



การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้จากกลูเตนข้าวสาลี
และเส้นใยธรรมชาติ

Development of Biodegradable Packaging made from
Wheat Gluten and Natural Fiber

กัลทิมา เซาว์ชาญชัยกุล
ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๓
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมเส้นใยปาล์ม และการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนจากข้าวสาลี สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบ กลูเตนจากข้าวสาลีและเส้นใยปาล์มถูกผสมและขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมระบบปิดและเครื่องอัดความดันสูง ตามลำดับ เส้นใยปาล์มถูกปรับเปลี่ยนปริมาณตั้งแต่ 0 – 15 % โดยน้ำหนัก กลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ถูกเติมปริมาณ 30 % โดยน้ำหนักของกลูเตน ผลของการเติมเส้นใยปาล์ม พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มมีผลทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเติมเส้นใยปาล์ม การเติมเส้นใยปาล์มมีผลต่อทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของกลูเตน การมีอยู่ของเส้นใยปาล์มในวัสดุเชิงประกอบช่วยขัดขวางการดูดซับน้ำของกลูเตน สูตรที่ดีที่สุดสำหรับผลการเติมเส้นใยปาล์ม โดยพิจารณาจากสมบัติและราคาต้นทุน คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 % โดยน้ำหนัก ดังนั้นทางคณะวิจัยจึงเลือกสูตรนี้ไปทำการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม วิธีการปรับปรุงผิวที่เลือกใช้ คือ การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 นาที และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอะมิโนไซเลน 5 % โดยน้ำหนักของเส้นใย จากผลการทดลอง พบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอะมิโนไซเลนมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติความต้านแรงดึงสูงสุด แต่มีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าต่ำสุด การปรับปรุงผิวเส้นใยมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าลดลง แต่มีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเส้นใยถูกปรับปรุงผิว สำหรับสูตรที่ดีที่สุดสำหรับการทำเป็นบรรจุภัณฑ์โดยการพิจารณาจากสมบัติ คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอะมิโนไซเลน สำหรับการทดสอบการแพร่ของสาร พบว่า กลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มไม่เหมาะสมที่จะนำมาสัมผัสกับอาหารที่มีความเป็นกรด เอทานอล และน้ำ แต่สามารถบรรจุอาหารที่มีไขมันได้ แคดเมียมและโลหะหนักไม่ถูกตรวจพบและมีปริมาณตะกั่วในเนื้อชิ้นงานต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

คำสำคัญ: กลูเตน/เส้นใยธรรมชาติ/บรรจุภัณฑ์/การปรับปรุงผิว/ย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ

Abstract

This research work was to study the effect of the palm fiber (PF) content and the surface treatment on mechanical and thermal properties, water absorption, and morphology of wheat gluten (WG) composites. For specimen preparation, WG and PF were mixed and processed by an internal mixer and a compression molding machine, respectively. PF loading was varied from 0 to 15 %wt. Glycerol as plasticizer was added 30 % by wt. of WG. For the effect of PF content, the increase in PF resulted in increases in tensile modulus, ultimate tensile, and impact strengths whereas %elongation at break tended to decrease. The addition of PF increased the glass transition temperature but did not affect the decomposition temperature of WG. The presence of PF interfered the water absorption of WG. The optimum formulation considered from properties and cost for the effect of PF loading was composite containing PF content of 15 %wt. Therefore, the researcher team selected this formulation to study the effect of surface treatment. The sodium hydroxide concentration of 10 %wt. with immersion time of 10 min and aminosilane treatment at 5 % by wt. of fiber were used for studying the effect of surface treatment. The result found that surface treatment with aminosilane led to the maximum tensile value whereas impact strength was minimum. Surface treatment resulted in a decrease in glass transition temperature but increased thermal stability of the composite. Water absorption of composite tended to slight change with surface treatment. The optimum formulation for the production as packaging considering properties was composite containing the treated PF by aminosilane. For the migration test, both WG and WG/PF composite were unsuitable for food contact in groups of acidic food, alcohol, and water but available the contact of fatty food. Cadmium and heavy metal were not detected. Lead content in the specimen was lower than the standard value.

Keywords: Gluten/Natural Fiber/Packaging/Surface Treatment/Biodegradable

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และขอขอบคุณสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุน อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

คณะวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กลูเตนจากข้าวสาลี	5
2.2 เส้นใยธรรมชาติ	10
2.3 วัสดุเชิงประกอบ	14
2.4 การปรับปรุงผิวเส้นใย	19
2.5 พลาสติกไฮเซออร์	23
2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	25
3. วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	28
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
4. ผลการวิจัย	43
4.1 ผลการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ	43

บทที่	หน้า
4.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกอลลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ	50
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	59
5.1 การศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกอลลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ	59
5.2 การปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกอลลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ	59
บรรณานุกรม	61
ประวัติย่อผู้วิจัย	64

บัญชีตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน	14
4.1	ปริมาณสารที่ละลายออกมาจากชิ้นงานกลูเตน วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์ม ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ทำการทดสอบตาม มอก 656-2556	58

บัญชีรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของซิสทีน	9
2.2	กลไกการเกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โปรตีน	9
2.3	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	11
2.4	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	12
2.5	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	13
2.6	ภาพพื้นผิวของเส้นใยปาล์มน้ำมัน	14
2.7	มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น	17
2.8	ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส	18
2.9	ปฏิกิริยาระหว่างลิกนินและโซเดียมไฮดรอกไซด์	20
2.10	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส	20
2.11	การตอบสนองของพอลิเมอร์ต่อพลาสติกไซเซอร์ตามทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น	24
2.12	การลดการเกิดเจลของพอลิเมอร์โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์	24
3.1	ผงกลูเตนจากข้าวสาลี จากบริษัท เจ.เอ็น.พี.ไอ. อินเตอร์เนชันแนล จำกัด	27
3.2	เส้นใยปาล์มน้ำมันจากบริษัทวิจิตรภัณฑ์ปาล์มออยล์ จำกัด	28
3.3	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน KBE903	28
3.4	แผนการดำเนินงานการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ	29
3.5	เครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด	31
3.6	ลักษณะของผสมกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลภายหลังการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด	31
3.7	เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T	32
3.8	แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	33
3.9	แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	33
3.10	เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus	34
3.11	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน	34
3.12	เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2	35
3.13	ลักษณะชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก	35

รูปที่	หน้า
3.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P	36
3.15 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer รุ่น DMA/SDTA861 ^e ของ บริษัท Mettler-Toledo จำกัด	37
3.16 เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA/DSC3+ ของ บริษัท Mettler-Toledo จำกัด	37
3.17 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบสูตรต่างๆ ถูกแช่ในน้ำกลั่นเพื่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ	38
3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV	39
3.19 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Axio Scope A ของบริษัท Carl Zeiss	41
4.1 กราฟแสดงผลของการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิวที่มีต่อค่ามอดูลัส ความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบ	43
4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบกลูเตน ที่มีปริมาณเส้นใยพอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณต่างๆ กัน	44
4.3 ภาพสัณฐานทางวิทยาของบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบ ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ กำลังขยาย 500 เท่า	45
4.4 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติม เส้นใยพอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณต่างๆ กัน ที่ผ่านการทดสอบแรง กระแทก และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ กำลังขยาย 150 เท่า	46
4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใย พอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิว เมื่อเวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน	47
4.6 กราฟ Tan δ ของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเทคนิค DMA	48
4.7 ผลของการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิวที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้วของกลูเตนในวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค DSC	48
4.8 ผลของการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ที่ไมผ่านการปรับปรุงผิวที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความ ร้อนของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยพอลิเมอร์ โดยทำการทดสอบด้วยเทคนิค TGA	49
4.9 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาในการ ปรับปรุงผิวต่างๆ กัน	50

รูปที่	หน้า
4.10 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มก่อนและหลังการผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM	52
4.11 ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบกบฏเดนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารอะมิโนไซเลน KBE903	54
4.12 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบกบฏเดนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารอะมิโนไซเลน KBE903	54
4.13 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนัก ภายหลังการทดสอบแรงกระแทก	55
4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกบฏเดนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว เมื่อเวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน	56
4.15 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบกบฏเดนที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว	56
4.16 ต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ที่ผลิตจากกบฏเดนและวัสดุเชิงประกอบกบฏเดนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก	58

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันขยะพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มาจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวถือเป็นปัญหาที่ทั่วโลกได้ให้ความสำคัญ เนื่องจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวส่วนใหญ่ยังคงทำมาจากพลาสติกทางการค้าซึ่งย่อยสลายได้ยาก และหากมีการจัดการกับขยะพลาสติกที่ไม่ถูกวิธีอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ขัดขวางทางระบายน้ำในชุมชนเมืองก่อให้เกิดน้ำท่วมขังเมื่อมีฝนตกหนัก ขยะพลาสติกส่วนใหญ่ที่ขาดการจัดการที่ดีจะถูกพัดพาลงสู่ทะเล ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีปริมาณขยะในทะเลเป็นอันดับที่ 6 ของโลก ซึ่งขยะส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติกที่มาจากบรรจุภัณฑ์ [1] เช่น ขวดน้ำพลาสติก กล่องโฟมใส่อาหาร ถุงพลาสติก เป็นต้น ปัจจุบันขยะพลาสติกได้กลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สัตว์ทะเลเกิดการเสียชีวิตเนื่องจากกินขยะพลาสติกเหล่านี้เข้าไปในร่างกายแล้วไม่สามารถย่อยได้ แนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะพลาสติก คือ การส่งเสริมให้เกิดการนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว กลุ่มนี้เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่ได้มาจากพืช และสามารถย่อยสลายได้ง่ายด้วยวิธีการทางชีวภาพ จึงถือว่าเป็นตัวเลือกที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากเมื่อถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพแล้วไม่มีการปลดปล่อยสารพิษ มีราคาไม่แพง มีสมบัติการรับแรงที่ดี และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติก [2-3] แต่อย่างไรก็ตาม กลุ่มนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ค่อนข้างยาก มีสมบัติค่อนข้างเปราะ และทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) สูง จากงานวิจัยจำนวนหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า การเติมพลาสติกไฮเซอรอลลงในกลุ่มนี้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป และเพิ่มความเหนียว แต่มีผลทำให้ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงทางกลลดลง [3-5] ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีแนวคิดนำเส้นใยธรรมชาติเข้ามามีส่วนช่วยในการเสริมแรงให้กับกลุ่มที่มีการเติมสารพลาสติกไฮเซอรอล เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพเช่นเดียวกัน มีราคาถูก และเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถผลิตขึ้นได้เองตามธรรมชาติ นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ในโมเลกุลของโปรตีนกลุ่มนี้ได้ จากการพิจารณาเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศไทย เส้นใยปาล์มถือเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเส้นใยปาล์มมีความเหนียว และสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] พบว่า เมื่อทำการปรับปรุงผิว

เส้นใยพาล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ผิวของเส้นใยพาล์มเกิดรูพรุนขึ้นที่ผิว ซึ่งมีส่วนช่วยในการเสริมการยึดเกาะระหว่างเฟสของเมทริกซ์และเส้นใยพาล์ม

โครงการวิจัยนี้มีเป็นการผลิตและพัฒนาชิ้นงานบรรจุภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติที่ย่อยสลายได้โดยใช้โปรตีนกลูเตนและเส้นใยพาล์ม โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยพาล์ม โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยพาล์ม และทำการประเมินสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางกายภาพ และทางสัณฐานวิทยา และส่วนที่สองเป็นการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ด้วยการปรับปรุงผิวเส้นใยพาล์ม และทำการประเมินสมบัติ และเลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบสูตรที่เหมาะสมมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยพาล์มน้ำมันที่มีต่อการพัฒนาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยพาล์มน้ำมันที่มีผลต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางกายภาพ และทางสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์กลูเตน
- 1.2.3 เพื่อหาสูตรกลูเตนและเส้นใยพาล์มสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย กลูเตนจากข้าวสาลี กลีเซอรอล เส้นใยพาล์ม โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารไซเลน
- 1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และเครื่องอัดความดันสูง (Compression molding machine)
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณของเส้นใยพาล์ม และวิธีการของการปรับปรุงผิวเส้นใยพาล์ม
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
 - สมบัติทางกล ตามมาตรฐาน ASTM
 - สมบัติทางกายภาพ
 - สมบัติทางความร้อน
 - การแพร่ของสารจากภาชนะ

- สันฐานวิทยา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน

1.4.1 การศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ

ทำการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมระหว่างกลูเตน และเส้นใยปาล์ม ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 % โดยน้ำหนักของกลูเตน เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม 3 อัตราส่วน และทำการผสมกลูเตน เส้นใยปาล์ม และกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมระบบปิด และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทำการทดสอบประเมินสมบัติทางกล ทางกายภาพ ทางความร้อน และสันฐานวิทยา

1.4.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

สำหรับงานวิจัยส่วนนี้เริ่มต้นจากการเลือกสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมของกลูเตน กลีเซอรอล และเส้นใยปาล์ม น้ำมันจากงานวิจัยในหัวข้อที่ 1.4.1 มาทำการศึกษา โดยทำการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม น้ำมันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารไซเลน หลังจากนั้นจึงนำเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วมาทำผสมกับกลูเตนและกลีเซอรอล และทำการผสมและขึ้นรูป และทดสอบสมบัติ หลังจากนั้นเลือกสูตรที่เหมาะสมมาทำการทดสอบการแพร่ของสารจากภาชนะ รวมถึงทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – เสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการผลของปริมาณเส้นใยปาล์มและการปรับปรุงผิวเส้นใยที่มีต่อสมบัติของกลูเตน ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้ และทักษะทางการวิจัยให้กับนักวิจัยไทย

1.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – ส่งเสริมทำให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.5.3 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ – ภาควิชาอุตสาหกรรมสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ

1.5.4 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้เชิงวิชาการในรูปแบบของการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการ และ/หรือการประชุมวิชาการ ภายหลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัย

1.5.5 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ – กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ
และ/หรือกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลูเตนจากข้าวสาลี (Wheat gluten)

โปรตีนที่มาจากพืชและสัตว์สามารถนำมาทำเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ได้ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่แข็งแรง สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการพลาสติก และสามารถที่ยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายชนิด เพราะมีกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์และที่ไม่มีซัลเฟอร์ โปรตีนจึงมักถูกนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite) หรือนำมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อทำให้สมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ในยุคแรกๆ ของการนำโปรตีนมาผลิตเป็นพลาสติกเริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ปี 1930 โดยโปรตีนที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพเป็นโปรตีนที่มาจากพืช คือ โปรตีนเคซีน (Casein) ในนมถั่วเหลือง และโปรตีนเซอีนของข้าวโพด (Corn zein) โปรตีนมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เพราะสามารถปรับสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานได้ในช่วงกว้าง และมีความคงรูปร่าง และโปรตีนที่ได้มาจากพืชยังมีราคาถูก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ มีปริมาณมาก และสามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ ดังนั้นโปรตีนที่มาจากพืชจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ในปัจจุบันฟิล์มทางการเกษตรและทางการแพทย์ผลิตขึ้นมาจากโปรตีนที่มาจากพืช (กลูเตน และเซอีน) และโปรตีนที่มาจากสัตว์ (เช่น คอลลาเจน เจลาติน และไมโอไฟบริล เป็นต้น) ตัวอย่างเช่น ฟิล์มที่ทำมาจากโปรตีนเคซีนจากข้าวโพดได้ถูกนำไปใช้เพื่อเก็บรักษาอาหารแห้งและสด วิตามิน และการใช้งานในทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการปลดปล่อยยา และการนำโปรตีนจากถั่วเหลืองผสมกับพินอลพอร์มอลดีไฮด์เรซินมาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ [8]

2.1.1 โปรตีนจากข้าวสาลี [8] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ อ้างอิงจากสมบัติความสามารถในการละลาย ดังนี้

1. โปรตีนที่ไม่ใช่กลูเตน ประกอบด้วย อัลบูมิน (albumin) และโกลบูลิน (globulin) คิดสัดส่วนเป็น 15% ของโปรตีนข้าวสาลี อัลบูมินสามารถละลายในน้ำได้ ในขณะที่โกลบูลินสามารถละลายได้ในสารละลายน้ำเกลือแบบเจือจาง
2. โปรตีนกลูเตนจากข้าวสาลี สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย โดยพิจารณาจากความสามารถในการละลายและความสามารถในการสกัดด้วยแอลกอฮอล์ คือ โปรตีนที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ คือ โกลอะดีน (Gliadin) และโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ คือ กลูเตนิน (Glutenin) โปรตีนกลูเตนมีความสามารถในการละลายน้ำและสารละลายน้ำเกลือเจือจางได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อ

เปรียบเทียบกับกรดอะมิโนที่มีสายโซ่แขนงที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ เนื่องจากการมีอยู่ของกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้ว พฤติกรรมการละลายที่ต่ำของโปรตีนกลูเตนยังเกิดได้มาจากการมีสารตกค้างกลูตามีน (glutamine residue) และสารตกค้างโพรลีน (proline residue) ในปริมาณที่สูงซึ่งสารตกค้างเหล่านี้มีสายโซ่แขนงที่ไม่มีขั้ว

- ไกลอะดิน

ไกลอะดินเป็นหนึ่งในสองชนิดโปรตีนที่อยู่ในกลูเตนจากข้าวสาลี ไกลอะดินเป็นโปรตีนสายโซ่เดี่ยว และน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 30,000 – 60,000 ดัลตัน ไกลอะดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โครงสร้าง คือ α/β - γ - และ ω ซึ่งทั้ง 3 โครงสร้างมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แตกต่างกันตรงที่สารตกค้างกรดอะมิโน

- กลูเตนิน

กลูเตนินเป็นโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลูเตนจากข้าวสาลี และประกอบด้วยของผสมของพอลิเพปไทด์ โปรตีนกลูเตนินเป็นโปรตีนตามธรรมชาติที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ที่สุด น้ำหนักโมเลกุลของกลูเตนินอยู่ในช่วง 8,000 ถึงหลายล้านดัลตัน โครงสร้างกลูเตนินเป็นพอลิเพปไทด์ โดยสายโซ่เพปไทด์เชื่อมโยงระหว่างกันโดยทางระหว่างสายโซ่ และบางครั้งเกิดขึ้นภายในสายโซ่ด้วยการเชื่อมโยงไดซัลไฟด์ (disulphide)

กลูเตนิน ถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย ดังนี้

1. กลูเตนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-GS)

กลูเตนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีสัดส่วนคิดเป็น 30 % ของโปรตีนกลูเตนจากข้าวสาลีทั้งหมด LMW-GSประกอบด้วย 2 โดเมน คือ โดเมน N-terminal ซึ่งมีปริมาณของสารตกค้างกลูตามีน และสารตกค้างโพรลีน ในปริมาณที่สูง และโดเมน C-terminal ซึ่งมีโครงสร้างและองค์ประกอบของกรดอะมิโนคล้ายกับ α - β - และ γ -ไกลอะดิน LMW-GS มีสารตกค้างซิสเทอีน (Cysteine residue) 8 ตัว โดย 6 ชนิดจากสารตกค้างซิสเทอีนมีการสร้างพันธะภายในสายโซ่ที่ตำแหน่งคล้ายกับ α - β - และ γ -ไกลอะดิน ส่วนสารตกค้างซิสเทอีน 2 ชนิดจะมีลักษณะพันธะที่เป็นเอกลักษณ์ของ LMW-GS ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับพันธะชนิดอื่นใด

2. กลูเตนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMW-GS)

ปริมาณกลูเตนินน้ำหนักโมเลกุลมีอยู่ที่ประมาณ 10-12 %ของโปรตีนกลูเตนจากข้าวสาลีทั้งหมด สมบัติวิสโคอิลาสติกของกลูเตนจากข้าวสาลีส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับ HMW-GS องค์ประกอบ

ของ HMW-GS จะเป็นตัวกำหนดสมบัติสโคลิกอสติกของโดกลูเตนจากข้าวสาลี การเพิ่มจำนวนของ HMW-GS มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรง และโครงสร้างของกลูเตนจากข้าวสาลี ยิ่งไปกว่านั้น การใช้พันธุวิศวกรรมและการเปลี่ยนแปลงทางสายพันธุ์ข้าวสาลีถือเป็นเครื่องมือส่วนสำคัญในการปรับปรุงการใช้กลูเตนในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ

2.1.2 กลูเตนจากข้าวสาลี

กลูเตนเป็นโปรตีนที่สามารถผลิตได้จากธัญพืชชนิดต่างๆ เช่น ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวไรท์ ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด แต่โดยทั่วไปแล้วกลูเตนจะผลิตมาจากข้าวสาลี กลูเตนจากข้าวสาลีเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่ได้มาจากอุตสาหกรรมอาหาร [3] กลูเตนจากข้าวสาลีสามารถถูกนำไปใช้งานได้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและไม่ใช่อาหาร เช่น การผลิตเครื่องสำอาง สารทำความสะอาด ยาง และพอลิเมอร์ เป็นต้น [8] กลูเตนจากข้าวสาลีเกิดจากการรวมตัวกันของโปรตีนกลูเตนิน และไกลอะดิน โดยการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) ระหว่างกัน [6] กลูเตนมีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) เนื่องจากกลูเตนินมีสมบัติยืดหยุ่น (Elastic properties) ในขณะที่ไกลอะดินแสดงสมบัติไหลหนืด (Viscous properties) [7] ดังนั้นกลูเตนข้าวสาลีจึงเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นฟิล์มที่ย่อยสลายได้ เพราะกลูเตนจากข้าวสาลีมีสมบัติการรับแรงที่ดี และสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์โดยปราศจากการปลดปล่อยสารพิษ [3] กลูเตนจากข้าวสาลีสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มและพลาสติกด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกโดยการผสมด้วยวิธีทางกล และให้ความร้อนขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ แต่การที่กลูเตนข้าวสาลีจะขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปของพลาสติกแบบดั้งเดิมได้นั้นจำเป็นต้องมีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ เพราะกลูเตนข้าวสาลีที่ไม่มีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้ขึ้นงานเปราะ และขึ้นรูปเป็นขึ้นงานได้ยาก สารพลาสติกไซเซอร์มีหน้าที่ช่วยลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุล และนำไปสู่การลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตนข้าวสาลีซึ่งส่งผลทำให้สามารถใช้อุณหภูมิในการขึ้นดแต่ต่ำลงได้ กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกลุ่มที่ชอบน้ำซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการขึ้นรูปของโปรตีนแบบเทอร์โมพลาสติก [3] สำหรับสมบัติการเป็นตัวกันความชื้นของฟิล์มโปรตีนสามารถถูกปรับปรุงได้อย่างมากด้วยการเติมสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น ไขมัน กรดไขมันที่อิ่มตัวที่เป็นสายโซ่ยาว โมโนกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ หรือโดยการผ่านเทคโนโลยีการเคลือบผิว การมีอยู่ของน้ำมันหรือไขมันในฟิล์มโปรตีนมีส่วนช่วยลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่โปรตีนจึงมีส่วนช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น และมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของฟิล์มลดลง [4-6]

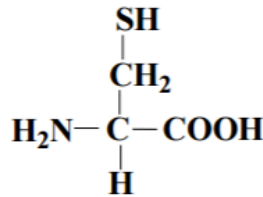
สมบัติของกลูเตนจากข้าวสาลี [3, 7-9]

- มีสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก
- มีสมบัติการรับแรงที่ดี
- กลูเตนสามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์โดยปราศจากการปลดปล่อยสารพิษ จึงจัดว่าเป็นวัสดุฐานชีวภาพที่ไม่มีอันตราย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยของ Domenek และคณะ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากกลูเตนเมื่อนำไปฝังดินสามารถเกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ ใช้เวลาเพียง 50 วัน ดังนั้นกลูเตนจึงเป็นพลาสติกฐานชีวภาพที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาทำเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์
- สมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดี
- มีเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ เช่น แป้ง เซลลูโลส เป็นต้น
- สมบัติการดูดซับน้ำสูง หรือมีสมบัติการป้องกันการซึมของน้ำต่ำ
- สมบัติของความยืดหยุ่นหรืออิลาสติก และสมบัติการยึดเกาะระหว่างกัน (Cohesive property) ของกลูเตน ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของกลูเตนิน ถ้าปริมาณกลูเตนินในกลูเตนมีปริมาณมากมีผลทำให้กลูเตนมีความยืดหยุ่นมาก และมีความต้านทานความแรงกระทำที่ดี
- สมบัติการไหลตัวได้ดีของกลูเตนนั่นขึ้นอยู่กับปริมาณไกลอะดิน โดยไกลอะดินจะกระทำตัวเป็นสารพลาสติกไซเซอร์เมื่อกลูเตนผสมกับน้ำ
- กลูเตนสามารถสร้างพันธะการเชื่อมโยงแบบโครงร่างตาข่ายที่ซับซ้อนได้ด้วยการเชื่อมโยงแบบไดซัลไฟด์เหมือนกับที่เกิดขึ้นในเทอร์โมเซต ช่วยทำให้กลูเตนสามารถขึ้นรูปฟิล์ม และขึ้นงานพลาสติกได้ เมื่อมันถูกทำให้เกิดการหลอมตัว

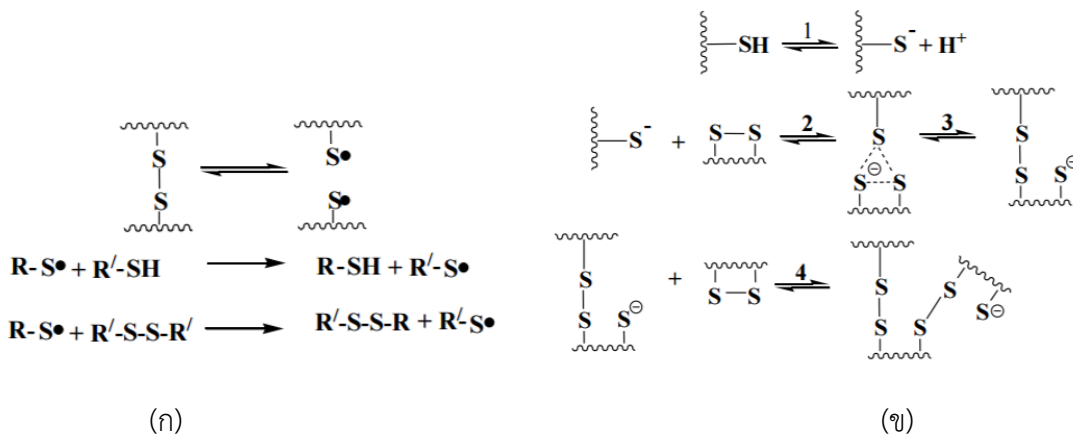
การสร้างพันธะการเชื่อมโยงแบบโครงร่างตาข่ายของกลูเตน

กลูเตนเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลากหลายชนิด แต่กรดอะมิโนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและสมบัติของกลูเตน คือ ซีสทีน (Cystine) ถึงแม้ซีสทีนจะมีอยู่เพียง 2 %โมล ทั้งนี้เพราะซีสทีนมีหมู่ไทออล (Thiol group, SH) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างสายโซ่โปรตีนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กลไก คือ กลไกเรดิคัล (Radical mechanism) และกลไกนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic mechanism) ซึ่งทั้ง 2 กลไกนี้สามารถเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปกลูเตนด้วยวิธีเดียวกับเทอร์โมพลาสติกซึ่งได้รับทั้งความร้อนและแรงเฉือน [6,7]

การเชื่อมโยงของสายโซ่โปรตีนมีผลต่อสมบัติของกลูเตน สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการเชื่อมโยง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ชนิดของ พลาสติไซเซอร์ และสารเติมแต่ง เป็นต้น [6]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของซิสทีน [6]



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โปรตีน [6]

(ก) กลไกแรดิคัล

(ข) กลไกนิวคลีโอฟิลิก

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบโครงสร้างตาข่าย [6]

1. อิทธิพลของพลาสติไซเซอร์: กรณีการใช้กรดแลคติก (Lactic acid) หรือกรดออกทานอิก (Octanoic acid) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีผลทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตนเกิดลดลง ทั้งนี้เพราะการเติมกรดแลคติก หรือกรดออกทานอิกลงในกลูเตนมีผลทำให้กลูเตนอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ซัลเฟอร์แอนไอออนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกลไกนิวคลีโอฟิลิก ในรูปที่ 2.2 (ข) จึงถูกยับยั้ง
2. อิทธิพลของอุณหภูมิ: ความร้อนในระหว่างกระบวนการผสม หรือขึ้นรูปกลูเตนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตน เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจะไปเหนี่ยวนำทำให้สายโซ่

โปรตีนที่ขดเป็นเกลียวเกิดการคลายเกลียว มีผลทำให้การเชื่อมขวางของสายโซ่กลูเตนผ่านพันธะไดซัลไฟด์เกิดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิการขึ้นรูปมีแนวโน้มทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่มีมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้สมบัติการรับแรงของกลูเตนมีแนวโน้มสูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง และการบวมตัวลดลง

3. อิทธิพลของสารเติมแต่ง: งานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของเติมเส้นใยธรรมชาติลงในกลูเตน ซึ่งพบว่า เส้นใยธรรมชาติสามารถเข้ากันได้กับกลูเตนได้ดี ถ้าเส้นใยธรรมชาติมีปริมาณลิกนินในปริมาณมาก ทั้งนี้เพราะลิกนินมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงสร้างร่างแหของพอลิฟีนอลิก (Polyphenolic) ซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน (interaction) กับกลูเตน ดังนั้นลิกนินจึงทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ลิกนินในเส้นใยธรรมชาติยังทำหน้าที่เป็นสารดักจับอนุมูล (Radical scavenger) ทั้งอนุมูลอิสระ (Free radical) และแอนไอออน (Anion) ซึ่งส่งผลทำให้การเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่กลูเตนเกิดลดลง เนื่องจากลิกนินจะไปดักจับอนุมูลอิสระ และแอนไอออนของกลูเตนในระหว่างการให้ความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

การปรับปรุงการป้องกันการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำของกลูเตน มีอยู่ด้วยการหลากหลายวิธี ดังนี้

1. การเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มการเกิดการเชื่อมโยงแบบโครงร่างตาข่ายให้สูงขึ้น กลูเตนมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น
2. การเติมสารพลาสติกไซเซอร์กลุ่มที่มาชอบน้ำ เช่น ปาล์มิติคคลอไรด์ (palmitic chloride) และกรดซัคซินิก (Succinic acid) ช่วยลดการดูดซึมน้ำของกลูเตน
3. การเติมซีสเทอีนลงในกลูเตน เพื่อทำให้ไกลอะดินถูกพอลิเมอไรซ์ด้วยซีสเทอีน เกิดการเชื่อมโยงแบบไดซัลไฟด์ในระหว่างสายโซ่ และภายในโมเลกุลของโปรตีนไกลอะดิน พัล์มิกกลูเตนที่ได้มีความทนต่อน้ำได้ดีขึ้น
4. การเคลือบกลูเตนด้วยพอลิแลกติกแอซิดถูกใช้ในการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์กลูเตนที่นำไปใช้บรรจุอาหารที่เป็นของแข็ง

2.2 เส้นใยธรรมชาติ

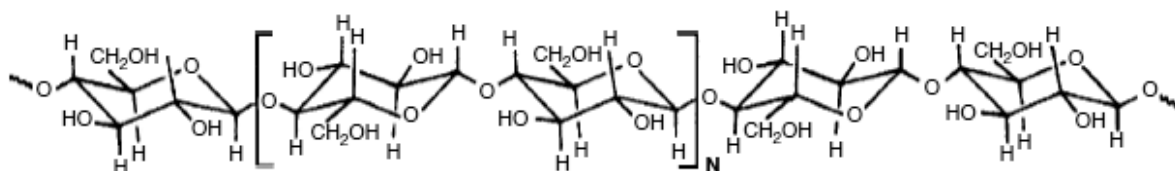
เส้นใยธรรมชาติจัดว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารสกัดและเถ้า โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่าง

ไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินนั้นถือเป็นส่วนของเปลือกด้านนอกทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง

2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [10-13]

1. เซลลูโลส (Cellulose)

องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ไม้ คือ เซลลูโลส โดยมีอยู่ประมาณ 40-50 % ในไม้แห้ง เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์โฮโมโพลีแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของ β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- β -glucosidic bonds ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี

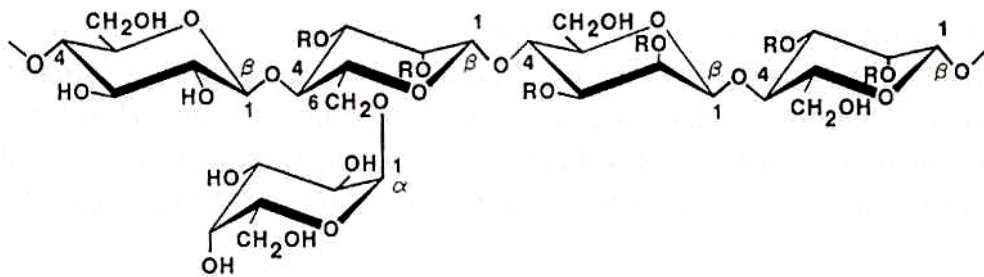


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [13]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่ง เฮมิเซลลูโลสมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 20-30 % เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose, D-galactose, D-xylose, L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4- β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมี

โครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ องค์การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของเซลลูโลสโดยธรรมชาติ แล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีองค์การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันประมาณ 200 เท่านั้น ในไม้สามารถมีเฮมิเซลลูโลสที่มีส่วนประกอบในโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ เช่น ในไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส ชนิด galactoglucomannans อยู่ประมาณ 20 % และมี Arabinoglucuronoxylan ประมาณ 5-10 % เป็นต้น **รูปที่ 2.4** เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



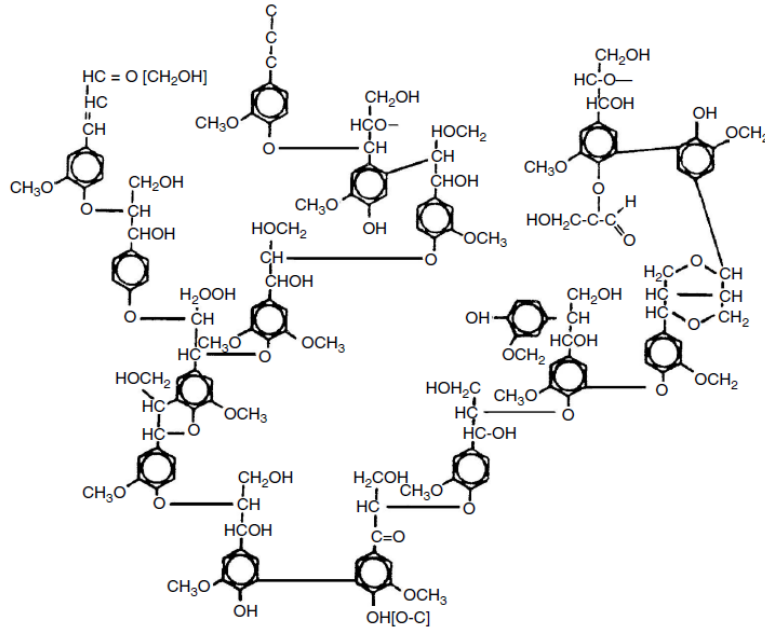
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [10]

3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมากและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 18-30 % โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่ไม่มีลิกนินอยู่ที่ชั้นผิวของผนังเซลล์ เนื่องจากไม้มีปริมาณของลิกนินอยู่มากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ ที่มาจากพืชจึงทำให้ไม้มีความแข็งแรงสูง ลิกนินสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ลิกเนส (lignase) หรือลิกนินเนส (ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในเรา โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงใน**รูปที่ 2.5**

4. สารสกัดและเถ้า (Extractives and Ash)

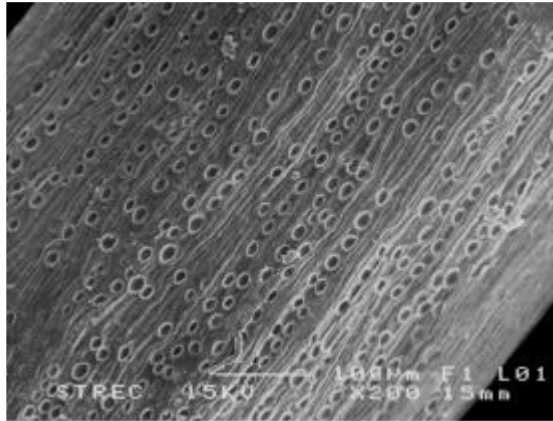
ปริมาณสารสกัดมีอยู่ในไม้ประมาณ 5-20 % โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลากหลายชนิด สารสกัดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไม้ เช่น สี กลิ่น ความต้านทานต่อการเน่าเปื่อย เป็นต้น ส่วนเถ้ามีอยู่ประมาณ 0.2-2 % โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของเถ้าในไม้ คือ แคลเซียม โพแทสเซียม และปริมาณเล็กน้อยของธาตุแมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [11]

2.2.2 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) [14-16]

ปาล์มน้ำมันที่ปลูกในประเทศไทย มีชื่อสามัญว่า African Oil Palm เนื่องจากมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. เส้นใยปาล์มน้ำมันได้มาจากทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch, EFB) เส้นใยปาล์มน้ำมันมีความแข็งและความเหนียวใกล้เคียงกับเส้นใยกามะพร้าว และบนพื้นผิวของเส้นใยปาล์มน้ำมันมีรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ขนาดของรูพรุนที่ผิวเส้นใยปาล์มมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $0.07 \mu\text{m}$ รูพรุนที่พื้นผิวของเส้นใยปาล์มนี้ช่วยทำให้เส้นใยปาล์มเกิดการยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดีขึ้น (mechanical interlocking) ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน ปริมาณเซลลูโลสที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้เส้นใยปาล์มน้ำมันมีความเหนียว แต่อย่างไรก็ตาม เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) จึงทำให้เส้นใยปาล์มดูดซับน้ำได้ดีและนั่นทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ของเมทริกซ์และเส้นใยปาล์มอ่อนแอลง และนี้อาจทำให้สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบมีสมบัติที่ไม่ดี เส้นใยปาล์มน้ำมันมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ที่ประมาณ 4.5 % ซึ่งการมีน้ำมันหลงเหลือในเส้นใยมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพทำให้เส้นใยปาล์มและพอลิเมอร์เมทริกซ์เข้ากันได้ดีขึ้น เนื่องจากหมู่เอสเทอร์ที่อยู่ในน้ำมันทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (coupling agent)



รูปที่ 2.6 ภาพพื้นผิวของเส้นใยปาล์มน้ำมัน [15]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน [14, 16]

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)
α-เซลลูโลส	36.7
เฮมิเซลลูโลส	35.8
ลิกนิน	18.6
สารสกัด	2.8
ปริมาณเถ้า	1.3

2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composites) [17]

2.3.1 ความหมายและองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่เกิดจากของผสมที่ประกอบด้วยส่วนผสมหรือเฟสตั้งแต่ 2 เฟสหรือมากกว่านั้น มีลักษณะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้การพิจารณาว่าวัสดุเป็นวัสดุเชิงประกอบหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากหลัก 3 ประการ ดังนี้

- ส่วนผสมของทั้งคู่ต้องมีอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากกว่า 5 %
- ส่วนผสมต้องมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากสมบัติของส่วนผสม เช่น ในกรณีของพลาสติก ถึงแม้ว่ามีการเติมสารเติมแต่งลงไปมากมายเพื่อช่วยในการขึ้นและเหตุผลในทางการค้า แต่พลาสติกดังกล่าวไม่ถูกเรียกว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบ
- ส่วนผสมต้องไม่ผสมกลืนกันเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งแยกเฟสอย่างชัดเจน

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีสัดส่วนที่มาก และอยู่ในลักษณะต่อเนื่องโดยปกติ แล้วสมบัติของเมทริกซ์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยส่วนผสมตัวอื่นที่นำเข้ามาผสมรวมด้วย
2. สารเสริมแรง (reinforcement, reinforcing phase) คือ ส่วนผสมที่ทำหน้าที่ส่งเสริมสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์ให้ดีขึ้น รูปร่างของสารเสริมแรงมีผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรง โดยปกติสารเสริมแรงมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรืออนุภาค

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

- สัดส่วนของส่วนผสม (volume fraction) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด กฎของการผสมเป็นดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\chi_c = \chi_m V_m + \chi_f V_f \quad (2.1)$$

โดยที่ χ_c คือ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ต้องการทราบ

χ_m คือ สมบัติที่ต้องการทราบของเมทริกซ์

χ_f คือ สมบัติที่ต้องการทราบของสารเสริมแรง

V_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์

V_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารเสริมแรง

- ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส (interface) ของเมทริกซ์และสารเสริมแรงมีบทบาทที่มีความสำคัญซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การนำกฎการผสมมาใช้ได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากต้องคำนึงความแข็งแรงและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสด้วย
- รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ขนาดของเกรนของเมทริกซ์
- สมบัติของส่วนผสมเอง

2.3.3 ความแข็งแรงระหว่างเฟส

ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเฟสที่แข็งแรงสามารถทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ มีการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังสารเสริมแรงได้โดยผ่านทางพื้นผิวระหว่างเฟส

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงระหว่างเฟส คือ

1. ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบในสถานะหนึ่งๆที่เมทริกซ์สามารถไหลได้ และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว ความสามารถในการเปียก ณ ที่นี้อธิบายเกี่ยวกับความสามารถที่ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถแพร่ขยายไปบนพื้นผิวของของแข็ง (สารเสริมแรง) ความสามารถในการเปียกที่ดีหมายความว่า ของเหลว (เมทริกซ์) สามารถไหลไปบนพื้นผิวของสารเสริมแรงปกคลุมไปทั่วทุกตำแหน่งที่ไหลไปกระทบ ณ ตำแหน่งพื้นผิวที่ไม่เรียบของสารเสริมแรง ของเหลวสามารถไหลเข้าไปแทนที่อากาศทั้งหมดได้ การเปียกเกิดขึ้นได้ถ้าความหนืดของเมทริกซ์ไม่สูงมากเกินไปและถ้าการเปียกนั้นส่งผลทำให้ค่าพลังงานอิสระ (free energy) ของระบบลดลง การกระจายตัวของของเหลวที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ต้องมีสมการเป็นดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG} \quad (2.2)$$

โดยที่ γ_{LG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ

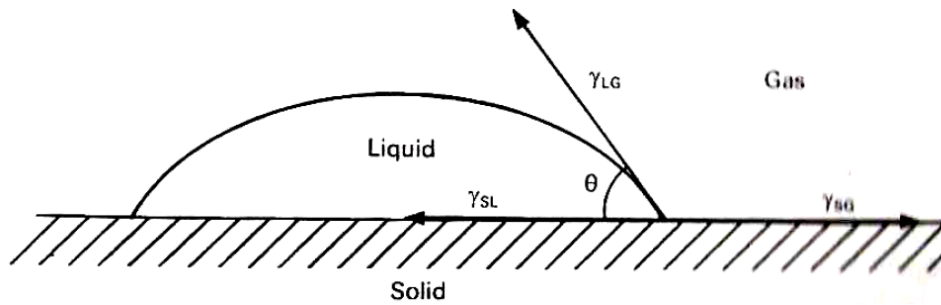
γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลว

γ_{SG} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและก๊าซ

สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (spreading coefficient, SC) เป็นดังสมการที่ 2.3 เมทริกซ์สามารถเปียกสารเสริมแรงได้ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเป็นบวก

$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.7 ค่ามุมสัมผัส (contact angle) มีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \theta < 180^\circ$ และองศาของการเปียกมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อมุม θ ลดลง และถ้ามุม $\theta > 90^\circ$ มักถือว่าของเหลวไม่สามารถเปียกของแข็งได้



รูปที่ 2.7 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว และแรงตึงผิวที่เกิดขึ้น [17]

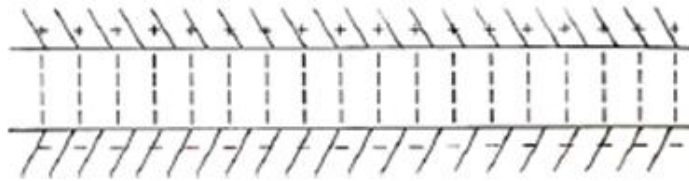
2. การยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial bonding)

เมื่อเมทริกซ์สามารถสัมผัสกับสารเสริมแรงหรือเปียกผิวสารเสริมแรงนั้น ทำให้มีพันธะระหว่างเฟสเกิดขึ้น พันธะชนิดต่างๆ อาจถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน เช่น พันธะทางเชิงกลและทางไฟฟ้า และกลไกของพันธะสามารถเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่หลากหลาย เช่น ในกรณีที่มีการนำสารคู่ควบ (coupling agent) มาใช้ในการปรับปรุงผิว

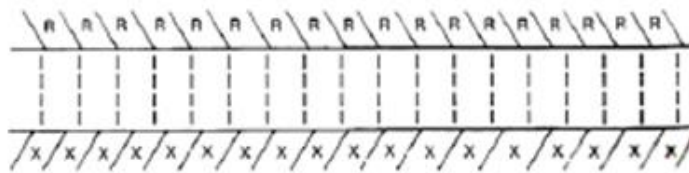
- 1) พันธะทางเชิงกล (mechanical bonding) คือ การเชื่อมต่อกันในทางเชิงกล (mechanical interlocking หรือ keying) ของสองพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) ลักษณะของพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสยังมีความขรุขระมากขึ้น ยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยการหัดตัวของเมทริกซ์บนสารเสริมแรงยิ่งทำให้พันธะทางเชิงกลเกิดได้ง่ายขึ้น พันธะทางเชิงกลจะมีประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางที่ขนานกับรอยต่อระหว่างเฟส ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นความแข็งแรงของการได้รับแรงเฉือน แต่ถ้าได้รับแรงในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างเฟส หรือการที่รอยต่อได้รับแรงดึง ความแข็งแรงระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เว้นเสียแต่ว่า ณ บริเวณรอยต่อนั้นมีลักษณะของพื้นผิวรอยต่อคล้ายกับบริเวณ A ในรูปที่ 2.8(ก) จำนวนมาก ๆ ซึ่งมีมุมแบบวกกลับเข้าไปข้างใน (re-entrant angle)
- 2) พันธะที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic bonding) คือ พันธะไฟฟ้าสถิตย์เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงที่มีพื้นผิวที่มีประจุแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าขึ้น แรงกระทำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในระยะทางการจัดเรียงของอะตอมในช่วงสั้นๆ เท่านั้น การปนเปื้อน ณ บริเวณผิวและการที่มีก๊าซถูกดักไว้ที่ผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกลไกดังกล่าวลดลง



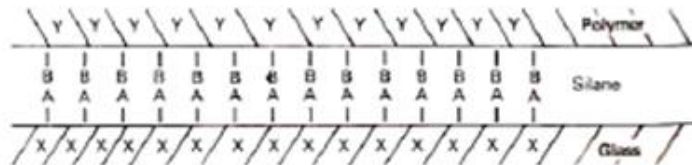
(ก)



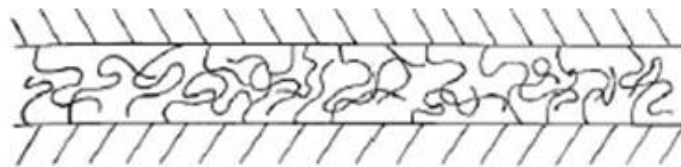
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.8 ภาพแสดงกลไกของพันธะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเฟส [17]

(ก) mechanical bonding

(ข) electrostatic bonding

(ค) chemical bonding

(ง) chemical bonding as applied to a silane coupling agent

(จ) interdiffusion bonding

- 3) พันธะทางเคมี (chemical bonding) คือ พันธะทางเคมีเกิดขึ้นจากหมู่ทางเคมีของเมทริกซ์และสารเสริมแรงสามารถเข้ากันได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.8(ค) ความแข็งแรงของพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับ ปริมาณหรือจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ และชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เมทริกซ์และสารเสริมแรงไม่มีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้กับเมทริกซ์และสารคู่ควบ เช่น สารไซเลน (silane) ซึ่งมีหมู่ทางเคมีที่สามารถเข้าได้กับเมทริกซ์และสารเสริมแรงอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล มันจึงทำ หน้าທີ່เหมือนเป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรงด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดง ในรูปที่ 2.8(ง)
- 4) พันธะที่เกิดจากการแพร่เข้าหากัน (interdiffusion bonding) คือ พันธะนี้เกิดขึ้นจากการที่สายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบทั้งสองชนิดสามารถแพร่เข้าหากันและทำให้เกิดการพันกันขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.8(จ) ความแข็งแรงของพันธะนี้ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของการพันกัน ชนิดและจำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเกิดการพันได้

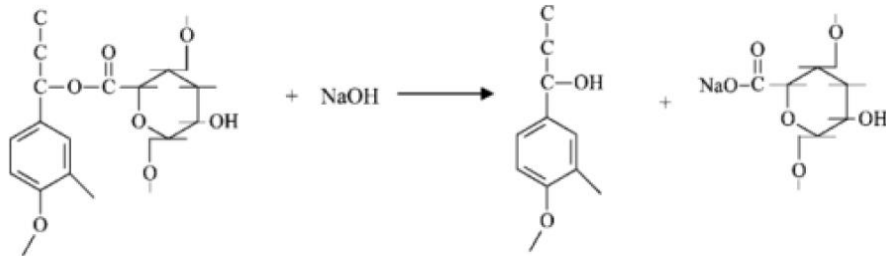
2.4 การปรับปรุงผิวเส้นใย (Surface treatment)

ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน เนื่องจากในรายวิจยฉบับนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

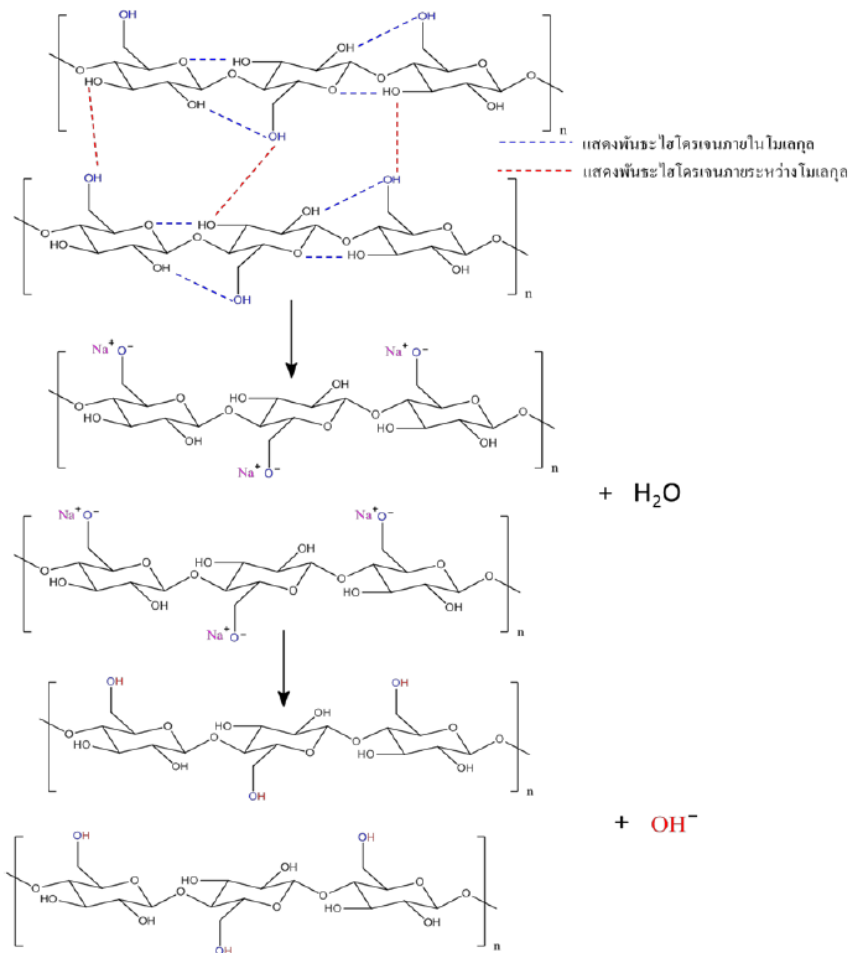
2.4.1 การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ [18-20]

การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ การทำเมอซีไรเซชัน (Mercerization) คือ การนำเส้นใยธรรมชาติมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้น เพื่อทำให้เส้นใยเกิดการบวมตัวและกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกจากเส้นใย มีผลทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ขนาด ลักษณะทางสัณฐานวิทยา รวมถึงมีสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป การที่เฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปบางส่วน โครงสร้างระหว่างไฟบริล (Interfibrilla) มีผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นและความแข็งเกร็ง (rigid) ที่ลดลง ดังนั้นเมื่อเส้นใยถูกดึงยืดจึงมีผลทำให้ไฟบริลจัดเรียงตัวตามทิศทางแรงดึงได้มากขึ้น การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของไฟบริลมีส่วนทำให้เส้นใยสามารถรับแรงได้มากขึ้น นอกจากนี้การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังมีส่วนทำให้มุมการบิดเกลียวมีมุมลดลงส่งผลทำให้การส่งผ่านแรงเกิดได้ง่ายขึ้นเส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น การกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีรายละเอียดการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 ตามลำดับ จากรูปที่ 2.9การกำจัดลิกนินเกิดจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตรงตำแหน่งหมู่เอสเทอร์ของลิกนิน มีผลทำให้โมเลกุลลิกนินมีขนาดเล็กลง และหมู่ฟังก์ชันถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่ไฮดรอก

ซิล (Hydroxyl group) และหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น ส่วนรูปที่ 2.10 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลระหว่างโมเลกุลของ เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส มีผลทำให้เฮมิเซลลูโลสละลายออกจากเส้นใย และทำให้เซลลูโลสกระจายตัว แยกออกจากกัน ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และระยะเวลาในการแช่สารละลาย



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างลิกนินและโซเดียมไฮดรอกไซด์ [20]

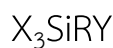


รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส [20]

2.4.2 การปรับปรุงผิวด้วยสารซิลเลน [18, 21-22]

สารซิลเลนที่มีหมู่สารอินทรีย์ (organofunctional silane) คือ สารซิลเลนที่เป็นของผสมระหว่างซิลิคอนและสารอินทรีย์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์หรือเรซิน จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นหรือสารคู่ควบระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงที่เป็นพวกแร่ธาตุหรือเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารซิลเลนมีส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเปลี่ยนไปเป็นหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ และมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นการใช้สารซิลเลนเป็นสารคู่ควบจึงมีผลทำให้พันธะระหว่างเฟสมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

โครงสร้างทางเคมีของสารซิลเลนโดยทั่วไป คือ



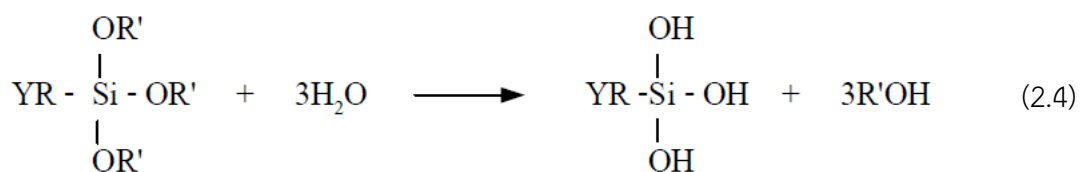
โดยที่ X คือ ตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysable groups หรือ alkoxy groups)

โดย X เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเกิดเป็นสารซิลานอล (silanol) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสได้และสามารถทำปฏิกิริยาควบแน่นกันเองได้ (self condensation)

Y คือ หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ (organofunctional group)

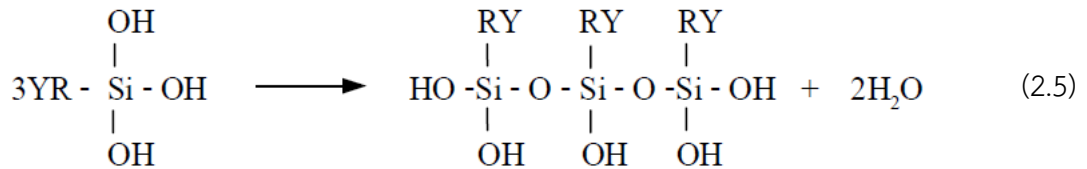
กลไกการสร้างพันธะของสารซิลเลนกับเส้นใยธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ



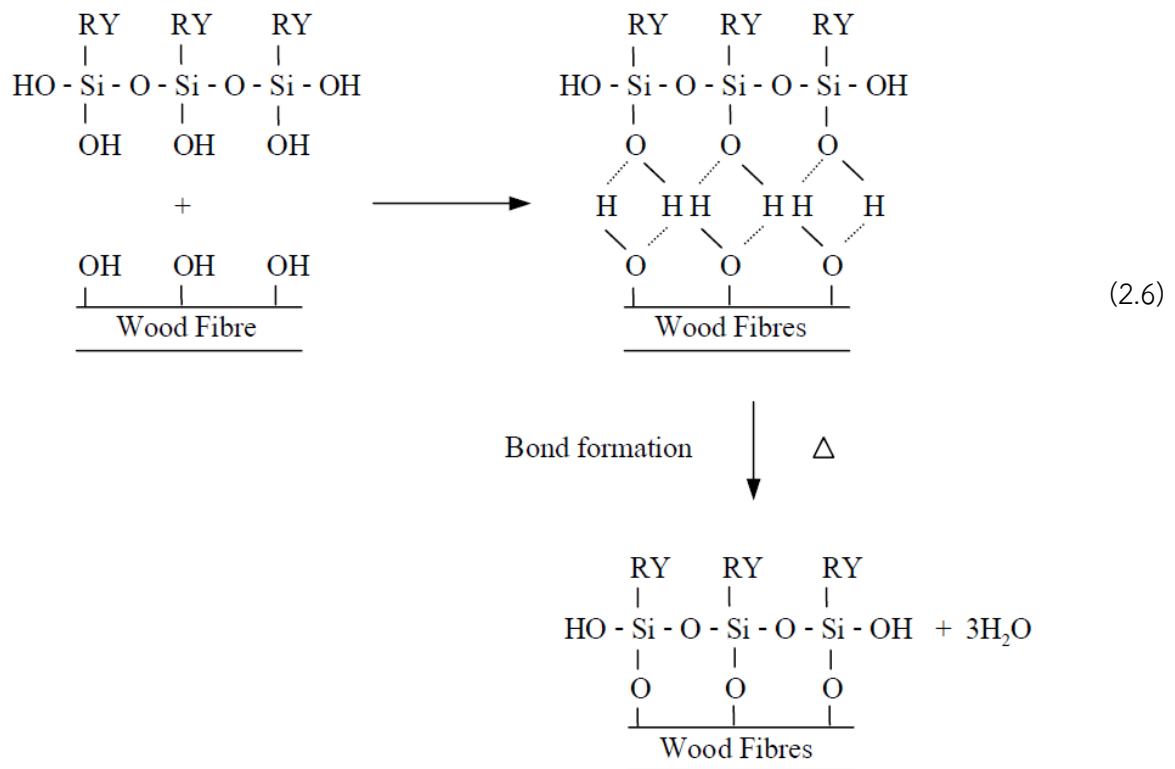
จากสมการที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารซิลเลนกับน้ำ โดยทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ alkoxy (X หรือ OR') เกิดเป็นสารซิลานอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย

ขั้นตอนที่ 2: การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



จากสมการที่ 2.5 แสดงปฏิกิริยาการควบแน่นกันเองของสารไซนอล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย โดยทั่วไปแล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดียวกับของกรณีการเกิดไฮโดรไลซิส

ขั้นตอนที่ 3: การสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและเส้นใยเซลลูโลส



จากสมการที่ 2.6 แสดงการสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและเส้นใย โดยการสร้างพันธะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะกรดหรือเบส เพื่อเร่งให้กลไกการสร้างพันธะเกิดได้เร็วขึ้น และให้ความร้อนในระหว่างการทำปฏิกิริยา นอกจากการทำปฏิกิริยาของไซลานอลกับหมู่ไฮดรอกซิลของพื้นผิวเส้นใยแล้วยังมีการสร้างพอลิไซลอคเซนเกิดขึ้นด้วย

ขั้นตอนที่ 4: การเกิดแรงกระทำ ระหว่างกันของพอลิเมอร์และสารไซเลน

ในขั้นตอนนี้พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สามารถเข้ากับเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยลดลงและสารไซเลน ณ ตำแหน่ง Y ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์หรือมีความสามารถในการเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น

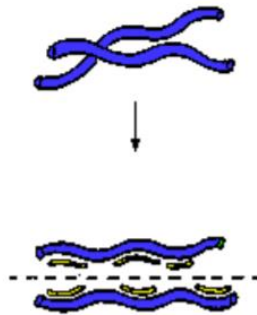
2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) [23-24]

พลาสติไซเซอร์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดเฉื่อย (inert organic compounds) ที่มีจุดเดือดสูง และความดันไอต่ำ เช่น ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ไขมันสัตว์ สารสกัดจากพืช และสารที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นต้น พลาสติไซเซอร์ถูกเติมลงในพลาสติก หรือยาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากพลาสติไซเซอร์มีผลทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และลดค่ามอดูลัสอีลาสติกของพอลิเมอร์ พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ สภาพขี้ ความสามารถในการละลาย รูปร่างของโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ และความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์และ พลาสติไซเซอร์ ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการคงทนของพลาสติไซเซอร์ คือ ความต้านทานการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นพลาสติไซเซอร์ที่ดีควรจะต้องมีจุดเดือดสูงและความดันไอต่ำเพื่อป้องกันการสูญเสียดังกล่าว พลาสติไซเซอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อัตราการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงานต่ำมีส่วนช่วยในการรักษาสมบัติที่เกิดขึ้นจากการเติมพลาสติไซเซอร์ และหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของพลาสติไซเซอร์ไปยังสิ่งของที่ชิ้นงานพอลิเมอร์จะไปสัมผัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบทางสุขภาพและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ความคงทนของพลาสติไซเซอร์ ขึ้นอยู่กับ ขนาดโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ โมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ยังมีขนาดใหญ่ยิ่งทำให้พลาสติไซเซอร์มีความคงทนอยู่ในชิ้นงานสูง พลาสติไซเซอร์มีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืด อัตราการกระจายตัวของสารเพิ่มเนื้อ ลักษณะของการไหล ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป และการเกิดความร้อน พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องมีความว่องไวต่อรังสียูวี ต่ำ มีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีราคาไม่แพง ประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์สามารถถูกอธิบายได้จากปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่เติมเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ

กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์

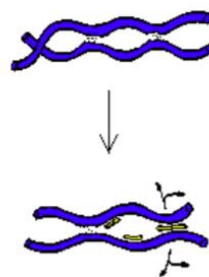
กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ สามารถถูกอธิบายด้วยทฤษฎีที่หลากหลาย ดังนี้

1. ทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricity theory) ถูกเสนอโดย Kilpatrick และคณะ ซึ่งได้อธิบายว่าพลาสติกไซเซออร์ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง ขณะที่ให้ความร้อนโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์จะแทรกตัวอยู่ที่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลง พอลิเมอร์จึงมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การตอบสนองของพอลิเมอร์ต่อพลาสติกไซเซออร์ตามทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น [24]

2. ทฤษฎีเจล (Gel theory) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Aiken และคณะ ความคงรูปร่าง (Stiffness) ของพอลิเมอร์เป็นผลมาจากการเกิดเจลยึดติดกันบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลทำให้พอลิเมอร์ยอมที่จะเคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อย การเกิดเจลบนสายโซ่พอลิเมอร์อาจเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals force) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) หรือโครงสร้างผลึก เมื่อตำแหน่งที่เกิดเจลสามารถเกิดแรงกระทำกับพลาสติกไซเซออร์มีผลทำให้เกิดการแยกออกจากกันของพอลิเมอร์ตรงตำแหน่งที่เกิดเจล จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 การเติมพลาสติกไซเซออร์จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเจลพอลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 2.12 การลดการเกิดเจลของพอลิเมอร์โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ [24]

3. ทฤษฎีช่องว่างอิสระ (Free volume theory) การเติมพลาสติกไซเซอรลงในพอลิเมอร์มีส่วนช่วยทำให้ช่องว่างอิสระของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์มีค่าลดลง พลาสติกไซเซอรเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลทำให้ช่องว่างอิสระเพิ่มขึ้น จึงมีส่วนช่วยทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น
4. ทฤษฎีกลไกทางกล (Mechanistic theory) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไซเซอรไม่สามารถอยู่กับพอลิเมอร์ได้อย่างถาวร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติกไซเซอร ณ ปริมาณพลาสติกไซเซอรน้อยๆ แรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกไซเซอรมีมากกว่าแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ และแรงกระทำระหว่าง พลาสติกไซเซอรด้วยกันเอง ส่วนกรณีปริมาณพลาสติกไซเซอรปริมาณมาก แรงกระทำระหว่างพลาสติกไซเซอรมีค่าโดดเด่นที่สุด

2.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Zhang, X. และคณะ (2010) [5] ได้ทำการศึกษาผลการใช้น้ำมันถั่วเหลืองอิมัลชันที่มีผลต่อสมบัติของกลูเตนจากข้าวสาลี จากงานวิจัยพบว่า การเติมน้ำมันถั่วเหลืองอิมัลชันลงในกลูเตนจากข้าวสาลีที่มีการเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรในสภาวะ pH 6 มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ในขณะที่ภายใต้สภาวะต่าง ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ความไม่ชอบน้ำของกลูเตนจากข้าวสาลีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยการเติมน้ำมันถั่วเหลืองอิมัลชัน

Zárate-Ramírez, L.S. และคณะ (2014) [3] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารในกลุ่มอัลดีไฮด์ที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมแมคคานิคัล (Thermomechanical properties) ของกลูเตนจากข้าวสาลีซึ่งทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดความดันสูง จากการศึกษาพบว่า ไกลออกซอล (Glyoxal) เป็นสารอัลดีไฮด์ที่มีผลทำให้สมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟอร์มอลดีไฮด์ (Formaldehyde) และกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)

Diao, C. และคณะ (2014) [25] ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากกลูเตนจากข้าวสาลีที่ผ่านการดัดแปรด้วยไทโอเลทเทตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Thiolated Polyvinyl alcohol, TPVA) และเส้นใยมะพร้าว โดยการเติมเส้นใยมะพร้าว 15 %โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยพบว่า การเติมเส้นใยมะพร้าวมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และการเติม TPVA มีส่วนช่วยทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของกลูเตนจากข้าวสาลี และวัสดุเชิงประกอบกลูเตนจากข้าวสาลี และเส้นใยมะพร้าวเพิ่มสูงขึ้น

Tomyangkul, S และคณะ (2016) [26] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของยางโฟมธรรมชาติโดยการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน หรือชานอ้อยที่ทำการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ผิวเส้นใยเกิดความขรุขระจึงช่วยปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเฟสระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

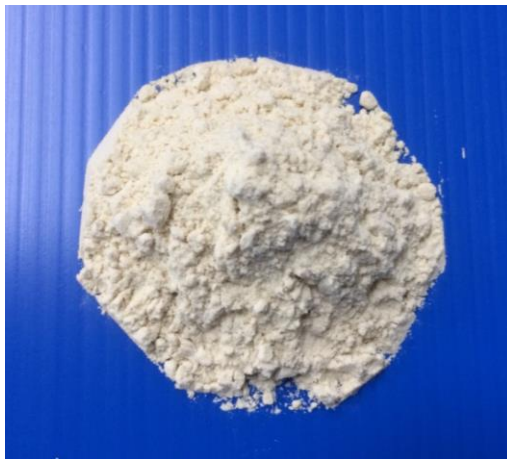
Wu, Q. และคณะ (2017) [27] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการรับแรงของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนจากข้าวสาลีโดยการใช้ผ้าลินินเป็นสารเสริมแรง ในงานวิจัยได้ทำการขึ้นรูปขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการแตกต่างกัน 2 วิธี คือ การจุ่มเคลือบ (Dipping coating) และการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Compression moulding) จากผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีความคงรูปร่างมากกว่ากรณีการจุ่มเคลือบ แต่ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าใกล้เคียง ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปมีส่วนช่วยทำให้กลูเตนจากข้าวสาลีเปียกผิวเส้นใยลินินได้ดีกว่า จึงมีช่องว่างระหว่างเฟสน้อยกว่ากระบวนการจุ่มเคลือบ และจากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่า ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสของเส้นใยธรรมชาติและกลูเตนจากข้าวสาลีมีมากขึ้น

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ และเลือกสูตรที่เหมาะสมดำเนินการงานวิจัยในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 กลูเตนจากข้าวสาลี ของบริษัท เจ.เอ็น.พี.ไอ. อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผงกลูเตนจากข้าวสาลี จากบริษัท เจ.เอ็น.พี.ไอ. อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

3.1.2 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) จากบริษัทวิจิตรภัณฑ์ปาล์มออยล์ จำกัด (มหาชน) มีลักษณะดังรูปที่ 3.2

3.1.3 กลีเซอรอล (Glycerol) ของบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์

3.1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของบริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน

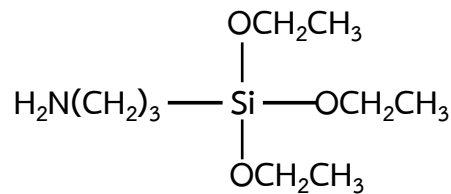
3.1.5 สาร ค ว บ อ ะ มิ โ น ไ ซ เล น (Aminosilane) คือ 3-Aminopropyltriethoxysilane ($(C_2H_5O)_3SiC_3H_6NH_2$) ของบริษัท Shin-Etsu Chemical จำกัด (ประเทศญี่ปุ่น) โดยมีชื่อทางการค้า KBE903 และมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.1.6 เอทานอล (Ethanol) ความบริสุทธิ์ 99.9 % เกรด AR ของบริษัท Qręc ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.7 กรดแอซิติค (Acetic acid) ของบริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ 3.2 เส้นใยปาล์มน้ำมันจากบริษัทวิจิตรภัณฑ์ปาล์มออยล์ จำกัด



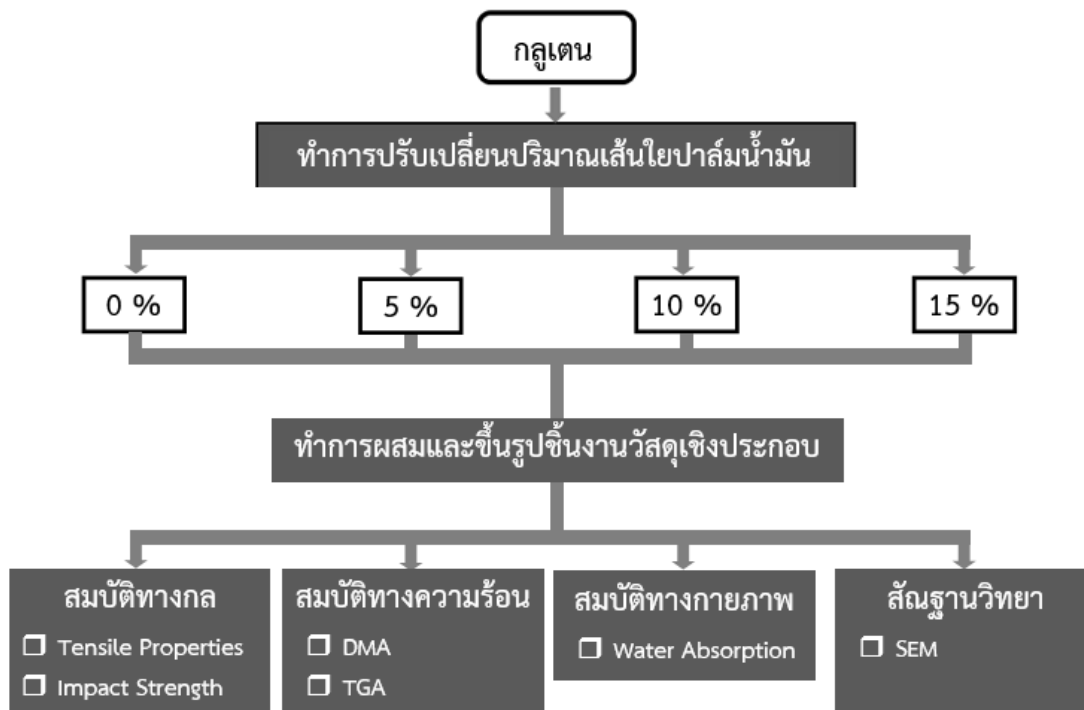
รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน KBE903

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.2.1 แผนการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ

ทำการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมระหว่างกลูเตน และเส้นใยปาล์มที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 % โดยน้ำหนักของกลูเตนเพื่อทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม 0 – 15 % โดยน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบ และมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนการดำเนินงานการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ

3.2.2 แผนการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

จากหัวข้อ 3.2.1 ทำการวิเคราะห์ผลเพื่อเลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน สูตรที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบด้วยการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม น้ำมันด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน คือ การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการปรับปรุงผิวด้วยสารอะมีโนไซเลน KBE903 สำหรับกรณีการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้มีการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม โดยการประเมินจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย สำหรับการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน และการทดสอบสมบัติมีการดำเนินการวิจัยเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 และเลือกสูตรที่ดีที่สุดมาทำการทดสอบการแพร่ของสารจากภาชนะ รวมถึงทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิธีการดำเนินการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ขั้นตอนการผสมกลูเตนจากข้าวสาลีกับเส้นใยปาล์มและกลีเซอรอล
2. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
3. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

1. ขั้นตอนการผสมกลูเตนจากข้าวสาลีกับเส้นใยปาล์มและกลีเซอรอล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำเส้นใยปาล์มมาการเตรียมเส้นใย โดยการล้างทำความสะอาดเส้นใยด้วยน้ำ และนำเส้นใยไปอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยมาทำการตัดให้มีความยาว 0.5 เซนติเมตร
2. นำเส้นใยปาล์มที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมมาทำการอบไล่ความชื้นอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
3. ทำการชั่งน้ำหนักกลูเตนจากข้าวสาลี เส้นใยปาล์ม และกลีเซอรอล ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม ตั้งแต่ 0 – 15 %โดยน้ำหนัก และมีการเติมกลีเซอรอล 30 %โดยน้ำหนักของกลูเตนจากข้าวสาลี
4. ทำการผสมของผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ดังรูปที่ 3.5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดีก่อนการนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป ลักษณะของผสมที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด มีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องผสมระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด



รูปที่ 3.6 ลักษณะของผสมกลุ่ดินและเส้นใยปาล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลภายหลังการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด

2. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

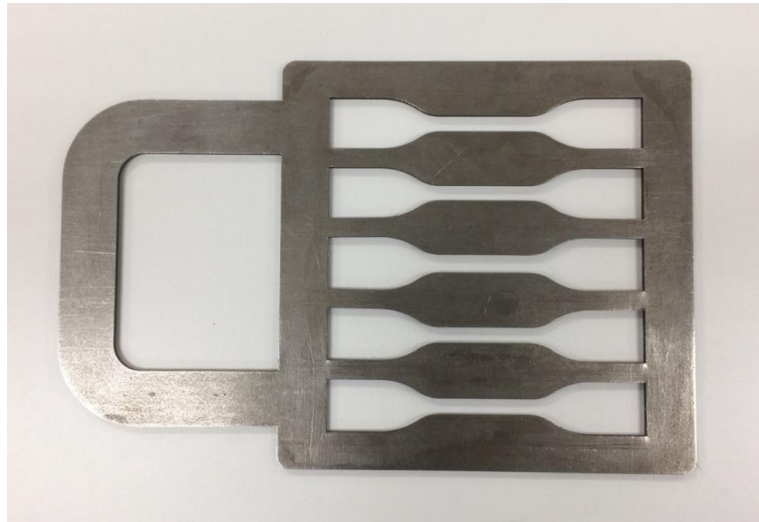
1. นำของผสมกลุ่ดินจากข้าวสาลี เส้นใยปาล์ม และกลีเซอรอลที่ได้จากหัวข้อที่แล้วมาทำการอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. จากนั้นนำของผสมแต่ละสูตรมาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 3.7 และลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ Type IV อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก อ้างอิงตาม

มาตรฐาน ASTM D 256 เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป มีรายละเอียดเป็นดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก คือ 150 องศาเซลเซียส
- ขั้นตอนการอุ่นให้ความร้อน (preheat) ใส่สารคอมปาวด์ในแม่พิมพ์ทำการอุ่นให้ความร้อนแก่ของผสม จนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการอุ่นเม็ดคอมปาวด์ เป็นเวลา 10 นาที
- ขั้นตอนการอัดด้วยความดัน (compress) ทำการปิดแม่พิมพ์ ด้วยความดัน 2500 psi เป็นเวลา 10 นาที
- ขั้นตอนการหล่อเย็น (cooling) ทำการหล่อเย็นชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที ด้วยน้ำหล่อเย็น หลังจากนั้นทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

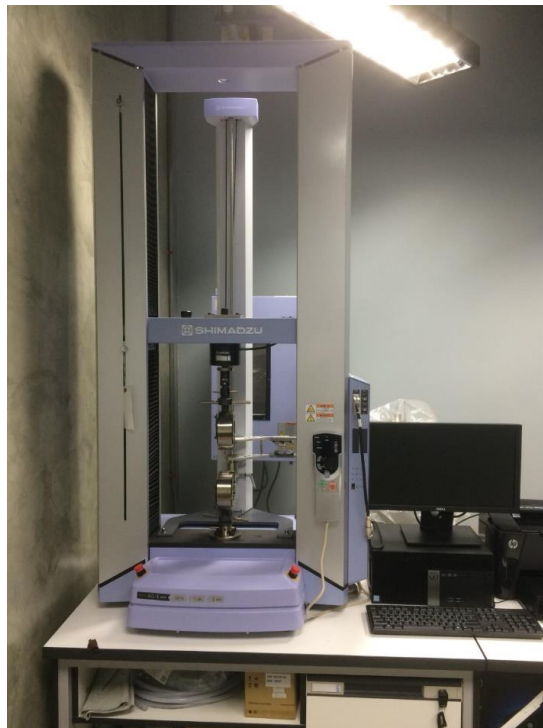
3. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- สมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดันมาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus ของบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.10 ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นงาน

ทดสอบมีรูปทรงแบบดรัมเบล แบบ Type IV ดังแสดงใน รูปที่ 3.11 มีระยะความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร
สถานะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการ
ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงาน
ทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile
modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุด
ขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบ Universal testing ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)

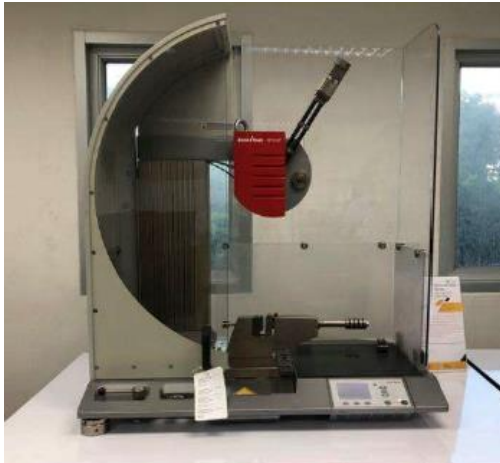
นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้มาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดัน ที่มีขนาดชิ้นงาน $13 \times 64 \times 3$ มิลลิเมตร³ มาทำรอยบาก (notch) ด้วยเครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2 ของบริษัท Gotech TESTING MACHINES INC. ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 3.12 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ดังรูปที่ 3.13 หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาทำการทดสอบแรงกระแทก แบบ Izod อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P ดังรูปที่ 3.14 จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบเป็นค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อความหนาชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.12 เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2



รูปที่ 3.13 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P

- สมบัติทางความร้อน

การหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเทคนิคทางกลเชิงไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ปริมาณต่างๆ กัน ถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer รุ่น DMA/SDTA861^e ของบริษัท Mettler-Toledo (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมในลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีความกว้าง x ความยาว x ความหนา 13 x 64 x 3 มิลลิเมตร³ ทดสอบโดยใช้โหมด Single Cantilever ทำการทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ คือ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 3 องศาเซลเซียส/นาที ความถี่ 1 Hz แรง 2 นิวตัน และระยะเคลื่อนที่ 10 ไมครอน และทำการรายงานผลค่า T_g ณ ตำแหน่ง $\tan \delta_{\max}$

การหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetry, DSC)

การหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยพอลิเมอร์ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.16 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ คือ -20 ถึง 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

การหาค่าอุณหภูมิการสลายตัวโดยการวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

สำหรับการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature, T_d) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มปริมาณต่างๆ กัน สามารถดำเนินการโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.16 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ คือ 100 ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ปริมาณชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ประมาณ 10 มิลลิกรัม



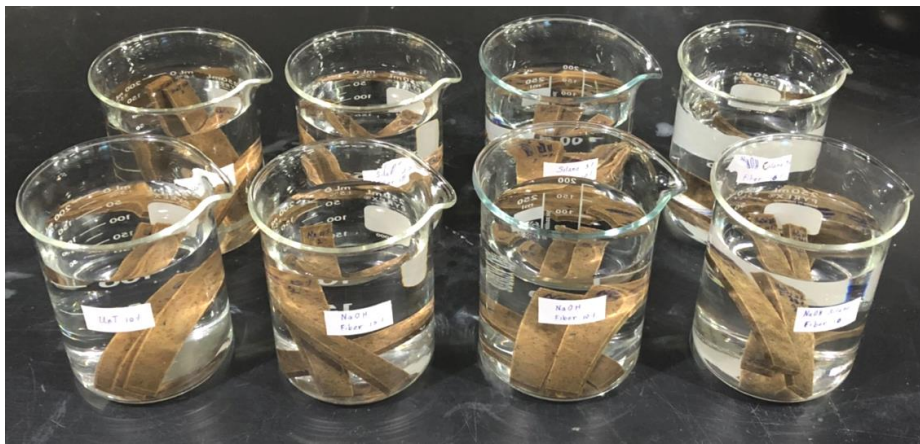
รูปที่ 3.15 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer รุ่น DMA/SDTA861^e ของบริษัท Mettler-Toledo จำกัด



รูปที่ 3.16 เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo จำกัด

- สมบัติทางกายภาพ

การดูดซับความชื้น หรือการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ดำเนินการโดยนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม แต่ละสูตร จำนวน 3 ชิ้นงาน ที่มีขนาดของชิ้นงานทดสอบ คือ $13 \times 64 \times 3$ มิลลิเมตร³ นำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล แบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง นำชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งในน้ำที่กลั่น ดังแสดงในรูปที่ 3.17 หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่เวลาแช่น้ำต่างๆ กัน คือ 0 30 60 120 240 480 1440 2880 4320 5760 และ 7200 นาที เพื่อทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปียก โดยนำชิ้นงานทดสอบออกจากน้ำ และทำการซับด้วยกระดาษซับก่อนชั่งน้ำหนัก และทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบสูตรต่างๆ ถูกแช่ในน้ำกลั่นเพื่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

$$\% \text{water absorption} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำ ณ เวลา t

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- **สัณฐานวิทยา**

การตรวจสอบการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ การยึดเกาะระหว่างเฟสของกลูเตนและเส้นใยปาล์มดำเนินการโดยการวิเคราะห์จากรอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบต้องนำชิ้นงานมาทำการเคลือบด้วยทองคำด้วยวิธีการ สเปตเตอริง (sputtering) หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบ Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.18 ที่ความต่างศักย์ 15 kv



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV

3.3.2 **วิธีการดำเนินการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ ด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ**

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม
2. ขั้นตอนการผสมกลูเตนจากข้าวสาลีกับเส้นใยปาล์มและกลีเซอรอล
3. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
4. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน
5. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ

1. ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 - การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม มีรายละเอียดดังนี้
 1. ทำการเตรียมเส้นใยโดยการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ อบไล้ความชื้น และทำการตัดเส้นใยให้มี ความยาว 0.5 เซนติเมตร
 2. นำเส้นใยที่การเตรียมในข้อที่ 1 มาทำการอบไล้ความชื้น โดยนำเส้นใยปาล์มน้ำมันไปอบในตู้อบ ลมร้อน รุ่น ED บริษัท BINDER ประเทศเยอรมัน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
 3. นำเส้นปาล์มที่ผ่านการอบไล้ความชื้นแล้วมาทำการแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีการ ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตั้งแต่ 0 10 และ 15 %โดยน้ำหนักของ สารละลาย ปริมาตรสารละลาย 500 มิลลิลิตร และนำเส้นใยปาล์มปริมาณ 25 กรัม มาแช่ใน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการแช่เส้นใยปาล์ม ตั้งแต่ 0 10 20 และ 30 นาที ทำการกวนให้เส้นใยปาล์มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตลอดเวลาด้วยเครื่อง กวนผสมแบบแม่เหล็ก
 4. เมื่อครบกำหนดระยะเวลาในแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำเส้นใยปาล์มมาล้างด้วยน้ำกลั่น ล้างเส้นใยจนกระทั่งน้ำกลั่นที่ใช้ในการล้างเส้นใยมีค่ากรด-เบสที่เป็นกลาง หรือ ค่า pH เท่ากับ 7
 5. ทำการอบไล้ความชื้นเส้นใยปาล์มน้ำมัน โดยการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
 6. ทำการหาค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยปาล์มน้ำมัน (L/D) แต่ ละสภาวะการปรับปรุงผิว โดยใช้เส้นใยปาล์ม จำนวน 30 เส้น โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Axio Scope A ของบริษัท Carl Zeiss ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.19 เพื่อถ่ายภาพเส้นใย ปาล์มน้ำมัน จากนั้นนำภาพมากำหนดหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยปาล์มน้ำมัน และทำการ วัดความยาวของเส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยเวอร์เนีย เพื่อนำมาคำนวณหาค่า L/D
 7. ทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มก่อน และหลังการปรับปรุงผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยก่อนนำเส้นใย ธรรมชาติมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต้องทำการเคลือบทองด้วยวิธีการสputtering

8. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและทำการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม เพื่อนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิว ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Axio Scope A ของบริษัท Carl Zeiss

- การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารอะมิโนไซเลน KBE903 มีรายละเอียดดังนี้
 1. ทำการเตรียมเส้นใยปาล์มก่อนการปรับปรุงผิวโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำ อบไล่ความชื้น และตัดเส้นใยให้มีขนาด 0.5 เซนติเมตร
 2. ทำการเตรียมสารละลายสำหรับทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับสารอะมิโนไซเลน โดยการนำน้ำและเอทานอลมาผสมกัน ในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก และทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 4-5 โดยการใช้กรดแอสติค
 3. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารอะมิโนไซเลนโดยนำ KBE903 หยดลงในสารละลายเอทานอลที่ละหยด และทำการกวนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนผสมแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมีการควบคุมให้ความเข้มข้นของ KBE903 อยู่ที่ 0.5 %โดยน้ำหนักของสารละลาย
 4. นำเส้นใยปาล์มมาแช่ในสารละลายอะมิโนไซเลน โดยทำการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยปริมาณสารอะมิโนไซเลน 5 %โดยน้ำหนัก โดยใช้เวลาในกาแช่เส้นใยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 5. นำเส้นใยปาล์มที่ทำการกรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น
 6. นำเส้นใยมาทำการอบในตู้อบเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและอบไล่ความชื้นออกจากเส้นใย ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ขั้นตอนการผสมกลูเตนจากข้าวสาลีกับเส้นใยปาล์มและกลีเซอรอล มีรายละเอียดเหมือนในหัวข้อ 3.3.1
3. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ มีรายละเอียดเหมือนในหัวข้อ 3.3.1
4. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน สำหรับการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางกายภาพ และสัมมนาวิทยา มีรายละเอียดเหมือนในหัวข้อ 3.3.1 และทำการวิเคราะห์ผลเพื่อเลือกสูตรที่เหมาะสมมาทำการทดสอบการแพร่ของสารจากภาชนะ มีรายละเอียดดังนี้
 - การทดสอบการแพร่ของสารจากภาชนะ (Migration testing)

การทดสอบการแพร่หรือการเคลื่อนย้ายของสารจากภาชนะทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 656-2556 วิธีวิเคราะห์พลาสติกที่สัมผัสอาหาร ดำเนินการทดสอบโดยห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด โดยตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก และตรวจวัดสารตกค้างที่เหลือจากการระเหยโดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวแทนอาหาร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

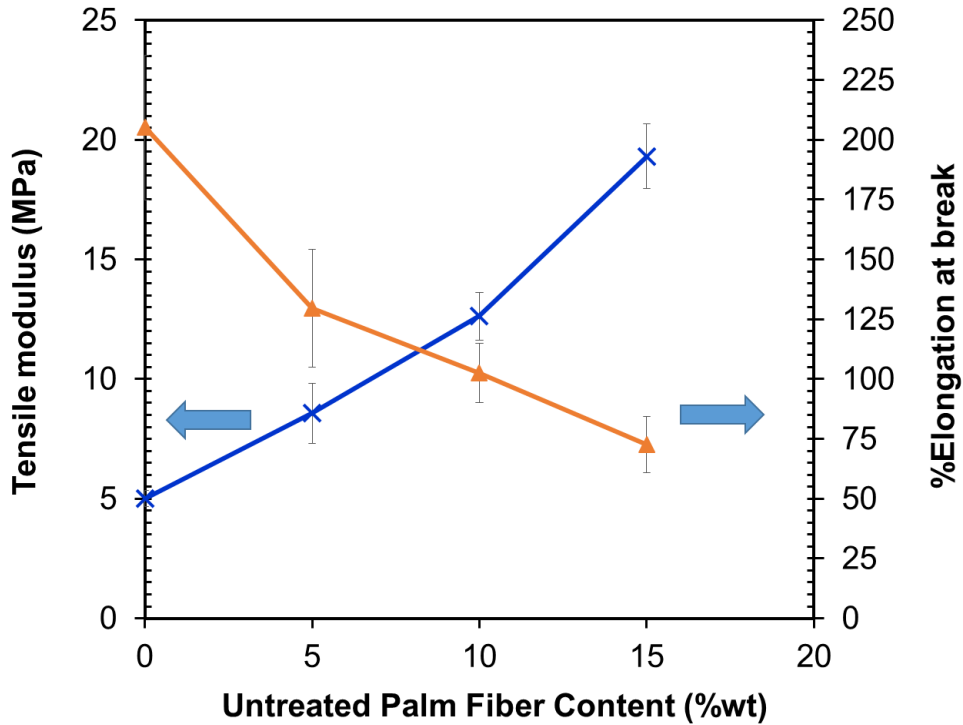
- น้ำกลั่น แทนอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-เบส มากกว่า 5
- กรดอะซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 4 % แทนอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-เบส ไม่เกิน 5
- เอทานอล (ethanol) ความเข้มข้น 20 % แทนอาหารที่มีแอลกอฮอล์
- เฮปแทน (n-heptane) แทนอาหารที่มีไขมัน หรือน้ำมัน

5. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ มีรายละเอียดดังนี้

ทำการผสมและขึ้นรูปแผ่นซีทกลูเตน และวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์ม หลังจากนั้นแผ่นซีทมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยนำแผ่นซีทไปอุ่นให้ความร้อนในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที เพื่อให้แผ่นซีทอ่อนตัว หลังจากนั้นนำแผ่นซีทมาขึ้นรูปด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

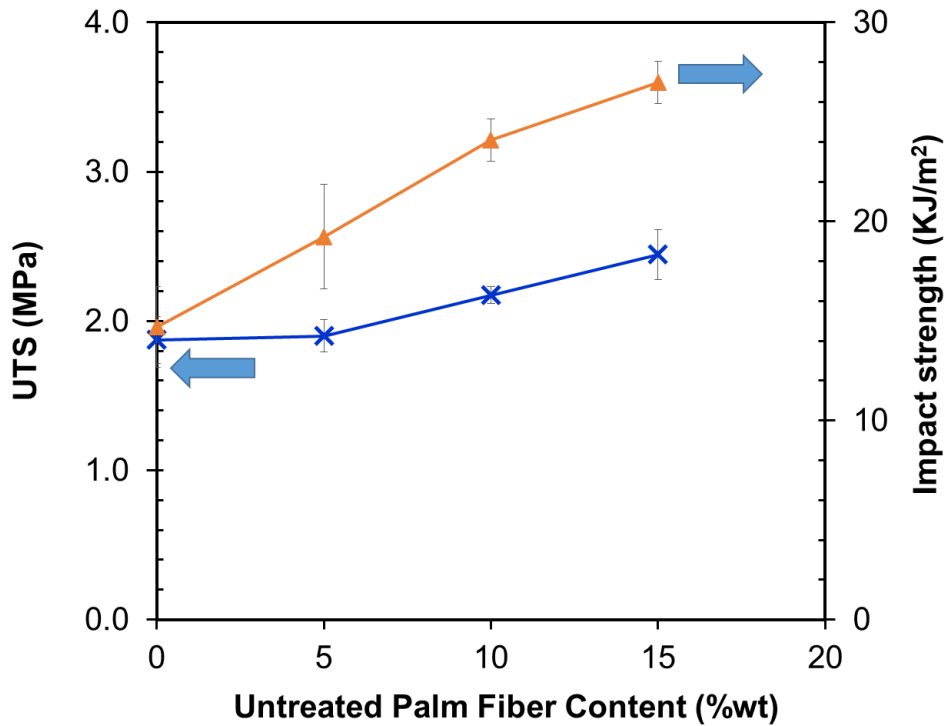
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ที่มีต่อค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบ

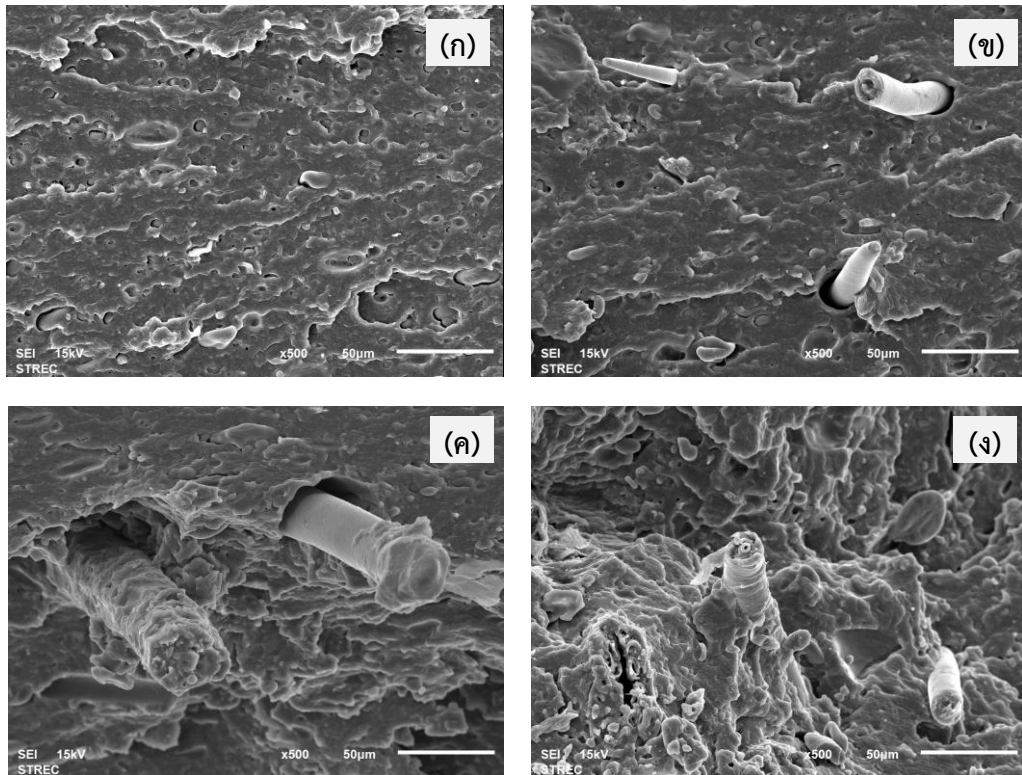
จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณตั้งแต่ 0 - 15 %โดยน้ำหนัก ที่มีต่อค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน ในขณะที่ปริมาณเส้นใยปาล์มที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการยืดตัวมีลดลง ทั้งนี้เพราะเส้นใยปาล์มมีความคงรูปสูงเนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อเติมเส้นใยปาล์มมากขึ้นจึงมีผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความคงรูปร่างได้มากขึ้น และการเติมเส้นใยปาล์มลงไปมากขึ้นมีผลทำให้สัดส่วนของวัสดุที่สามารถยืดตัวได้ง่าย (กลูเตน) มีลดลง จึงมีผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดตัวลดลงเมื่อเติมเส้นใยปาล์มมากขึ้น



รูปที่ 4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณต่างๆ กัน

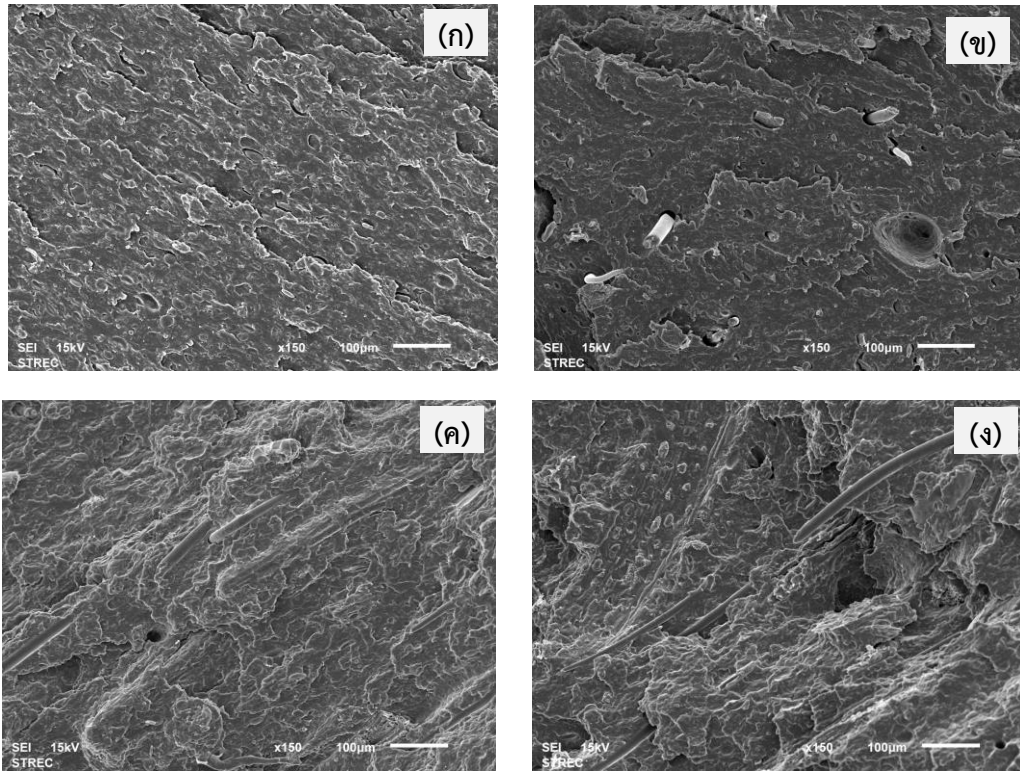
รูปที่ 4.2 แสดงผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบกลูเตน จากกราฟพบว่า ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเส้นใยปาล์มทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับกลูเตน โดยหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสของเส้นใยปาล์มสามารถเกิดแรงดึงดูดแบบไดโพล-ไดโพลกับโปรตีนกลูเตน จึงมีส่วนช่วยทำให้การส่งผ่านแรงจากกลูเตนเมทริกซ์ไปยังเส้นใยปาล์มซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับแรงของวัสดุเชิงประกอบอาจเนื่องมาจากน้ำมันปาล์มที่หลงเหลือในเส้นใยอาจมีส่วนช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ของเส้นใยปาล์มและกลูเตน เนื่องจากหมู่เอสเทอร์ที่อยู่ในน้ำมันทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นสารคู่ควบ (coupling agent) [14] แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.3 เป็นภาพบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งพบว่า ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของกลูเตน และเส้นใยปาล์มมีทั้งกรณีที่เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข) และ 4.3(ค) และมีลักษณะการยึดเกาะระหว่างเฟสเกิดขึ้นโดยกลูเตนสามารถเกิดการเปียกผิวของเส้นใยปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ค) และ 4.3(ง) การเกิดช่องว่างระหว่างเฟสอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากกลูเตนและเส้นใยปาล์มมีความสามารถในการหดตัวและขยายตัวที่ไม่เท่ากันเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป สำหรับ

พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบ เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า พื้นผิวชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยปาล์มปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้นซึ่งชี้ว่า วัสดุที่มีพฤติกรรมแตกหักแบบเหนียวมากขึ้นและผลดังกล่าวนี้ความสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงกระแทกที่พบว่า ค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก มีค่าต่างจากกรณีกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 5 %โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.3 ภาพสัณฐานทางวิทยาของบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ กำลังขยาย 500 เท่า

- (ก) กลูเตน
- (ข) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 5 %โดยน้ำหนัก
- (ค) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 10 %โดยน้ำหนัก
- (ง) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก

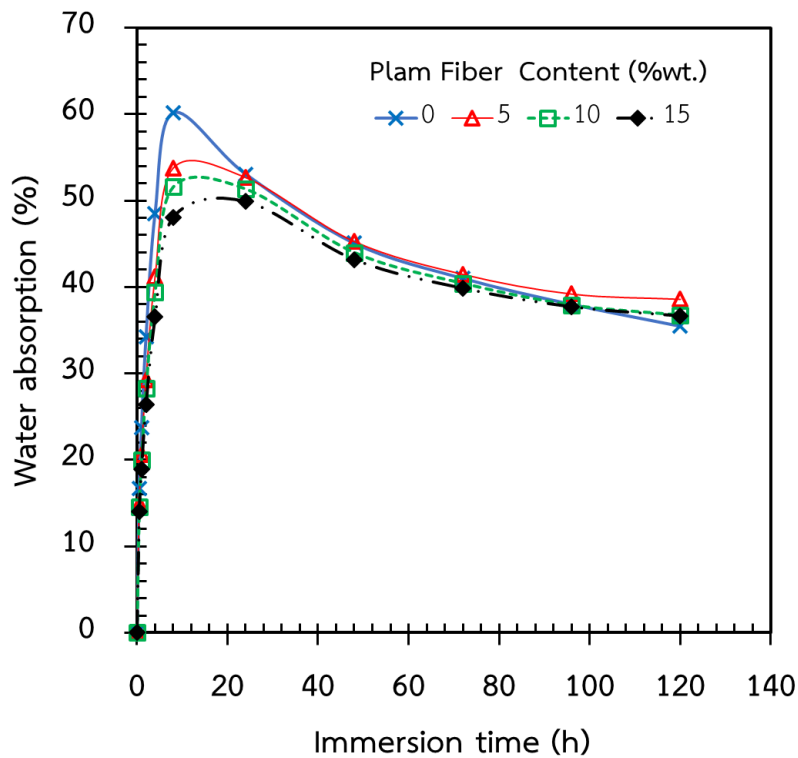


รูปที่ 4.4 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณต่างๆ กัน ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ กำลังขยาย 150 เท่า

- (ก) กลูเตน
- (ข) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 5 %โดยน้ำหนัก
- (ค) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 10 %โดยน้ำหนัก
- (ง) วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก

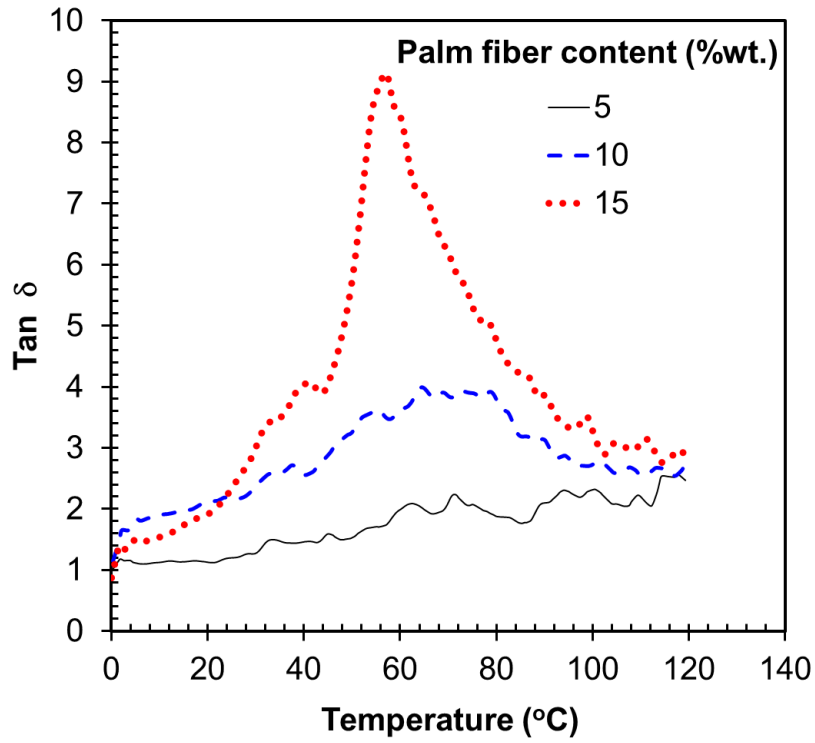
รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติการดูดซับน้ำของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว จากกราฟพบว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการแช่ชิ้นงาน (0 ถึง 8 ชั่วโมง) ทั้งกรณีกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบมีค่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นค่าการดูดซับน้ำเริ่มมีค่าลดลงและมีค่าคงที่ ณ เวลาการแช่ชิ้นงานที่ 96 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นของค่าดูดซับน้ำในช่วงเริ่มต้นเนื่องมาจากทั้งกลูเตนและเส้นใยปาล์มมีสมบัติที่ชอบน้ำจึงสามารถดูดซับน้ำได้ แต่จากการพิจารณาผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว พบว่า ปริมาณเส้นใยปาล์มยิ่งมากขึ้นมีผลทำให้การดูดซับน้ำในช่วงเริ่มต้นลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลูเตนและเส้นใยปาล์มมีแรงกระทำระหว่างกัน จึงอาจไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับกลูเตน การมีอยู่ของเส้นใยปาล์มจึง

ช่วยลดการดูดซับน้ำ ส่วนการลดลงของค่าการดูดซับน้ำเมื่อเวลาในการแช่น้ำนานขึ้นอาจเป็นไปได้ว่า กลูเตนบางส่วนในชิ้นงานถูกทำให้สลายตัวออกจากชิ้นงานเนื่องจากน้ำ

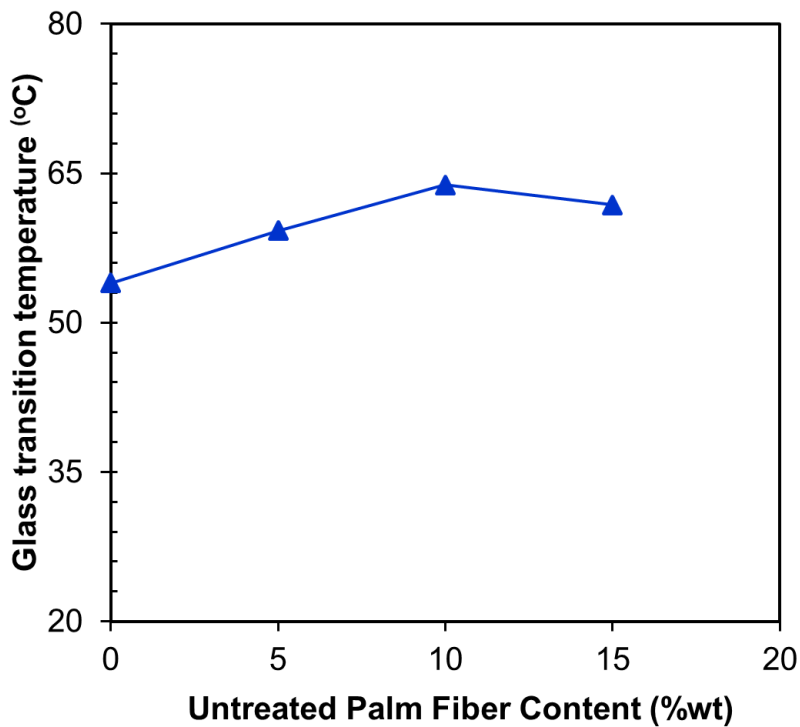


รูปที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว เมื่อเวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณ 5 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก จากกราฟพบว่า สามารถระบุค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วได้เพียงกรณีการเติมเส้นใยปาล์ม 10 และ 15 %โดยน้ำหนัก และมีลักษณะกราฟที่ไม่เรียบผลที่ได้ อาจมีความผิดพลาด ทางคณะวิจัยจึงได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการตรวจสอบหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตนด้วยเทคนิค DSC แทน ผลการหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเทคนิค DSC เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากกราฟพบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตนมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลูเตนและเส้นใยปาล์มสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน

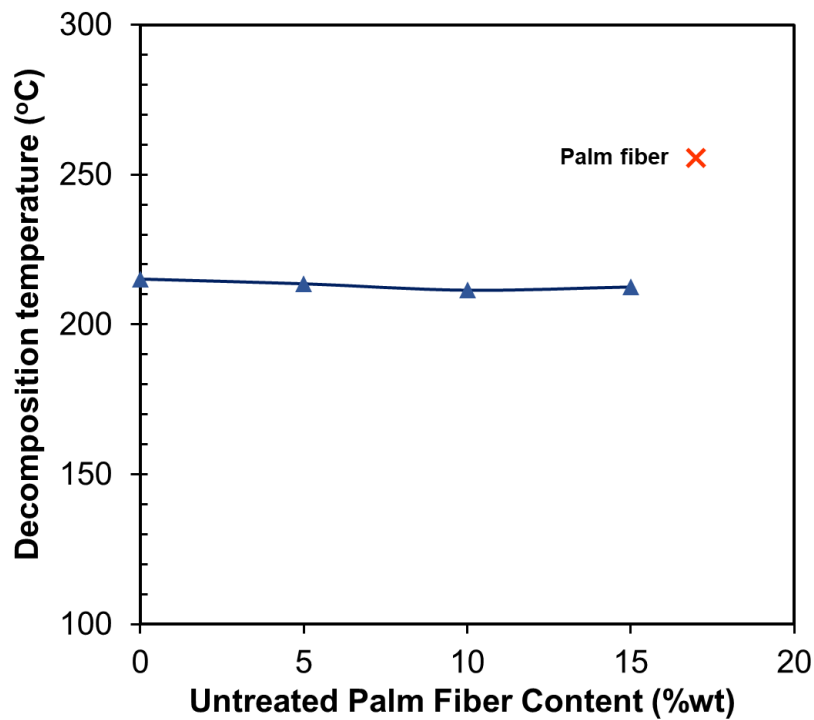


รูปที่ 4.6 กราฟ Tan δ ของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์มปริมาณต่างๆ กันด้วยเทคนิค DMA



รูปที่ 4.7 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตนในวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค DSC

รูปที่ 4.8 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA จากผลการทดลองพบว่า ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 211 – 215 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยปาล์ม 256 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นที่พบในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบน่าจะเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลูเตน ดังนั้นการเติมเส้นใยปาล์มไม่มีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของกลูเตนเกิดการเปลี่ยนแปลง



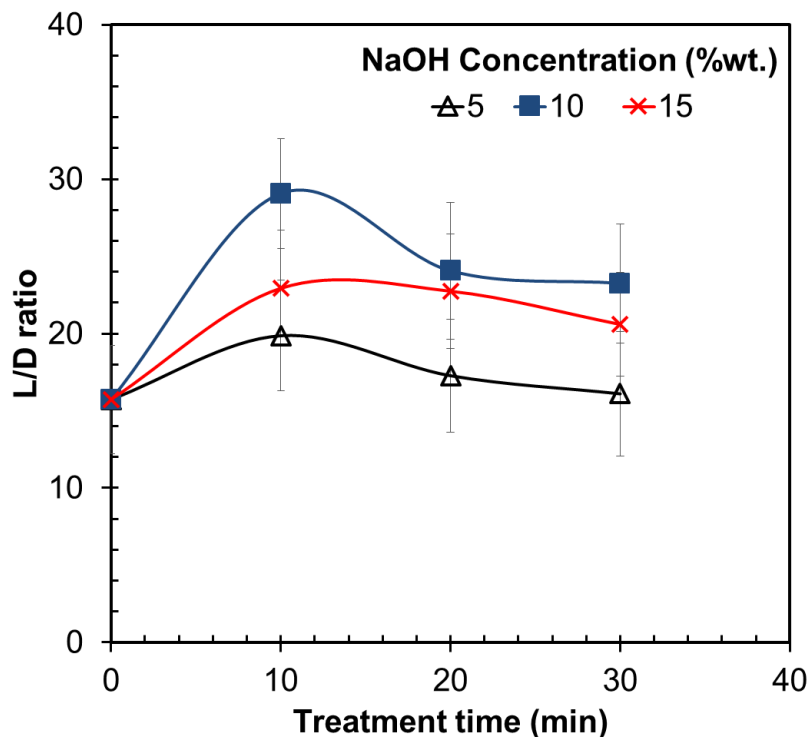
รูปที่ 4.8 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับผิวที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์ม โดยทำการทดสอบด้วยเทคนิค TGA

จากผลการทดสอบทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อน พบว่า สูตรวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวที่มีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาปรับปรุงสมบัติ คือ สูตรวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพราะการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนัก มีผลการทดสอบทางกลที่ดีที่สุด มีค่าการดูดซับน้ำที่น้อยที่สุด อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตน และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนไม่แตกต่างจากสูตรอื่นๆ

รวมถึงการเติมเส้นใยปาล์มปริมาณมากมีส่วนช่วยลดต้นทุนในการผลิต เพราะเส้นใยปาล์ม (ราคาประมาณ 2-3 บาท/กิโลกรัม) มีราคาถูกกว่ากลูเตน (ราคาประมาณ 100-120 บาท/กิโลกรัม) ค่อนข้างมาก

4.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

- ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



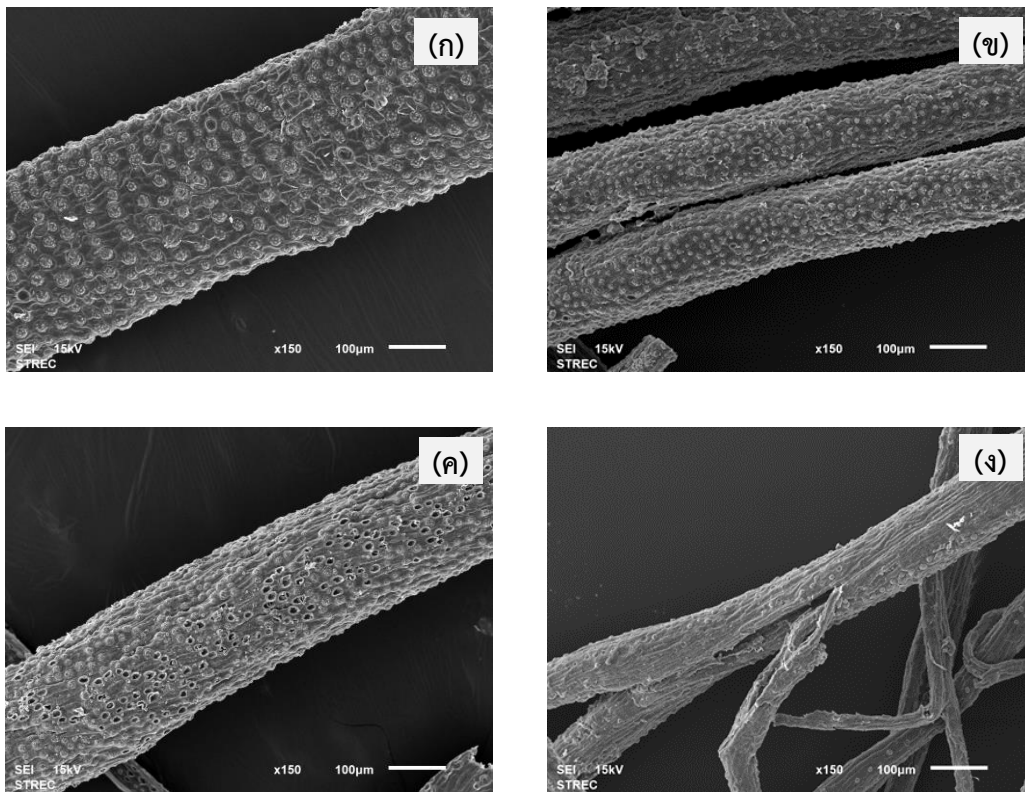
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาในการปรับปรุงผิวต่างๆ กัน

รูปที่ 4.9 แสดงผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของสารละลาย ณ เวลาในการแช่ 0 – 30 นาที ที่มีต่อค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยปาล์ม ดังนี้ สำหรับผลของเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า กรณีการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 % โดยน้ำหนักของสารละลาย เวลาในการแช่ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 % โดยน้ำหนักของสารละลาย พบว่า เวลาในการแช่เส้นใยช่วงเริ่มต้น (10 นาที) ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการแช่นานขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่าง

ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีสาเหตุมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปกำจัดสิ่งสกปรก ลิกนิน เพคติน แวกซ์ และน้ำมันที่ปกคลุมอยู่ภายนอกผิวเส้นใย [28] จึงมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลง ส่วนการลดลงของอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ณ เวลาในการแช่เส้นใยที่นานขึ้นอาจเป็นเพราะเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นานขึ้นมีผลทำให้เส้นใยถูกทำลายและเกิดการขาดของเส้นใย [26] ส่วนกรณีของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 % โดยน้ำหนักของสารละลาย พบว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาในการแช่เส้นใยนานขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกันกรณีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 % โดยน้ำหนักของสารละลาย สำหรับผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 % โดยน้ำหนัก > 15 % โดยน้ำหนัก > 5 % โดยน้ำหนัก และการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่สูงที่สุด คือ การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนักของสารละลาย เป็นเวลา 10 นาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงผิว จากรูปพบว่าพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิวมีลักษณะผิวขรุขระมากขึ้น เนื่องจากสิ่งสกปรก ลิกนิน เพคติน แวกซ์ และน้ำมันถูกกำจัดออกจากผิว นอกจากนี้พบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่ผิวของเส้นใยซึ่งเกิดขึ้นจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ผิวของเส้นใยปาล์มถูกละลายออกจากผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ [26, 28] และจากรูปที่ 4.10(ง) แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เส้นใยปาล์มถูกทำลาย และเกิดการขาดของเส้นใย ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

จากการพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาในการแช่เส้นใย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 นาที ดังนั้นทางคณะวิจัยจึงเลือกสภาวะการปรับปรุงผิวเส้นใยนี้มาทำการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มน้ำมัน และทำการเปรียบเทียบผลกับกรณีการปรับปรุงผิวด้วยสารอะมิโนไซเลน KBE903 ผลเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.15



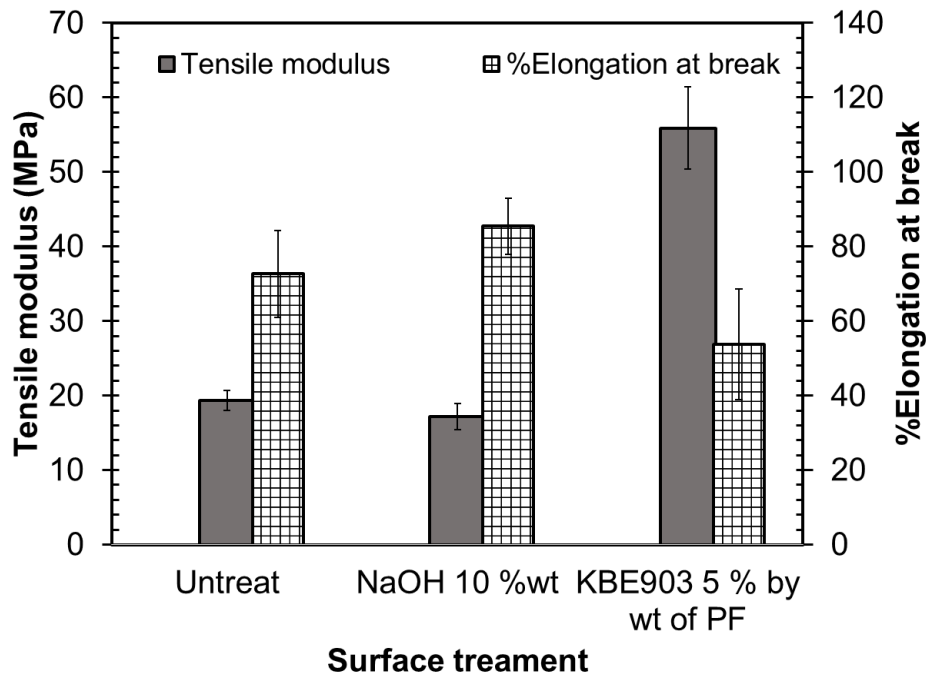
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มก่อนและหลังการผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM

- (ก) เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว
- (ข) เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 %โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที
- (ค) เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 %โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที
- (ง) เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 %โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที

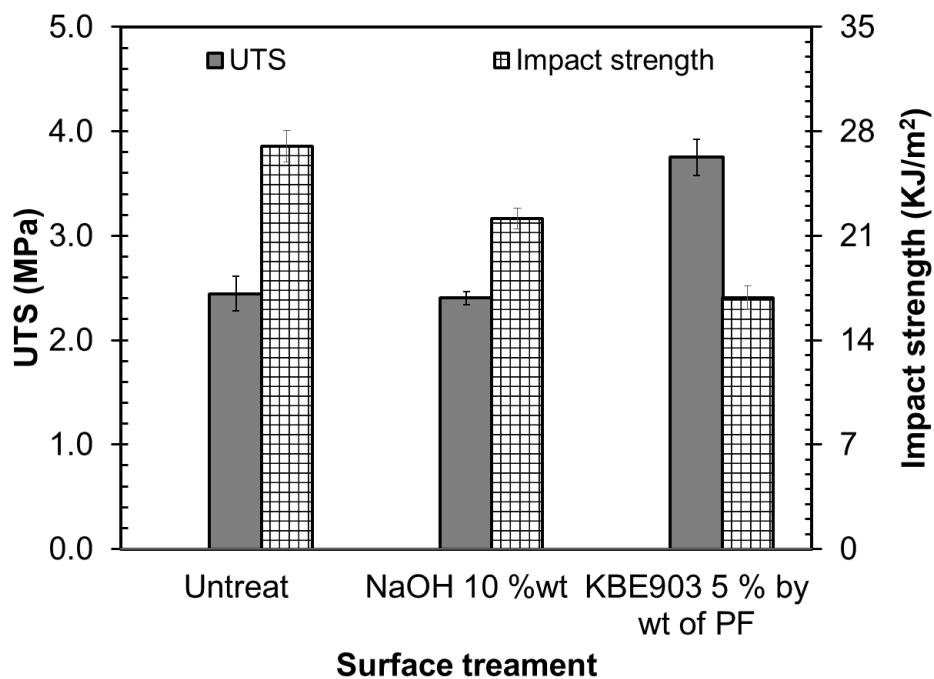
รูปที่ 4.11 แสดงผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารอะมิโนไซเลน KBE903 จากกราฟพบว่า สำหรับกรณีค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง การปรับปรุงผิวด้วยสารอะมิโนไซเลน KBE903 5 %โดยน้ำหนักของเส้นใยมีส่วนช่วยในการปรับปรุงค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ผ่านการปรับปรุงผิวถึง 189.49 % ในขณะที่การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อค่ามอด

คุณสมบัติความต้านทานแรงดึง การเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงสำหรับกรณีการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 มีผลมาจากหมู่อะมิโนใน KBE903 สามารถเพิ่มเข้ากันกับกลูเตนได้ดียิ่งขึ้นโดยอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันจึงมีส่วนช่วยเสริมความแข็งแรงระหว่างเฟส ในขณะที่การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้พื้นผิวเส้นใยปาล์มเกิดความขรุขระ โดยการเกิดรูพรุนขึ้นที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งควรมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเฟสให้มากยิ่งขึ้น แต่การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้กำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ผิวเส้นใยออกบางส่วนอาจมีผลทำให้ความคงรูปของเส้นใยมีค่าลดลง ส่วนผลของการเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด พบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น 17.64 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเส้นใยไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ในขณะที่กรณีการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วย KBE903 มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง 26.04 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเส้นใยไม่ผ่านการปรับปรุงผิว การเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดสำหรับกรณีการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนระหว่างเส้นใยไฟบริลของเซลลูโลสถูกกำจัดส่งผลทำให้เมื่อเส้นใยได้รับแรงดึงเกิดการยึดตัวได้ง่ายขึ้นจึงมีผลทำให้ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบสามารถยึดตัวได้มากขึ้น

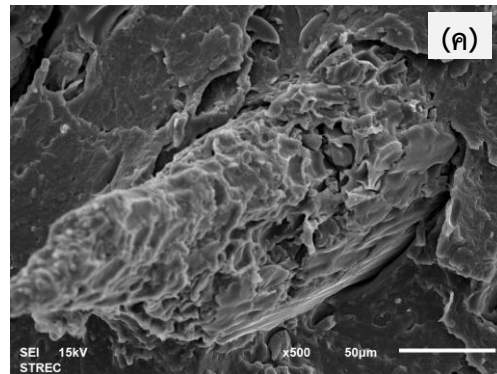
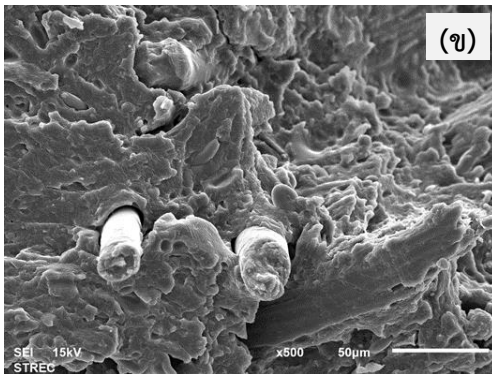
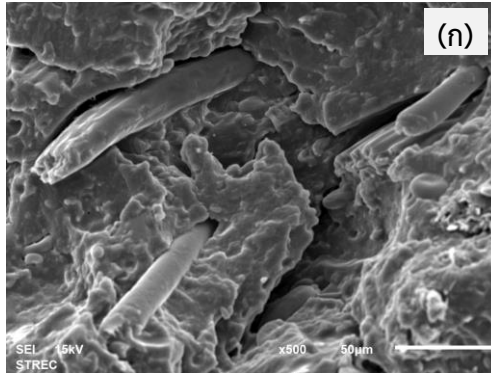
ผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความต้านทานแรงกระทำของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 % โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง โดยการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วย KBE903 ช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ในขณะที่การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ส่วนค่าความต้านทานแรงกระทำพบว่า ค่าความต้านทานแรงกระทำของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อนำเส้นใยไปผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ KBE903 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้น้ำมันที่หลงเหลือในเส้นใยปาล์มถูกกำจัดจึงมีผลทำให้ความเหนียวของเส้นใยปาล์มลดลง ส่วนกรณีการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระทำลดลงมากที่สุดอาจเนื่องมาจากการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น จึงอาจมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของกลูเตนเกิดการขยับตัวได้ยากขึ้น จึงส่งผลทำให้การยึดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง รูปที่ 4.13 แสดงภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกรณีเส้นใยปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงผิวภายหลังการทดสอบแรงกระทำ จากรูปพบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และ KBE903 ดังรูปที่ 4.13(ข) และ 4.13(ค) ตามลำดับ มีผลทำให้กลูเตนเกิดการเปื่อยผิวเส้นใยปาล์มได้ดีขึ้นและพบช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างเฟสลดลง ในขณะที่กรณีเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวพบการไม่เปื่อยผิวของกลูเตนหลายตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.13(ก)



รูปที่ 4.11 ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารอะมิโนไซเลน KBE903



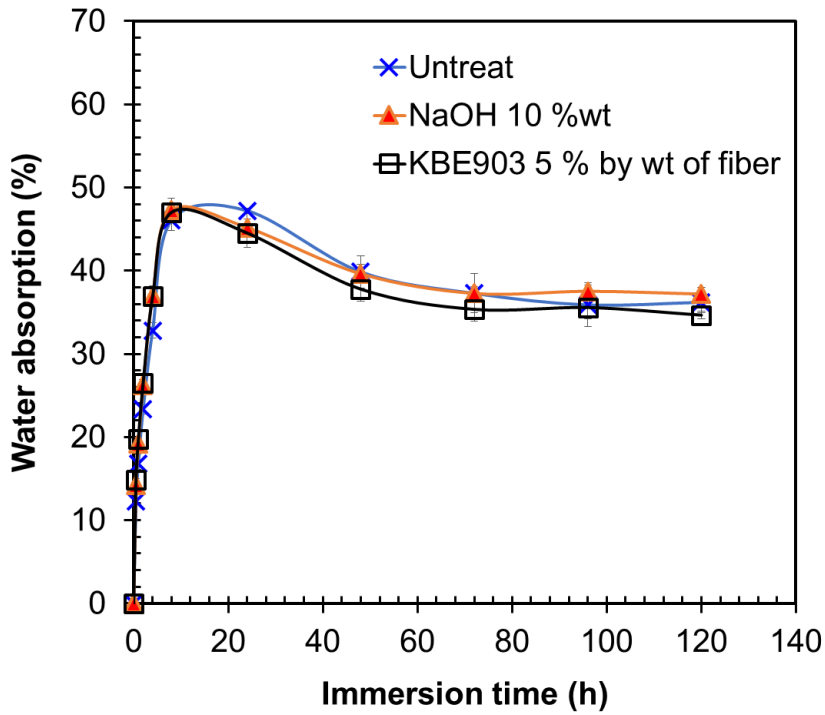
รูปที่ 4.12 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารอะมิโนไซเลน KBE903



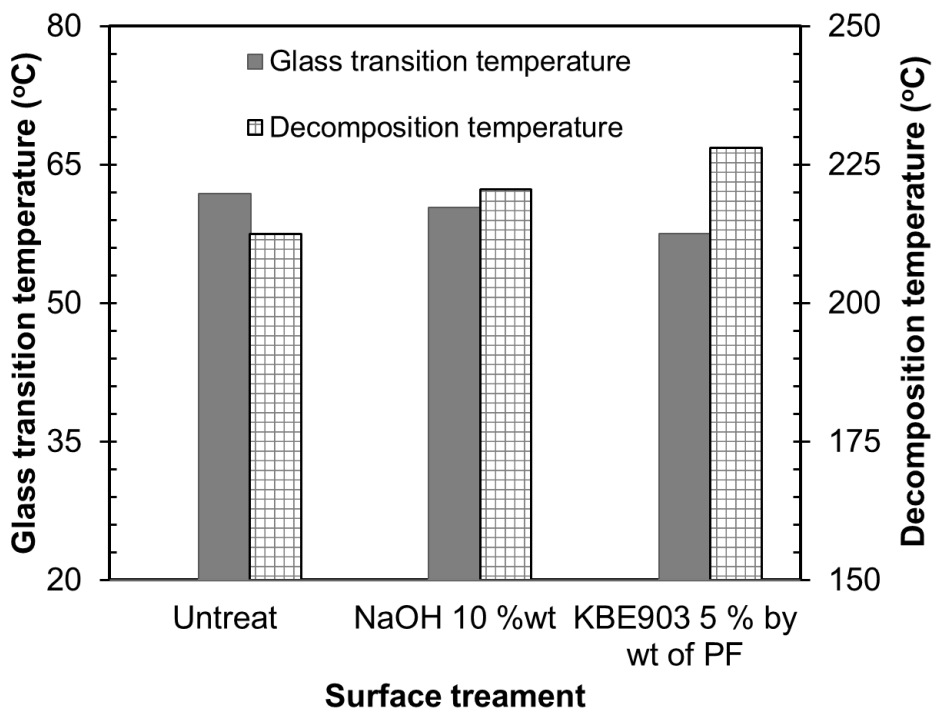
รูปที่ 4.13 ภาพสัณฐานวิทยาบริเวณแตกหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณ 15 %โดยน้ำหนัก ภายหลังจากทดสอบแรงกระแทก

- (ก) กรณีเส้นใยปาล์มไม่ผ่านการปรับปรุงผิว
- (ข) กรณีเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- (ค) กรณีเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย KBE903

รูปที่ 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลุ่มเตนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบทั้งกรณีเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงผิวมีแนวโน้มของการดูดซับน้ำใกล้เคียงกัน โดยในช่วงเวลา 0 ถึง 8 ชั่วโมง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานขึ้นมีผลทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานนานกว่า 8 ชั่วโมง มีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำลดลง และเริ่มมีค่าการดูดซับน้ำคงที่ เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานที่ 96 และ 82 ชั่วโมง สำหรับกรณีวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงผิว ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลุ่มเตนบางส่วนในชิ้นงานอาจถูกทำให้สลายตัวออกจากชิ้นงานเนื่องจากน้ำ



รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว เมื่อเวลาในการแช่น้ำต่างๆ กัน



รูปที่ 4.15 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว

รูปที่ 4.15 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว พบว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ KBE903 มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของกลูเตนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ในขณะที่อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำเส้นใยปาล์มไปผ่านการปรับปรุงผิวโดยกรณีการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนสูงที่สุด

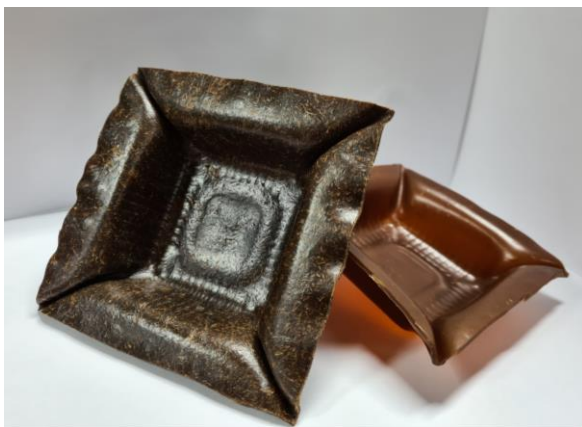
สำหรับผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์ม พบว่า สูตรวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อนที่ดีที่สุด คือ วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอะมิโนไซเลน KBE903 5 % โดยน้ำหนัก ดังนั้นทางคณะวิจัยจึงนำสูตรวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 ปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 % โดยน้ำหนักมาทำการทดสอบการแพร่ของสารจากภาชนะ โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานกลูเตน และวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่เติมเส้นใยปาล์มไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบการแพร่ของสาร เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1 สำหรับผลของสารที่ละลายออกจากชิ้นงาน พบว่า ในกรณีการแช่ชิ้นงานกลูเตน วัสดุเชิงประกอบทั้งกรณีเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงผิวในสารละลายกรดแอซีติก (ตัวแทนอาหารที่มีค่า $\text{pH} \leq 5$) สารละลายเอทานอล (ตัวแทนอาหารที่มีแอลกอฮอล์) และน้ำ (ตัวแทนอาหารที่มีค่า $\text{pH} > 5$) พบว่า มีสารที่เหลือจากการระเหยของสารละลายในปริมาณที่เกินจากค่ามาตรฐาน อ้างอิงตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 พ.ศ. 2548 เรื่อง กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐานภาชนะบรรจุที่ทำจากพลาสติกซึ่งประกาศที่ใช้สำหรับภาชนะที่ใช้บรรจุอาหาร ส่วนกรณีการแช่ชิ้นงานในนอร์มอลเฮปแทน (ตัวแทนอาหารที่มีไขมัน) พบว่า ตรวจไม่พบสารที่เหลือจากการระเหยสารละลาย ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า ทั้งกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบไม่มีความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหารประเภทที่มีความเป็นกรด แอลกอฮอล์ และมีน้ำ ผลดังกล่าวนี้ค่อนข้างมีความสอดคล้องกับผลของการทดสอบการดูดซับน้ำที่พบว่ามีสารละลายออกของกลูเตนเมื่อนำชิ้นงานไปแช่น้ำ สำหรับผลการตรวจสอบโลหะหนัก แคดเมียม และตะกั่วในเนื้อพลาสติก พบว่า มีไม่เกินค่ามาตรฐานอ้างอิงตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 พ.ศ. 2548

จากผลการทดสอบการแพร่ของสารในตารางที่ 4.1 กลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มไม่เหมาะสมที่จะนำมาสัมผัสกับอาหารที่มีความเป็นกรด เอทานอล และน้ำ แต่สามารถบรรจุอาหารที่มีไขมันได้ เพราะทนต่อไขมันและมีค่าปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐาน และยังสามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ต้นแบบที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธี

ทางชีวภาพที่ผลิตจากกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารที่ละลายออกมาจากชิ้นงานกลูเตน วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย KBE903 และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ทำการทดสอบตาม มอก 656-2556

การทดสอบ	ผลการทดสอบ		
	กลูเตน	วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว	วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ปรับปรุงผิวด้วย KBE903
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	5246 mg/dm ³	5356 mg/dm ³	5356 mg/dm ³
สารที่เหลือจากการระเหยในสารละลายกรดแอสติก ร้อยละ 4 โดยปริมาตร	13,101 mg/dm ³	10,975 mg/dm ³	9,919 mg/dm ³
สารที่เหลือจากการระเหยในสารละลายเอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร	10,731 mg/dm ³	10,331 mg/dm ³	10,123 mg/dm ³
สารที่เหลือจากการระเหยในนอร์มอลเฮปเทน	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
สารที่เหลือจากการระเหยในน้ำ	12,326 mg/dm ³	9,022 mg/dm ³	11,403 mg/dm ³
โลหะหนัก (เทียบเป็นตะกั่ว)	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
แคดเมียม	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ
ตะกั่วในเนื้อพลาสติก	2 mg/kg	4 mg/kg	7 mg/kg



รูปที่ 4.16 ต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ที่ผลิตจากกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีปริมาณเส้นใยปาล์ม 15 %โดยน้ำหนัก

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 การศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบระหว่างกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติ

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ตั้งแต่ 0 – 15 % โดยน้ำหนัก โดยทำการประเมินผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน การดูดซับน้ำ และสัณฐานวิทยา จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความต้านทานแรงกระทำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่มีผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดตัวลดลง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในเส้นใยปาล์ม อาจเกิดแรงกระทำทางเคมีกับกลูเตน
- สมบัติทางความร้อน พบว่า ทั้งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์ม
- สมบัติการดูดซับน้ำ พบว่า การดูดซับน้ำมีแนวโน้มค่าลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยปาล์มและกลูเตนมีแรงกระทำระหว่างกัน จึงมีส่วนช่วยลดโอกาสของหมู่ที่ชอบน้ำในกลูเตนในการดูดซับน้ำ
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า ทั้งกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว
- สูตรที่ดีที่สุดสำหรับผลของปริมาณเส้นใยปาล์ม คือ วัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 % โดยน้ำหนัก

5.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ

จากงานวิจัยในส่วนที่ 1 ทางคณะวิจัยได้เลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบกลูเตนที่มีการเติมเส้นใยปาล์ม 15 % โดยน้ำหนัก มาทำการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มด้วยสารอะมิโนไซเลน KBE903 เนื่องจากสูตรวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวให้ทั้งสมบัติการรับแรงที่ดี และมีราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าสูตรอื่นๆ ผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยปาล์มสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอะมิโนไซเลนมีผลทำให้ได้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุด แต่ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกและค่าการยืดตัวลดลงมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสารอะมิโนไซเลนมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างเฟสของกลูเตนและเส้นใยปาล์มได้ดีกว่ากรณีการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
- สมบัติทางความร้อน พบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยทั้งกรณีโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารอะมิโนไซเลนมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลง แต่ช่วยเพิ่มค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน
- สมบัติการดูดซับน้ำ พบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบมากนัก
- การทดสอบการแพร่ของสาร และปริมาณโลหะหนัก พบว่า กลูเตน วัสดุเชิงประกอบกลูเตน และเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับปรุงผิวและไม่ผ่านการปรับปรุงสามารถสัมผัสกับอาหารที่มีไขมันได้ แต่ไม่เหมาะที่จะนำไปสัมผัสกับอาหารที่มีความเป็นกรด น้ำ และแอลกอฮอล์ ส่วนปริมาณของโลหะหนัก พบว่า การทดสอบแช่ชิ้นงานกลูเตนและวัสดุเชิงประกอบในสารละลายตรวจไม่พบแคดเมียม และโลหะหนักในสารละลาย และมีปริมาณตะกั่วในเนื้อของชิ้นงานต่ำกว่าค่ามาตรฐาน
- สำหรับสูตรที่ดีที่สุดของการปรับปรุงผิวเส้นใย คือ วัสดุเชิงประกอบกลูเตนและเส้นใยปาล์มที่ถูกปรับปรุงผิวด้วยสารอะมิโนไซเลน 5 % โดยน้ำหนักของเส้นใย

บรรณานุกรม

1. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560, **ขยะพลาสติก ในทะเลไทย ใครว่าเรื่องเล็ก** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<https://www.dmcr.go.th/detailAll/13797/nws/0/>, 20 กรกฎาคม 2561.
2. Gómez-Martínez, D., Partal, P., Martínez, I. and Gallegos, C., 2013, “Gluten-based Bioplastics with Modified Controlled-release and Hydrophilic Properties”, **Industrial Crops and Product**, Vol. 43, pp. 704-710.
3. Zárata-Ramírez, L.S., Romero, A., Martínez, I., Bengoechea, C., Partal, P. and Guerrero, A., 2014, “Effect of Aldehydes on Thermomechanical Properties of Gluten-based Bioplastics”, **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 92, pp. 20-29.
4. Song, Y. and Zheng, Q., 2008, “Improved Tensile Strength of Glycerol-plasticized Gluten Bioplastic Containing Hydrophobic Liquids”, **Bioresource Technology**, Vol. 99, pp. 7665-7671.
5. Zhang, X., Do, M.D., Kurniawan, L., Qiao, G.G., 2010, “Wheat Gluten-based Renewable and Biodegradable Polymer Materials with Enhanced Hydrophobicity by Using Epoxidized Soybean Oil as a Modifier”, **Carbohydrate Research**, Vol. 345, pp. 2174-2182.
6. แก้วตา แก้วตาทิพย์, 2556, “พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี”, **วารสารวิทยาศาสตร์ มข.**, ปีที่ 41, ฉบับที่ 2, หน้า 309-319.
7. Auvergne, R., Morel, M.H., Menut, P., Gianl, O., Guilbert, S. and Robin, J.J., 2008, “Reactivity of Wheat Gluten Protein During Mechanical Mixing: Radical and Nucleophilic Reactions for the Addition of Molecules on Sulfur”, **Biomacromolecules**, Vol. 9, pp. 664-671.
8. Rasheed, F., 2011, **Production of Sustainable Bioplastic Materials from Wheat Gluten Proteins**, Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science, University of Agriculture Sciences, Uppsala, Sweden.

9. Domemek, S., Morel, M. H., Redl, A. and Guilbert, S., 2003, "Rheological Investigation of Swollen Gluten Polymer Networks: Effects of Process Parameters on Cross-link Density", **Macromolecular Symposia**, Vol. 200, pp. 137-145.
10. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2nd ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.
11. Blezzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose based Fibres", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
12. Kirk and Othmer, 1998, **Encyclopedia of Chemical Technology**, Vol. 25, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 627-647.
13. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.
14. Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigraphi, S. and Kochubabu, M., 2011, "Oil Palm Fiber (OPF) and Its Composites: A Review", **Industrial Crops and Product**, Vol. 33, pp. 7-22.
15. อรวรรณ รัตนวงษ์, 2543, การปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยจากทะเลลายปาล์มเปล่าเพื่อเพิ่มการดูดซับสารไม่มีขี้, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
16. Ching, Y.C. and Ng, T.S., 2014, "Effect of Preparation Conditions on Cellulose from Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber", **BioResources**, Vol. 9, No. 4, pp. 6373-6385.
17. Mathews, F.L. and Rawlings, R.D., 1994, **Composite Materials: Engineering and Science**, Chapman & Hall, Oxford, pp. 29-64.
18. Bledzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose based Fibres", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
19. วันดี ธรรมจारी, 2556, "การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ", **Technology promotion and INNOMag**, ฉบับที่ 39, หน้า 61-64.
20. กนกวรรณ มหารัชชมงคล, 2558, การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยไฮเลนเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีศึกษา ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
21. Plueddemann, E.P., 1991, **Silane Coupling Agents**, Plenum Press, New York, pp. 1-31.

22. Grossman, R.F., 2001, "Coupling agents" In **Polymer Modifiers and Additives**, Lutz, J.T. and Grossman, R.F. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 95-99.
23. Luqman, M., 2012, **Recent Advances in Plasticizers**, Intech, Croatia, pp. 141-144.
24. Hallstar, n.d., **The Function and Selection of Ester Plasticizers**. [Online] Available: <https://www.hallstarindustrial.com/webfoo/wp-content/uploads/hallstar-the-function-selection-ester-plasticizers.pdf>, December 29, 2020.
25. Diao, C., Dowding, T., Hemsri, S. and Parnas, R.S., 2014, "Toughened Wheat Gluten and Treated Coconut Fiber Composite", **Composites: Part A**, Vol. 58, pp. 90-97.
26. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
27. Wu, Q., Rabu, J. and Goulin, K., "Flexible Strength-improved and Crack-resistant Biocomposites Based on Plasticised Wheat Gluten Reinforced with a Flax-fibre-weave", **Composites: Part A**, Vol. 94, pp. 61-69.
28. Oushabi, A., Sair, S., Oudrhiri Hassani, F., Abboud, Y., Tanane, O. and El Bouari, A., 2017, "The Effect of Alkali Treatment on Mechanical, Morphological and Thermal Properties of Date Palm Fibers (DPFs): Study of the interface of DPF-Polyurethane Composite", **South African Journal of Chemical Engineering**, Vol. 23, pp. 116-123.

ประวัติย่อผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 836 3000
E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ
การสลายตัวของพอลิเมอร์
พลาสติกชีวภาพ

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Chaochanchaikul, K., 2019, "Improvement of Mechanical Properties and Water Absorption in Wheat Gluten by Epoxidized Natural Rubber", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 891, pp. 163-168.
2. Deelaman, W., Chaochanchaikul, K. and Tungsudjawong, K., 2018, "Effect of Banana Fibers on Mechanical and Physical Properties of Light Weight Concrete Blocks", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 151-155.
3. Hachana, N., Wongwanchai, T., Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2017, "Influence of Crosslinking Agent and Chain Extender on Properties of Gamma-Irradiated PLA", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 25, pp. 323-333.
4. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
5. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
6. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
7. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photodegradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
8. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, "Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering", **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.

9. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, "Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin", **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
10. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO₂ Stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
11. Pattamasattayasonti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of UV-Weathering Aging and CeO₂ Based Coating Layer on Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.
12. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchean, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
13. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, "Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
14. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, "Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and CaCO₃/LDPE Composites", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
15. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, "Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite", **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.

16. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.
17. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
18. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, "Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
19. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.102, No. 1, pp. 598-606.
20. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.
21. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
22. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.ฉันทิทิพ สกุลخمฤทัย
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Chuntip Sakulkhamaruethai

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก
อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 02 549 3484-5
E-mail : chuntip.s@en.rmutt.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Ph.D. (Environmental Technology) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยียาง
วัสดุพอลิเมอร์
วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์
สารเติมแต่งยางและพอลิเมอร์

6. ประสพการณ์งานวิจัย

1. Sriloy, N., Wimolmala, E., Sombatsompop, N., Kumnuantip, C. and Thongpin, C., 2010, “Effects of Silica Based Fillers, Surface Treatment and Curing Method on Mechanical Properties of Silica/Unsaturated Polyester Composites”, **Macromolecular Research**, Vol. 18, pp. 372-379.
2. Sombatsompop, N. and Kumnuantip, C., 2006, “Comparison of Physical and Mechanical Properties of NR/ Reclaimed Rubber Blends Vulcanized by Conventional Thermal or Microwave Irradiation Methods”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 100, pp. 5039-5048.
3. Kumnuantip, C. and Sombatsompop, N., 2003, “Dynamic Mechanical Properties and Swelling Behaviour of NR/Reclaimed Rubber Blends”, **Materials Letters**, Vol. 57, pp. 3167-3174.
4. Kumnuantip, C. and Sombatsompop, N., 2003, “Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire-Tread Reclaimed Rubber/NR Compounds”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 87, pp. 1723-1731.