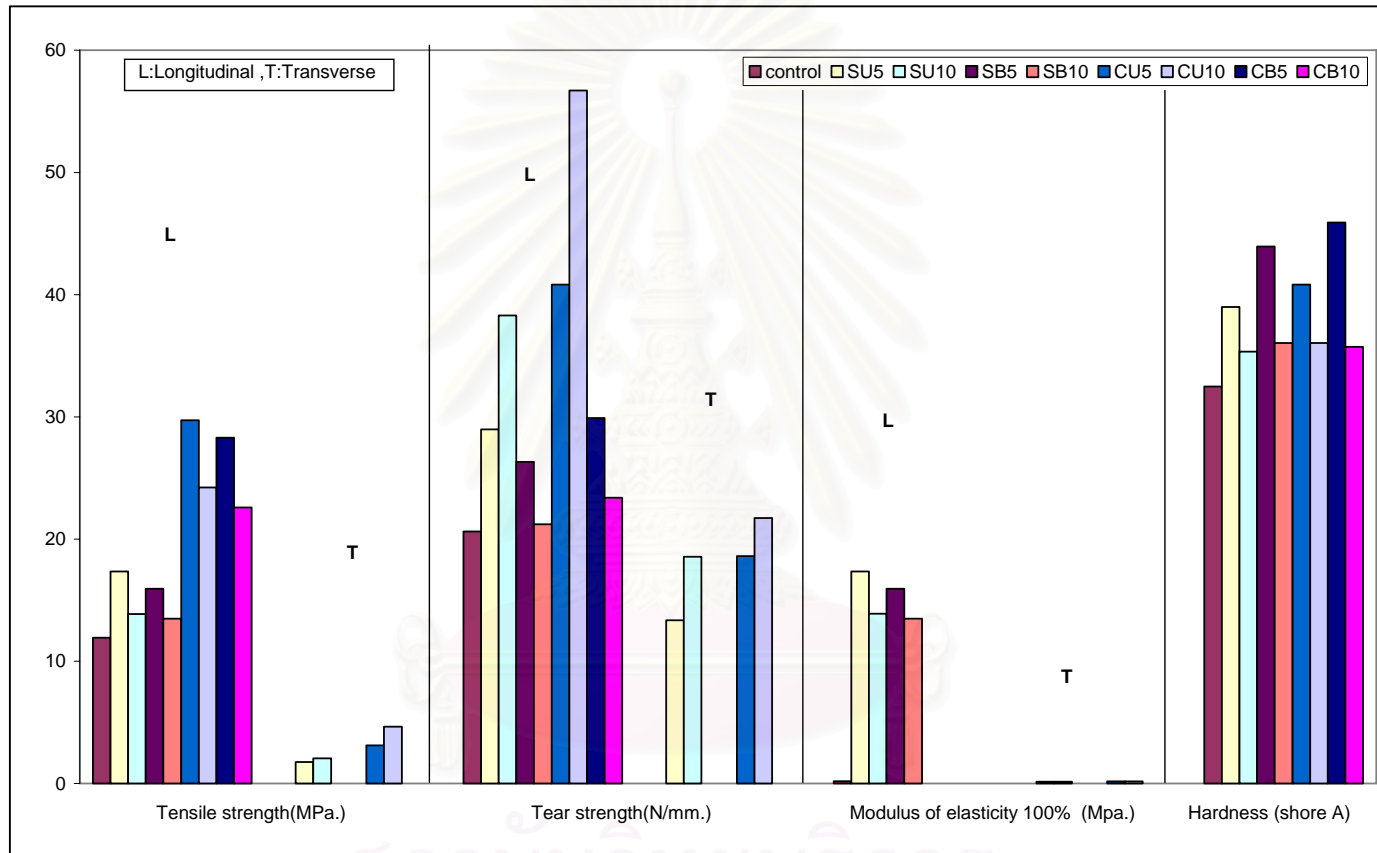
Carbon fiber = C / Length of fiber (mm.) = 6, 10 และ 14 / Load of fiber (phr.) = 1, 3, 5

รูปที่ 5.1 แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบสุ่มเสริมแรงที่ความยาวและปริมาณเส้นใยต่างๆ



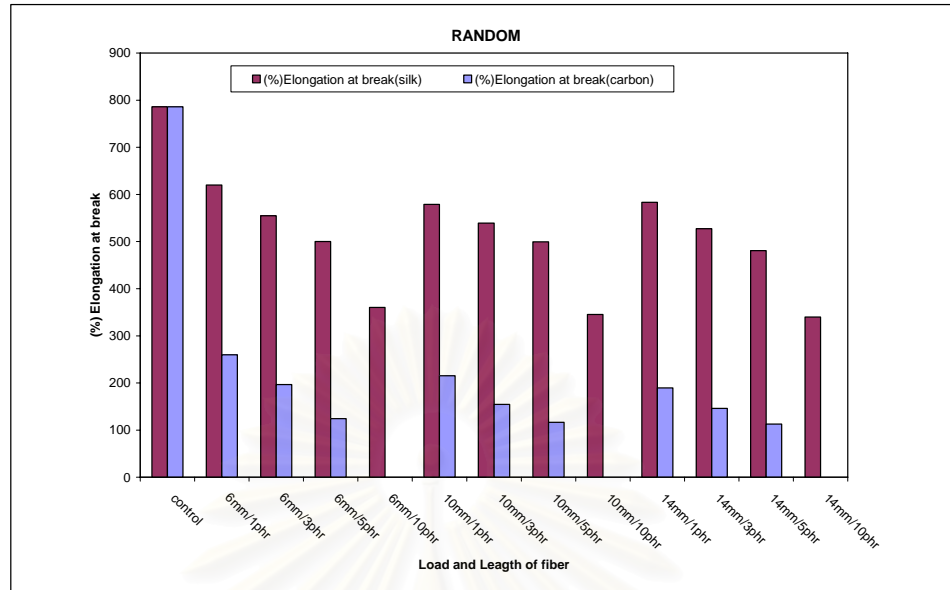
Silk fiber = S / Length of fiber (mm.) = 6, 10 และ 14 / Load of fiber (phr.) = 1, 3, 5 และ 10

รูปที่ 5.2 แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยไหมจัดเรียงตัวแบบสุ่มเสริมแรงที่ความยาวและปริมาณเส้นใยต่างๆ

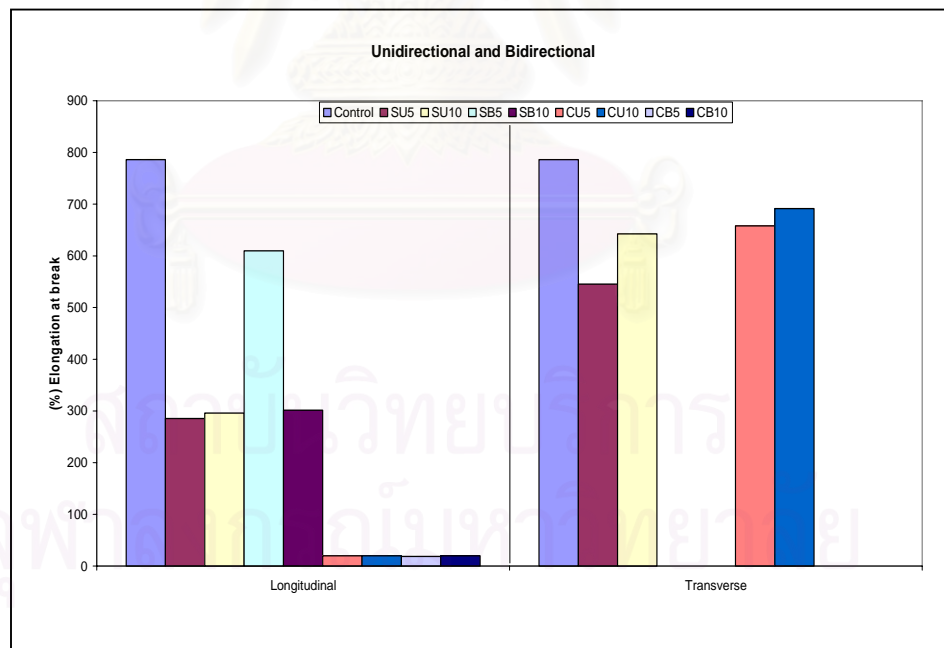


Carbon fiber = C / Silk fiber = S / U = Unidirectional / B = Bidirectional / Space of fiber (mm.) = 5, 10

รูปที่ 5.3 แสดงแผนภูมิคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยไหมจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง



รูปที่ 5.4 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีความยาวและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด



รูปที่ 5.5 แสดงแผนภูมิการจัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและสองทิศทางของเส้นใยไหมและเส้นใยคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่นำมาใช้เสริมแรงในฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยรังสีกับค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด

รายการอ้างอิง

1. Geethamma, V.G., Joseph, R., And Thomas, S. Short coir fiber-reinforced natural rubber composites:Effect of fiber length,orientation, and alkali treatment.Journal of Applied Polymer Science. 55 (1995) : 583-594.
2. Haque, M.E., Dafader, N.C., Akhtar, F., and Ahmad, M.U. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. Radiation Physics Chemistry 48, No.4 (1996) : 505-510.
3. Geethamma, V.G., Mathew, K.T., Lakshminarayanan, R., and Thomas, S. Composite of short coir fibers and natural rubber:effect of chemical modification, loading and orientation of fiber. Polymer. 39 (1998) :1483-1491.
4. Setua, D.K., and Mathur, G.N. Thermal analysis of elastomer composites. Journal of Applied Polymer Science. 79 (2000) : 646-651.
5. Ismail, H., Edyham, M.R., and Wirjosentono, B. Bamboo fiber filled natural rubber composites : the effects of filler loading and bonding agent. Polymer Testing. 21 (2002) : 139-144.
6. Jacob, M., Thomas, S., and Varughese, K.T. Mechanical properties of sisal /oil plam hybrid fiber reinforced natural rubber composites.Composites Science and technology.64 (2004):955-965.
7. Herrera, P.J. and Valasdez-gonzalez, A. Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites. Composites. 35 (2004) : 339-345.
8. Sharif, J., Yunus, W., Zaman, K., Dahlan, M., and Ahmad, M. Preparation and properties of radiation crosslinked natural rubber/clay nanocomposites. Polymer testing.24 (2005):211-217.
9. Kaynak, C., Orgun, O., and Tincer, T. Matrix and interface modification of short carbon fiber – reinforced epoxy. Polymer testing. 24 (2005) : 455-462.
- 10.ปรารธนา คิวสุวรรณ.การทำให้แผ่นยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีมีความเสถียรโดยเติมสารป้องกันยางเสื่อม.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

11. จิตติมา ชาญญาติ. การปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีโดยการเติมตะกอนซิลิกา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์-เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
12. ธเนศ อินทรลักษ์. การพัฒนาท่อโพลีเอทีลินไวนิลอะซิเตดหัดตัวได้ด้วยความร้อนโดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์-เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
13. Woods, R. J. Applied Radiation Chemistry : Radiation Processing / Robert J. Woods [and] Alexei K. Pikaev New York : John Wiley, c1994.
14. Chaudhari, C.V., Bhardwaj, Y.K., Patil, N.D., Dubey, K.A., Kumar, V., and Sabharwal, S. Radiation-induced vulcanization of rubber latex in presence of styrene-butadiene rubber latex. Radiation Physics and Chemistry. 72 (2005) : 613-618.
15. ศูนย์วิจัยการยาง. คำบรรยายวิชาการสำหรับการฝึกอบรมเจ้าหน้าที่. ศูนย์วิจัยการยาง สงขลา, 2520.
16. พิชัย สราญรมย์. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยางพารา. วิทยาลัยราไพพรรณี จันทบุรี, 2527.
17. รัตน์ เพชรจันทร์. ยางพารา. หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู กรุงเทพฯ, 2527.
18. Gill, R. M. Carbon fiber in composite material. London Iliffe Book for the Plastic Institutes, 1972.
19. Nakamura. Fiber Science and Technology. Enfield , NH. : Science, c2000.
20. Tutte, M. E. Structural analysis of polymeric composite materials. New York: Marcel Dekker, 2004.
21. วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่2, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กทม. 10330, 2543.
22. มินะภาวะ,โมโตอิ. วิทยาการไหม. กรมการส่งเสริมอุตสาหกรรม คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย, กรุงเทพฯ, 2530.
23. Wanner, S.B. Fiber Science. Upper Saddle River,NJ. : Printice Hall,1995.
24. Altman, G.H., Diaz, F., Jakuba, C., Calabro, T., Horan, R.L., Chen, J., Lu, H., Richmond, J., and Kaplan, D.L. Silk-based biomaterials. Biomaterials. 24 (2003) : 401-416.
25. Agarwal, B. D. Analysis and Performance of fiber composite. New York : Wiley, c1980.
26. Flinn, .R.A. Engineering materials and their application. Boston: Houghton Mifflin, c1975.
27. Kollar, L.P. and Springer, G. S. Mechanic of composite structures. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

28. Elgun, S.Z. Composite. [online]. Available from.
<http://info.lu.farmingdate.edu/depts/met/met205/composites.html>. [1999, November 19]
29. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension. ASTM D412-98a, 2002.
30. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. ASTM D624-00, 2001.
31. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for rubber Property-Durometer Hardness. ASTM D2240-03, 2003.
32. Ibrra, L. and Chamorro, C. Short Fiber – Elastomer Composites. Effects of matrix and fiber level on swelling and mechanical and dynamic properties. Journal of Applied Polymer Science. 43(1991) :1805-1819.
33. Setua, D.K. and De, S.K. Effect of short fiber on critical cut length in tensile failure of rubber vulcanizates. Journal of Materials Science. 20 (1985) : 2653-2660.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก



THAI RUBBER LATEX CORPORATION (THAILAND) (BLIC COMPANY LIMITED)
 LABORATORY DIVISION
 29 MOO 2 BANBUNG - KLANG RD. KM. 56 - 57 NONGYAI NONGYAI. CHONBURI
 20190 TEL. : (038) 219-262-3 FAX : (038) 219-262 E-mail: orlc@thaitex.com

177/0 น น ก

CERTIFICATE OF TEST RESULTS
 (NOT INCLUDED UNCERTAINTY)

Page : 2/2

This Certificate was issued reference to Certificate of Test Results NO. 05 - 2548/011

Reference Test request no.: 022/06/2548

Certificate no.: 06-2548/017

Sample no.: June-07-2005/003(A0506HAT6)

Parameters	Specification	Tested results	Method
Total solids content (TSC), %	61.50 MIN.	61.73	ISO 124:1997(E)
Dry rubber content (DRC), %	60.00 MIN	60.10	ISO 126:1995(E)
Non rubber content (NRC), % *	2.00 MAX.	1.63	
Alkalinity (as ammonia on total weight), %	0.65 - 0.75	0.72	ISO 125:2003(E)
Alkalinity (as ammonia on water phase), % *		1.88	
pH value at 24.4 ° C, pH units	10.50 MAX.	10.58	ISO 976:1996(E)
KOH no	0.85 MAX.	0.484	ISO 127:1995(E)
Volatile Fatty acid number (VFA no.) *	0.05 MAX	0.0201	ISO 506:1974(E)
Mechanical stability time (MST) at 55 % TSC, sec. *	650 MIN.	720 (R6)	ISO 35:1972(E)
Specific gravity at 25 ° C (SG) *	0.94 MIN.	0.9431	
Magnesium content, ppm (Mg) *	60 MAX.	37.5	
Viscosity at 60 % TSC spindle no 1 At 60 rpm, cps.*		63.5	
Coagulum content, 80 mesh, ppm *		13	ISO 706(E)
Zinc viscosity (ZOV), at 60 % TSC, spindle no. 2. 60 rpm *			

Remark : "Test marked "Not TISI Accredited" in this Certificate are not included in the TISI Accreditation Schedule for our Laboratory"

Date of production 29/5/2548 MST = 1110 ON 20/06/2548

The other parameters which disappear in this Certificate, we could not test.

All test are performed according to the relevant ISO 2004 - 1997 (E)

Reported by :
 (นายสมเกียรติ จูจาภิรักษ์)
 Supervisor
 22/06/2548

Approved by :
 (นางสาวกิตติยา โอชภูม)
 Technical manager
 22/06/2548

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงปริมาณรังสีที่ตำแหน่งต่างๆที่ใช้ในการฉายรังสีน้ำยาง

Absorbed Dose Rate in water (kGy / Hr)						
Small Rack (distance from bundle 2.0 cm.) On August 8, 2002						
Position	A	B	C	D	E	F
Dose Rate	3.195	2.884	3.055	2.829	2.688	2.625

วิธีการคำนวณปริมาณรังสี

วันที่ทำการฉายรังสี : วันที่ 8 กันยายน 2548

1). จากตารางที่ ข.1 Dose Rate วันที่ 8 สิงหาคม 2548 ที่ตำแหน่ง A มีค่าเท่ากับ 3.195 kGy / Hr

2). จากวันที่ 8 สิงหาคม 2545 ถึง วันที่ 8 กันยายน 2548 เวลาผ่านไป 2 ปี 1 เดือน

3). นำค่า Decay factor จากตารางที่ ข.2 มาคูณกับค่า Dose Rate ที่ตำแหน่ง A จะได้ค่า Dose Rate ปัจจุบันที่ตำแหน่ง A

4). ค่า Decay factor เมื่อเวลาผ่านไป 2 ปี 1 เดือน มีค่าเท่ากับ 0.7600

$$\begin{aligned} \text{Dose Rate ปัจจุบัน} &= \text{Dose Rate เดิม} \times \text{Decay factor} \\ &= 3.195 \times 0.7600 \\ &= 2.4282 \text{ kGy / Hr} \end{aligned}$$

5). นำ Dose Rate ปัจจุบันที่ตำแหน่ง A ในข้อ 4 มาหารปริมาณรังสีที่ต้องการ ต้องการฉายรังสีปริมาณ 16 kGy ที่ตำแหน่ง A ใช้เวลาในการฉายเท่ากับ 6 ชั่วโมง 59 นาที

$$\begin{aligned} \text{ต้องการปริมาณรังสี } 16 \text{ kGy} &= 16 / 2.4282 \text{ kGy / (kGy / Hr)} \\ &= 6.5892 \text{ Hr} \\ &= 6 \text{ ชั่วโมง } 59 \text{ นาที} \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.2 แสดงการสลายตัวของโคบอลต์-60 ที่เวลาต่างๆ

COBALT-60 DECAY TABLE												
COBALT-60						RADIATIONS : BETA : 1.478 (W), 0.318 (1.00)						
HALF-LIFE : 5.261 Years						GAMMA : 1.333 (1.00), 1.1733						
GAMMA OUTPUT : 1.30 rhm												
YEARS	MONTHS											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.0000	0.9891	0.9783	0.9676	0.9570	0.9466	0.9363	0.9260	0.9159	0.9059	0.8960	0.8863
1	0.8766	0.8670	0.8575	0.8482	0.8389	0.8298	0.8207	0.8117	0.8029	0.7941	0.7855	0.7769
2	0.7684	0.7600	0.7517	0.7435	0.7354	0.7274	0.7194	0.7116	0.7038	0.6961	0.6885	0.6810
3	0.6736	0.6662	0.6589	0.6517	0.6446	0.6376	0.6306	0.6237	0.6169	0.6102	0.6035	0.5970
4	0.5904	0.5840	0.5776	0.5713	0.5651	0.5589	0.5528	0.5468	0.5408	0.5349	0.5291	0.5233
5	0.5176	0.5119	0.5063	0.5008	0.4953	0.4899	0.4846	0.4793	0.4741	0.4689	0.4638	0.4587
6	0.4537	0.4487	0.4438	0.4390	0.4342	0.4295	0.4248	0.4201	0.4155	0.4110	0.4065	0.4021
7	0.3977	0.3934	0.3891	0.3848	0.3806	0.3765	0.3723	0.3683	0.3643	0.3603	0.3564	0.3525
8	0.3486	0.3448	0.3410	0.3373	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3193	0.3158	0.3124	0.3090
9	0.3056	0.3023	0.2990	0.2957	0.2925	0.2893	0.2861	0.2830	0.2799	0.2768	0.2738	0.2708
10	0.2679	0.2649	0.2621	0.2592	0.2564	0.2536	0.2508	0.2481	0.2454	0.2427	0.2400	0.2374
11	0.2348	0.2322	0.2297	0.2272	0.2247	0.2223	0.2198	0.2174	0.2151	0.2127	0.2104	0.2081
12	0.2058	0.2036	0.2014	0.1992	0.1970	0.1948	0.1927	0.1906	0.1885	0.1865	0.1844	0.1824
13	0.1804	0.1785	0.1765	0.1746	0.1727	0.1708	0.1689	0.1671	0.1653	0.1635	0.1617	0.1599
14	0.1582	0.1564	0.1547	0.1530	0.1514	0.1497	0.1481	0.1465	0.1449	0.1433	0.1417	0.1402
15	0.1386	0.1371	0.1356	0.1342	0.1327	0.1312	0.1298	0.1284	0.1270	0.1256	0.1242	0.1229
16	0.1215	0.1202	0.1189	0.1176	0.1163	0.1150	0.1138	0.1125	0.1113	0.1101	0.1089	0.1077

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

CARBON FIBER

ACELIN TZ-307

PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF ACELAN TZ-307

	U.S. unit	International unit	CGS unit
Tensile strength	51.2×10^3 psi	3.53 Gpa	360 kg/mm^2
Tensile Module	35.5×10^6 psi	245 Gpa	25 Tans/mm^2
Ultimate Elongation	15%	1.5%	1.5%
Density	0.65 lb/in ³	1.8 g/cm ³	1.80g/cm ³
Filament Count	12k 6k 3k 12000, 6000, 3000	12k 6k 3k 12000, 6000, 3000	12k 6k 3k 12000, 6000, 3000
Filament Diameter	0.27×10^{-3} in	6.8 m	6.8 m
Tex (g/1,000m)	800, 400, 200	800, 400, 200	800, 400, 200
Yarn Twist	None	None	None
Specific Heat		0.7 Kt/Kg K	0.17 Cal/g c
Coefficient of Parallel Expansion		-0.1×10^{-6}	-0.1×10^{-6}
Thermal Conductivity		17 W/m K	15 Kcal/mh C
Resistivity		1.5×10^{-3} cm	1.5×10^{-3} cm

Note: 1. All properties are measured at room temperature

2. Impregnated Strand Method

3. To prevent short circuiting in electrical equipment in workshops

where carbon fibers are processed be sure to seal the switch boxes of this equipment with gum tape to prevent from contact between wiring and accumulated carbon dust

ภาคผนวก ง

ผลการหาปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับวัดคาบในชั้นน้ำยางธรรมชาติ

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (kGy)	ทดสอบครั้งที่ 1 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 2 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
0	0.56	0.51	0.64	0.57 ± 0.06
4	2.98	2.56	3.21	2.91 ± 0.33
6	3.05	4.10	3.70	3.62 ± 0.53
8	5.57	5.36	6.03	5.65 ± 0.34
10	7.72	8.51	7.60	7.94 ± 0.49
12	17.29	19.26	17.78	18.11 ± 1.03
14	18.82	17.56	19.26	18.55 ± 0.88
16	19.29	20.38	20.55	20.07 ± 0.68
18	17.93	17.27	17.44	17.55 ± 0.34
20	18.15	16.73	16.63	17.17 ± 0.85
22	16.24	16.35	16.48	16.36 ± 0.12
24	16.38	16.28	16.14	16.27 ± 0.12
26	16.17	15.99	16.45	16.20 ± 0.23
28	16.09	16.39	16.97	16.48 ± 0.45
30	15.79	16.07	15.86	15.91 ± 0.15

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (kGy)	ทดสอบครั้งที่ 1 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 2 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 3 Elongation %	ค่าเฉลี่ย Elongation %
0	1121.50	1119.40	1117.80	1119.57 ± 1.86
4	1045.90	1048.60	1050.10	1048.20 ± 2.13
6	983.90	985.70	986.20	985.27 ± 1.21
8	979.30	977.00	975.70	977.33 ± 1.82
10	956.70	958.10	954.20	956.33 ± 1.98
12	943.60	947.60	945.20	945.47 ± 2.01
14	877.80	873.70	879.00	876.83 ± 2.78
16	866.10	868.00	867.80	867.30 ± 1.04
18	887.40	885.10	889.90	887.47 ± 2.40
20	859.90	863.00	859.60	860.83 ± 1.88
22	868.40	870.50	875.30	871.40 ± 3.54
24	863.00	862.10	860.30	861.80 ± 1.37
26	793.90	793.40	797.70	795.00 ± 2.35
28	758.50	762.70	759.90	760.37 ± 2.14
30	748.80	749.60	752.80	750.40 ± 2.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น100 % ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (kGy)	ทดสอบครั้งที่ 1 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 2 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 3 Modulus 100 %	ค่าเฉลี่ย Modulus 100 %
0	0.11	0.09	0.10	0.10 ±0.01
4	0.10	0.11	0.10	0.11 ±0.01
6	0.11	0.10	0.11	0.11 ±0.00
8	0.14	0.14	0.15	0.14 ±0.00
10	0.16	0.17	0.15	0.16 ±0.01
12	0.31	0.32	0.29	0.31 ±0.01
14	0.31	0.31	0.32	0.31 ±0.01
16	0.34	0.34	0.33	0.34 ±0.00
18	0.33	0.32	0.32	0.32 ±0.00
20	0.32	0.31	0.33	0.32 ±0.01
22	0.31	0.32	0.32	0.32 ±0.00
24	0.31	0.33	0.31	0.32 ±0.01
26	0.32	0.33	0.32	0.32 ±0.00
28	0.32	0.32	0.33	0.33 ±0.19
30	0.32	0.33	0.34	0.33 ±0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดสอบค่าความเป็นเจลที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (kGy)	ทดสอบครั้งที่ 1 % Gel content	ทดสอบครั้งที่ 2 % Gel content	ทดสอบครั้งที่ 3 % Gel content	ค่าเฉลี่ย % Gel content
0	0	0	0	0
4	78.87	78.37	78.25	78.50 ± 0.33
6	80.00	80.71	80.89	80.53 ± 0.47
8	82.29	81.53	82.12	81.98 ± 0.40
10	83.77	82.93	83.18	83.29 ± 0.43
12	84.94	84.03	84.05	84.34 ± 0.52
14	86.13	86.22	86.18	86.18 ± 0.05
16	88.20	88.02	88.12	88.11 ± 0.09
18	89.53	89.67	89.59	89.60 ± 0.07
20	89.90	89.89	89.11	89.63 ± 0.45
22	90.31	90.11	90.14	90.19 ± 0.11
24	90.46	90.25	90.51	90.41 ± 0.14
26	90.75	90.67	90.97	90.80 ± 0.16
28	90.83	90.99	90.06	90.63 ± 0.50
30	91.05	90.76	91.03	90.95 ± 0.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 2 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
Control	11.85	11.73	12.24	11.94 ± 0.27
S6/1	4.62	5.19	4.55	4.79 ± 0.35
S6/3	3.06	2.91	3.09	3.02 ± 0.09
S6/5	2.80	2.73	2.63	2.72 ± 0.08
S6/10	1.82	1.73	1.56	1.70 ± 0.13
S10/1	4.41	4.52	4.59	4.51 ± 0.09
S10/3	3.06	3.08	3.09	3.08 ± 0.02
S10/5	2.58	2.72	2.61	2.64 ± 0.08
S10/10	1.73	1.73	1.73	1.73 ± 0.00
S14/1	4.56	4.52	4.59	4.56 ± 0.04
S14/3	3.03	3.16	3.27	3.16 ± 0.12
S14/5	2.54	2.73	2.60	2.62 ± 0.10
S14/10	2.01	2.00	1.90	1.97 ± 0.06

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 2 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
Control	11.85	11.73	12.24	11.94 ± 0.27
C6/1	2.99	2.96	3.02	2.99 ± 0.03
C6/3	2.61	2.59	2.52	2.57 ± 0.05
C6/5	2.05	2.03	2.05	2.04 ± 0.01
C10/1	3.05	2.97	3.08	3.03 ± 0.06
C10/3	2.47	2.72	2.41	2.53 ± 0.17
C10/5	2.17	2.13	2.08	2.13 ± 0.04
C14/1	3.11	3.19	3.01	3.10 ± 0.09
C14/3	2.54	2.63	2.59	2.59 ± 0.05
C14/5	2.08	2.18	2.28	2.18 ± 0.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการดึงขนาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง ที่มีระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ทดสอบครั้งที่ 1 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 2 (MPa)	ทดสอบครั้งที่ 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
Control	L,T	11.85	11.73	12.24	11.94 ± 0.27
SU5	L	17.44	17.70	16.87	17.34 ± 0.43
	T	1.85	1.61	1.82	1.76 ± 0.13
SU10	L	13.90	14.13	13.67	13.90 ± 0.24
	T	2.03	2.09	2.07	2.06 ± 0.03
SB5	L,T	15.52	16.05	16.23	15.93 ± 0.37
SB10	L,T	13.74	13.65	13.08	13.49 ± 0.36
CU5	L*	28.80	31.93	28.46	29.73 ± 1.91
	T	3.27	3.03	3.03	3.11 ± 0.14
CU10	L*	24.25	24.18	24.23	24.22 ± 0.04
	T	4.67	4.28	4.99	4.64 ± 0.35
CB5	L,T*	28.30	28.90	27.68	28.29 ± 0.61
CB10	L,T*	22.63	22.77	22.34	22.58 ± 0.22

*ยางขาดแต่เส้นใยไม่ขาดและเส้นใยหลุดออกจากชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 2 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 3 Elongation %	ค่าเฉลี่ย Elongation %
Standard	784.00	786.00	788.00	786.00 ± 2.00
S6/1	620.00	620.00	620.00	620.00 ± 0.00
S6/3	556.00	554.00	555.20	555.07 ± 1.01
S6/5	500.00	500.00	500.00	500.00 ± 0.00
S6/10	362.00	359.20	360.00	360.40 ± 1.44
S10/1	576.00	580.00	580.00	578.67 ± 2.31
S10/3	537.60	538.00	542.00	539.20 ± 2.43
S10/5	500.00	498.00	500.00	499.33 ± 1.15
S10/10	348.00	344.00	344.00	345.33 ± 2.31
S14/1	580.00	584.00	586.00	583.33 ± 3.06
S14/3	526.00	528.00	527.20	527.07 ± 1.01
S14/5	480.00	482.00	480.00	480.67 ± 1.15
S14/10	340.00	340.00	340.00	340.00 ± 0.00

ตารางที่ ๓.2 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ขีดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 2 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 3 Elongation %	ค่าเฉลี่ย Elongation %
Control	784.00	786.00	788.00	786.00 ± 2.00
C6/1	258.00	262.00	260.00	260.00 ± 2.00
C6/3	200.00	194.00	196.00	196.67 ± 3.06
C6/5	124.00	123.20	126.00	124.40 ± 1.44
C10/1	216.00	215.20	214.00	215.07 ± 1.01
C10/3	156.00	155.20	152.80	154.67 ± 1.67
C10/5	116.00	120.00	114.00	116.67 ± 3.06
C14/1	188.00	188.00	192.00	189.33 ± 2.31
C14/3	144.00	146.00	148.00	146.00 ± 2.00
C14/5	111.20	116.00	111.20	112.80 ± 2.77

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.3 ผลการทดสอบค่าความยาวที่ยืดออกจนขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว และแบบสองทิศทาง ที่มีระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ทดสอบครั้งที่ 1 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 2 Elongation %	ทดสอบครั้งที่ 3 Elongation %	ค่าเฉลี่ย Elongation %
Control	L,T	784.00	786.00	788.00	786.00 ± 2.00
SU5	L	288.00	284.00	284.00	285.33 ± 2.31
	T	543.60	548.00	544.00	545.20 ± 2.43
SU10	L	294.00	295.60	298.00	295.87 ± 2.01
	T	640.00	646.00	642.00	642.67 ± 3.06
SB5	L,T	610.00	608.00	611.20	609.73 ± 1.62
SB10	L,T	304.00	298.00	302.00	301.33 ± 3.06
CU5	L*	20.00	20.00	20.00	20.00 ± 0.00
	T	658.00	660.00	656.00	658.00 ± 2.00
CU10	L*	20.00	20.00	20.00	20.00 ± 0.00
	T	689.00	690.00	695.00	691.33 ± 3.21
CB5	L,T*	20.00	20.00	16.00	18.67 ± 2.31
CB10	L,T*	20.00	20.00	20.00	20.00 ± 0.00

*ขนาดเส้นใยไม่ขาดและเส้นใยหลุดออกจากชิ้นงาน (ความสามารถในการยึดของวัสดุคอมโพสิตมีค่าต่ำตามวัสดุที่นำมาเสริมแรง)

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบค่า Modulus of elasticity 100 % เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่า Modulus of elasticity 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 2 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 3 Modulus 100 %	ค่าเฉลี่ย Modulus 100 %
Control	0.17	0.19	0.19	0.19±0.01
S6/1	0.35	0.36	0.38	0.36±0.01
S6/3	0.61	0.65	0.64	0.63±0.02
S6/5	0.75	0.72	0.71	0.73±0.02
S6/10	0.98	1.02	1.01	1.00±0.02
S10/1	0.32	0.35	0.36	0.34±0.02
S10/3	0.69	0.62	0.73	0.68±0.06
S10/5	0.73	0.74	0.73	0.73±0.01
S10/10	1.02	1.11	1.05	1.06±0.05
S14/1	0.380	0.348	0.352	0.36±0.02
S14/3	0.67	0.70	0.69	0.69±0.01
S14/5	0.78	0.75	0.72	0.75±0.03
S14/10	1.00	1.01	1.31	1.11±0.17

ตารางที่ ซ.2 ผลการทดสอบค่า Modulus of elasticity 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 2 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 3 Modulus 100 %	ค่าเฉลี่ย Modulus 100 %
Control	0.17	0.19	0.19	0.19±0.01
C6/1	1.58	1.56	1.60	1.58±0.02
C6/3	1.73	1.75	1.17	1.55±0.33
C6/5	1.84	1.81	1.88	1.84±0.03
C10/1	1.62	1.67	1.54	1.61±0.07
C10/3	1.78	1.76	1.79	1.78±0.01
C10/5	1.94	1.93	1.97	1.95±0.02
C14/1	1.65	1.50	1.69	1.62±0.10
C14/3	1.76	1.84	1.79	1.80±0.04
C14/5	2.24	2.13	2.26	2.21±0.07

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบค่า Modulus of elasticity 100 % ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มม. และ 10 มม.

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ทดสอบครั้งที่ 1 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 2 Modulus 100 %	ทดสอบครั้งที่ 3 Modulus 100 %	ค่าเฉลี่ย Modulus 100 %
Control	L,T	0.17	0.19	0.19	0.19±0.01
SU5	L	17.44	17.70	16.87	17.34±0.42
	T	0.15	0.13	0.15	0.15±0.01
SU10	L	13.90	14.13	13.66	13.90±0.24
	T	0.17	0.15	0.15	0.16±0.01
SB5	L,T	15.52	16.05	16.23	15.93±0.37
SB10	L,T	13.74	13.65	13.08	13.49±0.36
CU5	L*	-	-	-	-
	T	0.18	0.17	0.17	0.17±0.01
CU10	L*	-	-	-	-
	T	0.17	0.18	0.18	0.17±0.01
CB5	L,T*	-	-	-	-
CB10	L,T*	-	-	-	-

*ขนาดเส้นใยไม่ขาดและเส้นใยหลุดออกจากชิ้นงาน (ไม่สามารถวัดค่ามอดูลัสที่ 100 % ได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถยึดได้ถึง 5 cm.)

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาด เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 2 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 3 (N/mm)	ค่าเฉลี่ย (N/mm)
Control	20.26	19.80	21.82	20.63 ± 1.06
S6/1	18.69	18.65	19.84	19.06 ± 0.68
S6/3	21.67	22.85	23.12	22.55 ± 0.77
S6/5	26.89	27.92	26.78	27.20 ± 0.63
S6/10	31.62	28.72	28.27	29.54 ± 1.82
S10/1	21.55	20.87	20.60	21.01 ± 0.49
S10/3	27.81	27.68	28.40	27.96 ± 0.38
S10/5	31.89	31.51	27.85	30.42 ± 2.23
S10/10	35.02	35.28	35.35	35.22 ± 0.17
S14/1	23.42	25.25	24.38	24.35 ± 0.92
S14/3	33.99	33.57	32.96	33.51 ± 0.52
S14/5	34.92	34.45	35.18	34.85 ± 0.37
S14/10	36.39	35.71	35.97	36.02 ± 0.34

ตารางที่ ซ.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการนิกษาคของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใย และปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ทดสอบครั้งที่ 1 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 2 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 3 (N/mm)	ค่าเฉลี่ย (N/mm)
Control	20.26	19.80	21.82	20.63±1.06
C6/1	27.66	27.89	26.97	27.51 ±0.48
C6/3	34.14	33.00	34.31	33.82 ±0.71
C6/5	38.15	37.93	39.14	38.41 ±0.64
C10/1	29.45	28.07	28.88	28.80 ±0.69
C10/3	35.74	35.97	36.31	36.01 ±0.29
C10/5	40.57	40.25	40.35	40.39 ±0.16
C14/1	29.57	29.68	27.97	29.07 ±0.96
C14/3	38.96	37.24	38.88	38.36 ±0.97
C14/5	49.56	52.09	52.20	51.28 ±1.49

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการนิกขาดของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียว และแบบสองทิศทาง ที่มีระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ทดสอบครั้งที่ 1 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 2 (N/mm)	ทดสอบครั้งที่ 3 (N/mm)	ค่าเฉลี่ย (N/mm)
Control	L,T	20.26	19.80	21.82	20.63±1.06
SU5	L	28.69	30.36	27.92	28.99 ± 1.25
	T	12.28	13.69	14.11	13.36 ± 0.96
SU10	L	39.37	36.66	38.91	38.31 ± 1.45
	T	17.47	19.13	19.06	18.55 ± 0.94
SB5	L,T	26.11	25.92	26.92	26.32 ± 0.53
SB10	L,T	21.32	20.18	22.43	21.31 ± 1.13
CU5	L	39.71	40.40	42.37	40.83 ± 1.38
	T	17.93	18.04	19.87	18.61 ± 1.09
CU10	L	56.56	57.72	55.81	56.70 ± 0.96
	T	22.05	22.74	20.36	21.72 ± 1.22
CB5	L,T	31.93	28.18	29.60	29.90 ± 1.89
CB10	L,T	22.83	23.58	23.72	23.38 ± 0.48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดสอบค่าความแข็ง

เพื่อหาความยาว ปริมาณ และทิศทางการจัดเรียงตัวที่เหมาะสม

ตารางที่ ฉ.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใย ต่าง ๆ

ตัวอย่าง	คู่มครั้งที่ 1 (shore A)	คู่มครั้งที่ 2 (shore A)	คู่มครั้งที่ 3 (shore A)	คู่มครั้งที่ 4 (shore A)	คู่มครั้งที่ 5 (shore A)	ค่าเฉลี่ย (shore A)
Control	32.10	32.80	32.80	32.30	32.40	32.48 ± 0.31
S6/1	42.30	40.60	40.10	41.90	36.90	40.36 ± 2.13
S6/3	43.20	37.60	41.90	44.70	43.80	42.24 ± 2.79
S6/5	45.50	47.10	44.80	46.20	45.70	45.86 ± 0.86
S6/10	45.40	45.20	48.70	49.50	51.50	48.06 ± 2.71
S10/1	39.20	40.70	40.70	40.60	42.00	40.64 ± 1.00
S10/3	43.10	41.50	40.90	42.10	42.90	42.10 ± 0.93
S10/5	42.30	47.50	44.50	47.00	45.80	45.42 ± 2.10
S10/10	49.40	45.90	48.80	50.30	47.70	48.42 ± 1.70
S14/1	39.80	38.80	41.10	40.70	40.70	40.22 ± 0.93
S14/3	42.90	43.00	42.40	40.00	42.70	42.20 ± 1.25
S14/5	47.00	48.60	43.80	45.50	44.50	45.88 ± 1.94
S14/10	48.60	48.80	47.10	44.90	52.30	48.34 ± 2.71

ตารางที่ ฅ.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ความยาวของเส้นใย และปริมาณ เส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	สุ่มครั้งที่ 1 (shore A)	สุ่มครั้งที่ 2 (shore A)	สุ่มครั้งที่ 3 (shore A)	สุ่มครั้งที่ 4 (shore A)	สุ่มครั้งที่ 5 (shore A)	ค่าเฉลี่ย (shore A)
Control	32.10	32.80	32.80	32.30	32.40	32.48 ± 0.31
C6/1	43.10	40.90	43.40	42.70	40.70	42.16 ± 1.27
C6/3	45.00	46.40	44.70	47.60	45.50	45.84 ± 1.18
C6/5	48.80	49.10	49.20	48.30	48.80	48.84 ± 0.35
C10/1	42.30	40.90	42.40	41.90	43.80	42.26 ± 1.05
C10/3	45.90	47.50	45.80	43.90	46.20	45.86 ± 1.29
C10/5	47.00	46.80	48.60	51.20	48.00	48.32 ± 1.77
C14/1	42.30	43.20	41.60	42.40	42.50	42.40 ± 0.57
C14/3	46.00	44.70	45.10	46.10	46.40	45.66 ± 0.72
C14/5	50.10	49.20	48.40	48.20	46.80	48.54 ± 1.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฌ.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ด้วยรังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม และวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วย รังสีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน จัดเรียงตัวแบบทิศทางเดียวและ แบบสองทิศทาง ที่มีระยะห่างระหว่างเส้นใย 5 มิลลิเมตรและ10 มิลลิเมตร

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ลุ่มครั้งที่ 1 (shore A)	ลุ่มครั้งที่ 2 (shore A)	ลุ่มครั้งที่ 3 (shore A)	ลุ่มครั้งที่ 4 (shore A)	ลุ่มครั้งที่ 5 (shore A)	ค่าเฉลี่ย (shore A)
Control	L,T	32.10	32.80	32.80	32.30	32.40	32.48 ± 1.06
SU5	L,T	33.50	49.00	32.30	47.80	32.30	38.98 ± 8.62
SU10	L,T	34.60	34.40	34.10	37.00	36.60	35.34 ± 1.35
SB5	L,T	46.20	50.90	43.50	42.20	36.90	43.94 ± 5.16
SB10	L,T	34.70	33.80	32.90	38.90	39.90	36.04 ± 3.15
CU5	L,T	37.60	37.50	37.40	45.00	46.60	40.82 ± 4.58
CU10	L,T	31.20	42.40	46.60	28.30	33.30	36.36 ± 7.78
CB5	L,T	51.90	51.80	38.00	38.40	49.40	45.90 ± 7.10
CB10	L,T	33.90	36.00	38.70	33.40	36.60	35.72 ± 2.15

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุชีรา รัชญุรักษ์ เกิดวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดกรุงเทพมหานคร ฯ
สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์
มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย