

# รายงานการวิจัย

# โครงการวิจัย

ผลกระทบของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้ว

Effects of coupling agents on mechanical and thermal properties of polypropylene-matrix composites reinforced with cellulose nanofibres isolated from kenaf fibres

ดร.นิภาพรรณ	โสตถิยานนท์	หัวหน้าโครงการ
10.00111100000		

อ.ดร.สรินทร ลิ่มปนาท ผู้ร่วมวิจัย

นายศรีไฉล ขุนทน ผู้ร่วมวิจัย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กุมภาพันธ์ 2562

# กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการพิจารณาให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินปี 2561 สนับสนุนเพื่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ นักวิจัยผู้ช่วย และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่สถาบันวิจัย โลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวก ในระหว่างการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณบริษัท Clariant Plastics and Coatings จำกัด และบริษัท BYK Additives & Instruments จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ตามลำดับ

ขอขอบพระคุณ บริษัท สาลี่ คัลเล่อร์ จำกัด (มหาชน) และพนักงานที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวย ความสะดวกในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

# บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยปอแก้วโดยใช้กระบวนการอัลคาไลน์ทรีท เม้นท์และการเตรียมเยื่อสีขาว เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้ (เส้นใย K) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 9 ไมโครเมตร โดยมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยเซลลูโลสทางการค้าที่สกัดจากเส้นใยฝ้าย (เส้นใย C) นอกจากนี้เส้นใย K ยังมีความเป็นผลึกและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงกว่าเส้นใย C ซึ่งเส้นใย K และเส้นใย C นำมาใช้ เป็นสารตัวเติมในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 3 ชนิด ได้แก่ Aldrich PP-g-MA (A), Licocene PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ซึ่งมีโครงสร้าง ทางเคมีเหมือนกัน สำหรับสมบัติทางความร้อนของ MAPP พบว่า MAPP ชนิด L มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ทางความร้อน อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมผลึกต่ำที่สุด ในขณะที่ MAPP ชนิด A มีอุณหภูมิ เริ่มการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด แต่ MAPP ชนิด S มีอุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมผลึก ต่ำที่สุด

กระบวนการที่ใช้สำหรับการเตรียมวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตคือการบดผสมแบบสองลูกกลิ้งตาม ด้วยการกดอัดด้วยความร้อน ระดับปริมาณของเส้นใย K และเส้นใย C ที่เติมคือร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และระดับปริมาณของสารคู่ควบ MAPP ที่เติมคือร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก จากนั้นศึกษาสมบัติความทน แรงดึง สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าว

การเติมเส้นใย K และเส้นใย C มีผลต่อสมบัติความทนแรงดึงและสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิตเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ภาพทางสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้น ใย K และ C แสดงร่องรอยการหลุดออกของเส้นใย ซึ่งชี้ถึงการยึดติดที่ไม่ดีของเส้นใยและเมทริกซ์

สำหรับการเติมสารคู่ควบ MAPP นั้น สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุพอลิพรอพิลีน คอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเค้นแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของสภาพ ยึดหยุ่น (มากกว่าร้อยละ 85) โดยเป็นผลเนื่องมาจากการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งแสดงในภาพทางสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบ MAPP นอกจากนี้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอม โพสิตที่เติมด้วยเส้นใย K มีแนวโน้มของสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมด้วย เส้นใย C สำหรับผลกระทบของปริมาณของสารคู่ควบ MAPP พบว่า วัสดุคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบในปริมาณ ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก มีสมบัติความทนแรงดึงดีกว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบในปริมาณ ข้ำหนัก ในกรณีของผลกระทบของชนิดของสารคู่ควบ พบว่า สารคู่ควบชนิด A มีผลต่อมอดุลัสของสภาพ ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าสารคู่ควบชนิดอื่น

อย่างไรก็ตาม การเติมสารคู่ควบ MAPP ไม่มีผลต่อการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตอย่าง มีนัยสำคัญ ทั้งนี้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และสารคู่ควบ มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทาง ความร้อนสูงกว่าวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย C และสารคู่ควบ นอกจากนี้อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมผลึกของวัสดุคอมโพสิตมีผลกระทบจากการเติมสารคู่ควบเพียงเล็กน้อย

# บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

This work involved cellulose fibres extraction from kenaf fibres by using the alkaline treatment and the pulp bleaching. The extracted cellulose fibres (K fibres) had the average diameter of approximately 9 microns, and the average diameter of the K fibres was also smaller than that of the commercial cellulose fibres extracted from cotton fibres (C fibres). Additionally, the K fibres had higher crystallinity and thermal decomposition temperatures than the C fibres. Both of the K fibres and the C fibres were used as fillers in the polypropylene composites.

There were 3 types of maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) used as coupling agents in this work, and they included Aldrich PP-g-MA (A), Licocene PP MA 6252 GR (L), and SCONA TPPP 8112 FA (S). All of them also had the same chemical structures. For the thermal properties of the MAPP, it was found that the MAPP type L had the lowest onset thermal decomposition temperature, crystallisation temperature and melting temperature. However, the MAPP type A had the highest onset thermal decomposition temperature, whereas the MAPP type S had the highest crystallisation temperature and melting temperature.

The polypropylene (PP) composite fabrication was two-roll milling followed by hot pressing. The loading levels of the K fibres and the C fibres were 1 and 5 wt%, and the MAPP loading levels were 0.8 and 1 wt%. The tensile properties, morphology and thermal properties of the composites were then examined.

The addition of the K fibres and the C fibres had slight effects on the tensile properties and the thermal properties of the PP composites. The SEM micrographs of the PP/K fibre and PP/C fibre composites also show fibre imprint indicating poor fibre-matrix adhesion.

For the MAPP addition, it improved the tensile properties of the PP/K fibre and PP/C fibre composites, especially the ultimate tensile strengths and the elastic moduli (more than 85%). This is attributed to good adhesion between the fibres and the PP matrix as show in the SEM micrographs of the composites filled with the MAPP. Additionally, the PP/K fibre composites tended to have better tensile properties than the PP/C fibre counterparts. For the effects of the MAPP contents, the composites filled with 0.8 wt% MAPP had better

tensile properties than the composites filled with 1 wt% MAPP. In the case of the MAPP type effects, the MAPP type A had more effects on the elastic moduli of the composites than the other MAPP types.

However, the MAPP loading did not affect the thermal decomposition of the composites significantly. The PP/K/MAPP composites also had higher onset thermal decomposition temperature than the PP/C/MAPP counterparts. In addition, the crystallisation temperatures and melting temperatures of the composites were marginally affected by the addition of the MAPP.

# สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ስ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ବ
สารบัญตาราง	ណ
สารบัญรูป	លូ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	7
2.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้	7
2.2 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยปอแก้วด้วยกระบวนการทางเคมี	7
2.2.1 การทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์	7
2.2.2 การเตรียมเยื่อสีขาว	8
2.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยเซลลูโลส	8
2.3.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส	8
2.3.2 การศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส	8
2.3.3 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส	9
2.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารคู่ควบ	9
2.4.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบ	9
2.4.2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ	9
2.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารคู่ควบ	10
2.5 การเตรียมวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส	10
2.6 การศึกษาสมบัติของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส	12
2.6.1 การศึกษาสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ของวัสดุคอมโพสิต	12
2.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของวัสดุคอมโพสิต	12
2.6.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของวัสดุคอมโพสิต	12

บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	13
3.1 ลักษณะเฉพาะของเส้นใยเซลลูโลส	13
3.1.1 ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส	13
3.1.2 ความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส	14
3.1.3 การสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส	15
3.2 ลักษณะเฉพาะของสารคู่ควบ	16
3.2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบ	16
3.2.2 การสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ	17
3.2.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารคู่ควบ	19
3.3 สมบัติของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส	22
3.3.1 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ของวัสดุคอมโพสิต	22
3.3.2 สัณฐานวิทยา (morphology) ของวัสดุคอมโพสิต	25
3.3.3 การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต	34
3.3.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต	35
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	41
4.1 สรุปผลการวิจัย	41
4.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย	44
ภาคผนวก	49
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	51
ประวัติคณะผู้วิจัย	61

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน เส้นใยเซลลูโลส และสารคู่ควบ สำหรับการเตรียมวัสดุคอมโพสิต
ตารางที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (ASPECT RATIO) ของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว
(เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)14
ตารางที่ 3 อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T <sub>ONSET</sub> ) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T <sub>MAX</sub> ) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทาง
ความร้อน (T <sub>ENDSET</sub> ) ของ เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)
ตารางที่ 4 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (ALDRICH PP-
G-MA, LICOCENE PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที 18
ตารางที่ 5 อุณหภูมิการเกิดผลึก (CRYSTALLISATION TEMPERATURE, T <sub>c</sub> ) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก (ΔH <sub>c</sub> ) อุณหภูมิการหลอม
ผลึก (MELTING TEMPERATURE, T <sub>M</sub> ) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H <sub>M</sub> ) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และสารคู่ควบ
มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (ALDRICH PP-G-MA, LICOCENE PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112
FA)
ตารางที่ 6 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิ
ลีนคอมโพสิตทั้งที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ
ตารางที่ 7 อุณหภูมิการเกิดผลึก (CRYSTALLISATION TEMPERATURE, T <sub>c</sub> ) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก ( $\Delta$ H <sub>c</sub> ) อุณหภูมิการหลอม
ผลึก (MELTING TEMPERATURE, T <sub>M</sub> ) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลป์ในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H <sub>M</sub> ) ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิตทั้งที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ

# สารบัญรูป

รูปที่ 1 องค์ประกอบเชิงโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ในเส้นใยธรรมชาติ (KABIR ET AL., 2012)
รูปที่ 2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยปอแก้วที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์ ตามด้วยการเตรียมเยื่อสีขาว และผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง (เส้น
ใย K) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)13
รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)
รูปที่ 4 XRD แพทเทิร์นของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)
รูปที่ 5 (A) TGA เทอร์โมแกรม และ (B) DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้น ใย C)
รปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิพรอพิลีนและสารค่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (ALDRICH PP-G-MA, LICOCENE
PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)
รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน
้ รูปที่ 8 DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) ของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิก
แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (ALDRICH PP-G-MA, LICOCENE PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)
รูปที่ 9 DSC เทอร์โมแกรมแสดงพืคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ
้ พรอพิลีน 3 ชนิด (ALDRICH PP-G-MA, LICOCENE PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)
รูปที่ 10 ความเค้นแรงดึงสูงสุด (ULTIMATE TENSILE STRENGTH) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย
เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮ
้ ใดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) 3 ชนิด ได้แก่ ALDRICH PP-G-MA (A), LICOCENE PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112
FA (S) ในปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก
รูปที่ 11 ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด (STRAIN AT MAXIMUM STRESS) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย
เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮ
ไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) 3 ชนิด ได้แก่ ALDRICH PP-G-MA (A), LICOCENE PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112
FA (S) ในปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก24
รูปที่ 12 มอดุลัสของสภาพยึดหยุ่น (ELASTIC MODULUS) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และวัสดุพอลิพรอพิลีน คอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้
จากปอแก้ว (K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์
พอลิพรอพิลีน (MAPP) 3 ชนิด ได้แก่ ALDRICH PP-G-MA (A), LICOCENE PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ใน
ปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก
รูปที่ 13 สัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)
รูปที่ 14 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) ที่
กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)26
รูปที่ 15 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ
ALDRICH PP-G-MA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)
รูปที่ 16 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ
LICOCENE PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/L0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา) 27
รูปที่ 17 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ
SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/S0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)

รูปที่ 18 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 19 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 20 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 21 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) ที่ รูปที่ 22 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 23 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 24 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 25 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) ที่กำลังขยาย รูปที่ 26 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ ALDRICH รูปที่ 27 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 28 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA รูปที่ 29 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) ที่กำลังขยาย รูปที่ 30 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ ALDRICH รูปที่ 31 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ รูปที่ 32 สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA รูปที่ 33 (A) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (B) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีค การหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วใน ้ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน ALDRICH PP-G-MA, LICOCENE PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/A1, PP/K1/L0.8, PP/K1/L1, PP/K1/S0.8 และ PP/K1/S1 รูปที่ 34 (A) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (B) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีค

รูบท 34 (A) DSC เทอรเมแกรมแสดงพคการเกดผลก (เมอลดอุณหภูมลงหลงจากการเหความรอนครงท 1) และ (B) DSC เทอรเมแกรมแสดงพค การหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วใน 

# บทที่ 1 บทนำ

# 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยได้ถูกพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ซึ่งเส้น ใยส่วนใหญ่ที่ใช้กันมากในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตคือเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด และ เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้มีข้อเสียหลายประการ เช่น ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กัด กร่อนเครื่องมือที่ใช้ และเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (Espert, Vilaplana & Karlsson, 2004) ด้วยเหตุผล ดังกล่าว การใช้เส้นใยธรรมชาติจากพืชในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็น แนวทางที่ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีของการใช้เส้นใยสังเคราะห์อีกด้วย

วัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติจากพืช มีความสำคัญในการนำไป ประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เช่น ชิ้นส่วนยานพาหนะ และวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่กัด กร่อนเครื่องมือที่ใช้ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ และน้ำหนักเบา แต่อย่างไรก็ตาม เส้นใยธรรมชาติมีข้อเสียบางประการ เช่น ดูดความชื้นได้มาก และจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ไม่ สูงนัก นอกจากนี้ยังมีความเข้ากันไม่ได้ระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากเส้นใย ธรรมชาติมีสมบัติชอบน้ำ แต่พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ

การแยกเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยธรรมชาติ สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต มากขึ้น เนื่องจากในขั้นตอนการสกัดแยกเส้นใยเซลลูโลสนั้น ทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ใน เส้นใยธรรมชาติมีปริมาณลดลงมาก ซึ่งถ้าหากมีการสกัดแยกเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสและนำมาใช้เป็นสาร ตัวเติมในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต จะเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลลูโลสและพอลิเมอร์เม ทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น

เส้นใยปอแก้วเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากปอแก้วสามารถเติบโตได้เร็วใน หลายพื้นที่ ซึ่งในประเทศไทย มีการปลูกปอแก้วมากในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ มีขนาดความสูงของต้นมากถึง 3.7-5.5 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น 25-51 มิลลิเมตร ใน สภาพอากาศที่หลากหลาย ในเวลาเพียง 4-5 เดือนเท่านั้น (Ashori et al., 2006) องค์ประกอบหลักทาง เคมีของเส้นใยปอแก้วคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพกติน และแว็กซ์ (Thomas et al., 2011) สำหรับสมบัติของเส้นใยปอแก้วนั้น ขึ้นอยู่กับ แหล่งที่มา การปลูก อายุ และเทคนิคการแยก (Feng et al., 2001; Sanadi et al., 1995) การนำเส้นใยปอแก้วมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ไม่ เพียงแต่เป็นการนำมาใช้เพื่อทดแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์เท่านั้น แต่ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของเส้นใย ปอแก้ว นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณการใช้เทอร์โมพลาสติกอีกด้วย

# 1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการผสม ชนิดและปริมาณของเส้นใยปอแก้วที่มีต่อ กระบวนการผสมด้วยวิธีทางความร้อนสำหรับวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ แก้วสั้นและเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอแก้ว
- เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดแยกจากเส้นใยปอแก้วที่มีต่อ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้ว สั้นและเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอแก้ว
- เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความ ร้อนของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วสั้นและเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ แยกได้จากเส้นใยปอแก้ว
- ▶ เพื่อศึกษาแนวทางการนำเส้นใยปอแก้วมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ

#### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการเตรียมวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วสั้นและเส้นใยนาโน เซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอแก้ว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผสมวัสดุคอมโพสิตด้วย วิธีทางความร้อน เช่น ความเร็วรอบในการผสม และปริมาณเส้นใยปอแก้ว นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มี ผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต เช่น ชนิดและปริมาณของสารคู่ควบ อีกทั้งยังศึกษาขนาดและสมบัติทางความร้อนของเส้นใยที่ใช้

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้มีการนำเส้นใยเซลลูโลสทางการค้าซึ่งสกัดจากฝ้ายมาใช้ในขั้นตอนการ ขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากปอแก้ว อีกทั้งเป็นการทดแทน การใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้ว เนื่องจากสามารถเตรียมได้ปริมาณน้อย และใช้ระยะ เวลานาน ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการใช้เครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่

# 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผสมด้วยวิธีทางความร้อนสำหรับวัสดุพอลิพรอพิลีน คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วสั้นและเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอแก้ว รวมทั้งทราบ ถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณของเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วสั้นและเส้นใยเซลลูโลสที่แยก ได้จากเส้นใยปอแก้ว อีกทั้งยังทราบถึงผลกระทบของสารคู่ควบและเส้นใยเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอ แก้วที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ศึกษาของวัสดุพิลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยปอ เส้นใยปอแก้ว เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนสำหรับยานพาหนะวัสดุ ในงานก่อสร้าง และวัสดุพลาสติกคอมพาวด์ต่าง ๆ เป็นต้น

# 1.5 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตมาก ขึ้น เพื่อทดแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนกับเครื่องมือที่ใช้ นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ และมีน้ำหนักเบา

โดยส่วนใหญ่เส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงนั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับ ไมโครเมตร การประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภทมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง และ สามารถใช้งานได้หลากหลาย จึงมีการนำวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตรมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อเป็นการ ปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตให้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมวัสดุที่มีขนาดระดับนา โนเมตรนั้น ยังมีข้อจำกัดในกรณีที่ต้องเตรียมในปริมาณมาก

สำหรับองค์ประกอบหลักทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สำหรับองค์ประกอบเชิงโครงสร้างภาคตัดขวางของเส้นใยแสดงในรูปที่ 1 การแยกเส้นใยธรรมชาติให้มี ขนาดระดับนาโนเมตรนั้น เฮมิเซลลูโลสและลิกนินซึ่งทำหน้าที่ค้ำส่วนที่เป็นเซลลูโลสจะถูกกำจัดออกไปจาก เส้นใย จะทำให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดเล็กลงระดับไมโครเมตรถึงระดับนาโนเมตร



# ร**ูปที่ 1** องค์ประกอบเชิงโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ในเส้นใยธรรมชาติ (Kabir et al., 2012)

ในโครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้ว โดยจะนำเส้นใยเซลลูโลส ดังกล่าวไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอม โพสิตให้ดีขึ้น ซึ่งความท้าทายของการนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสมาใช้คือ ความเข้ากันไม่ได้ของเส้นใยเซล ลูโสลที่มีสมบัติชอบน้ำกับเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ และการที่เส้นใยมีสมบัติชอบน้ำ ทำ ให้สามารถดูดความชื้นได้ง่าย อีกทั้งอาจเกิดปัญหาเรื่องการกระจายตัวของเส้นใยในเทอร์โมพลาสติกเม ทริกซ์ ทั้งนี้โครงการวิจัยนี้สนใจที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ของเส้นใยเซลลูโสลกับเทอร์โมพลาสติกเม ทริกซ์ ทั้งนี้โครงการวิจัยนี้สนใจที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ของเส้นใยเซลลูโสลกับเทอร์โมพลาสติกเม ทริกซ์ โดยใช้สารคู่ควบ (coupling agents) เนื่องจากพันธะการยึดเหนี่ยว (interfacial bonding) ระหว่าง เส้นใยกับเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต (Thwe & Liao, 2003) แต่ อย่างไรก็ตาม การเตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต มีกระบวนการ หลายขั้นตอน และจำเป็นต้องใช้ระยะเวลานาน เพื่อให้ได้ปริมาณเส้นใยที่มากพอสำหรับการขึ้นรูปขึ้นงาน คอมโพสิต ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทางทีมวิจัยจึงมีการปรับเปลี่ยนแนวทางการศึกษาวิจัย โดยศึกษาการแยก เส้นใยไมโครเซลลูโลสจากเส้นใยปอแก้ว และนำมาเปรียบเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสทางการค้าที่สกัดจากเส้น ใยฝ้ายแทน และศึกษาผลกระทบของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติเชิงกล (สมบัติความทนแรงดึง) และสมบัติทาง ความร้อนของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส

# 1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การนำเส้นใยเซลลูโลสมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตได้รับความสนใจเนื่องจากว่า การ แยกเส้นใยธรรมชาติจากพืชให้ได้เป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสนั้น จะลดส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้ได้เส้นใยที่ได้ มีความเป็นผลึกมาก และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) สูง อีกทั้งยังมีพื้นที่ ผิวสัมผัสมากขึ้น จึงสามารถทำหน้าที่เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตได้ดี

Yang และ Gardner (2011) ศึกษาสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ของวัสดุพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofibre) เซลลูโลสไมโครไฟบริล (microfibrillated cellulose) และไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส (microcrystalline cellulose) ในปริมาณ ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุนี้ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการหลอมผสม (melt mixing) จาก การศึกษาพบว่าปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงคือปริมาณร้อยละ 6 โดย น้ำหนัก เนื่องจากมีการเกาะรวมกลุ่มของเส้นใยน้อย ทั้งนี้โดยภาพรวมการใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสให้ผล ดีกว่าการใช้เซลลูโลสไมโครไฟบริลเล็กน้อย ส่วนการใช้เส้นใยไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีผลทำให้สมบัติ

ความทนแรงดึงของวัสดุต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสและเซลลูโลสไมโครไฟบริล Jonoobi และคณะ (2010) แยกเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเยื่อปอแก้วเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุ เสริมแรงในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ โดยปริมาณเส้นใยที่ใช้คือร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก สำหรับ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตนี้มี 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการผสมเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ในตัว ทำละลายผสมระหว่างอะซิโตนและคลอโรฟอร์มในอัตราส่วน 9:1 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลซียส หลังจากนั้น ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง ในระบบสุญญากาศ แล้วจึงทำให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก สำหรับขั้นตอนที่ 2 คือการนำวัสดุคอมโพสิตไปผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160-200 องศาเซลเซียส (ตั้งแต่โซนที่ป้อนวัสดุ จนถึงหัวดาย) ส่วนขั้นตอนที่ 3 คือการนำวัสดุที่ได้ไปผ่านกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (injection moulding)

Jonoobi และคณะ (2010) นำวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลส ที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลพลวัติ และพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้นเมื่อ เติมเส้นใยในปริมาณมากขึ้น โดยถ้าเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุคอมโพสิต พบว่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) เพิ่มขึ้นร้อยละ 21 และ มอดูลัส (tensile modulus) เพิ่มขึ้น ร้อยละ 24 สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของวัสดุคอมโพสิตพบว่ามอดูลัสสะสม (storage modulus) ของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสสะสมของวัสดุที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส มีค่าในช่วง 2,800-4,400 เมกะปาสคาล และค่ามอดูลัสสะสมของวัสดุที่อุณหภูมิ 70 องศา เซลเซียส มีค่าในช่วง 170-2,500 เมกะปาสคาล ส่วนค่าแทนเดลต้า (Tan  $\delta$ ) ของวัสดุมีค่าลดลงและ ตำแหน่งพีคปรากฏที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เนื่องจากว่าเส้นใยที่เติมนั้นจำกัดการเคลื่อนที่ ของสายโซ่โมเลกุล

Jonoobi และคณะ (2012) ใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วเป็นวัสดุเสริมแรงใน พอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิต โดยเส้นใยนาโนที่ใช้มีการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการอะเซทิเลชัน (acetylation) และปริมาณเส้นใยที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิตคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งการขั้นตอนการเตรียม วัสดุคอมโพสิตนี้ใช้ขั้นตอนเดียวกับ Jonoobi และคณะ (2010) วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบ สมบัติเชิงกล และพบว่าเส้นใยนาโนที่ผ่านกระบวนการอะเซทิเลชันไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดี ขึ้นกว่าการใช้เส้นใยนาโนที่ไม่ผ่านกระบวนการอะเซทิเลชัน เนื่องจากความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนลดลง หลังจากผ่านกระบวนการอะเซทิเลชัน

Takagi และคณะ (2013) เตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกระดาษเสีย (waste paper) จากนั้น นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยปริมาณเส้นใยที่ใช้คือร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก วัสดุคอมโพสิตนี้ เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความดัน 10 เมกะ ปาสคาล นาน 10 นาที จากนั้นถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล และพบว่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยมากขึ้นถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีค่า ความเค้นแรงดึงอยู่ในช่วง 10-14 เมกะปาสคาล แต่ความเค้นแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใย ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่า 13 เมกะปาสคาล ซึ่งการลดลงของค่าความเค้นแรงดึงนั้นเป็นผลมาจากการ รวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerations) ของเส้นใย ส่วนมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของ วัสดุคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยมากขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 424-1,321 เมกะปาสคาล สำหรับ ความเค้นแรงดึงและมอดูลัสของยังของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีค่า 8 เมกะปาสคาล และ 353 เมกะ ปาสคาล ตามลำดับ

Wang และ Sain (2007) แยกเส้นใยนาโนจากเมล็ดถั่วเหลือง และนำเส้นใยนาโนที่ได้ไปใช้เป็น วัสดุเสริมแรงในพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต ซึ่งปริมาณของเส้นใยที่ใช้คือ ร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก โดยวัสดุคอมโพสิตถูกขึ้นรูปด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศา เซลเซียส และความดัน 50 เมกะปาสคาล หลังจากผ่านการผสมในเครื่องบราเบนเดอร์ (brabender) ที่ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทั้งนี้มีการเคลือบผิวเส้นใยด้วยเอทิลีน-อะคริลิคโอลิโกเมอร์ (ethyleneacrylic oligomer) เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ วัสดุพอลิเอทิลีนและพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยนาโนมีสมบัติเชิงกล (ความเค้นสูงสุด (maximum stress) และ มอดูลัส (modulus)) ดีขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยนาโนมีการกระจายตัวอยู่ใน ระดับที่รับได้ และเอทิลีน-อะคริลิคโอลิโกเมอร์ยังทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างเส้นใยนาโนซึ่งมีสมบัติ ชอบน้ำกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังพบว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ ดีกว่าพอลิเอทิลีนคอมโพสิต นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเพื่อศึกษาผลของ สารคู่ควบที่มีค่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างเช่น Lee และคณะ (2013) ศึกษาสมบัติทางความร้อน ของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วร้อยละ 30 โดยปริมาตร และใช้สารคู่ควบมาเล อิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนร้อยละ 5 โดยปริมาตร ซึ่งพบว่าการเติมสารคู่ควบไม่มีผลต่ออุณหภูมิ การเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>) และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition temperature, T<sub>d</sub>) ของวัสดุคอมโพ สิตอย่างมีนัยสำคัญ

Qiu และคณะ (2003) ขึ้นรูปวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่มีความ เป็นผลึกสูงและใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดร์กราฟท์พอลิพรอพิลีน และศึกษาสมบัติของวัสดุดังกล่าว ซึ่ง พบว่า การใช้สารคู่ควบช่วยเพิ่มความเค้นแรงดึงและมอดุลัสของยัง เนื่องจากมีการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใย และพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้เส้นใยเซลลูโลสยังทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) สำหรับ การเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีน โดยช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุคอมโพสิต ส่วนในกรณีที่ไม่มีการ ใช้สารคู่ควบพบว่า ความเค้นแรงดึงของวัสดุลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยเซลลูโลส

Nayak และ Mohanty (2010) ใช้เส้นใยป่าศรนารายณ์ (ขนาดประมาณ 180-300 ไมโครเมตร) ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในการเสริมแรงวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต และใช้สารคู่ควบมาเลอิก แอนไฮไดร์กราฟท์พอลิพรอพิลีนปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้วัสดุคอมโพสิตดังกล่าว ขึ้นรูปด้วยการ อัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ที่ความเร็วสกรู 50 รอบต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 155-170 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมสารคู่ควบมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 40.36 เมกะปาสคาล ซึ่งเมื่อเติมสารคู่ ควบทำให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเพิ่มเป็น 42.1 เมกะปาสคาล ส่วนค่ามอดุลัสของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มจาก 961 เมกะปาสคาล เป็น 100 เมกะปาสคาล เมื่อมีการใช้สารคู่ควบ

# บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

# 2.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

- เส้นใยปอแก้ว (kenaf fibres, KF) จากกลุ่มแม่บ้านสานใยปอบ้านตอกแป้น ตำบลบ้านค้อ อำเภอ
  เมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
- เส้นใยเซลลูโลสจากฝ้าย (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.6) จากบริษัท Guilin Qihong Technology จำกัด ประเทศจีน
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) แบบเม็ด เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จาก บริษัท CARLO ERBA Reagents ประเทศอิตาลี
- โฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ความเข้มข้นร้อยละ 30 เกรด ห้องปฏิบัติการ (LR grade) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย
- กรดเกลเซียลอะซิติก (glacial acetic acid, CH<sub>3</sub>COOH) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย
- มทานอล (methanol, CH<sub>3</sub>OH) ความเข้มข้นร้อยละ 99.7 เกรดอุตสาหกรรม (commercial grade) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย
- พอลิพรอพิลีน (Moplen HP561R) เกรดอุตสาหกรรม (commercial grade) จากบริษัท Basell Advanced Polyolefins (ประเทศไทย) จำกัด ประเทศไทย โดยมีอัตราการไหล (ที่ 230 องศา เซลเซียส/2.16 กิโลกรัม) 25 กรัม/10 นาที และความหนาแน่น 0.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (polypropylene-graft-maleic anhydride, PP-g-MA) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสิงคโปร์
- Licocene PP MA 6252 GR (มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน) จากบริษัท Clariant Plastics and Coatings ประเทศเยอรมนี
- SCONA TPPP 8112 FA (มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน) จากบริษัท BYK Additives
  & Instruments ประเทศเยอรมนี

## 2.2 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยปอแก้วด้วยกระบวนการทางเคมี

#### 2.2.1 การทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์

นำเส้นใยปอแก้วแซ่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (Wang et al., 2007) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ล้างแล้วมีค่าประมาณ 6-7 แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศา เซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนของเส้นใยต่อสารละลายมีค่า 1:20 เส้นใยที่ผ่านกระบวนการนี้จะ ใช้ชื่อว่า "KF-T"

## 2.2.2 การเตรียมเยื่อสีขาว

แช่เส้นใยปอแก้วที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์ (KF-T) ในสารละลายผสมระหว่างไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก และกรดอะซิติก เข้มข้นร้อยละ 99.7 ในอัตราส่วน 50:50 (Song et. al., 2016; Tan et al., 2010) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Song et. al., 2016) จากนั้นล้างเส้นใยด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ล้างแล้วมี ค่าประมาณ 6-7 แล้วล้างเส้นใยด้วยเมทานอลร้อน เมื่อเมทานอลระเหยจนหมด นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง อัตราส่วนของเส้นใยต่อสารละลายคือ 1:20 จากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปบด ผ่านตะแกรงซึ่งมีรูขนาด 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องบดพลาสติกยี่ห้อ RETSCH รุ่น SP2 แล้วนำมาร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 180 ไมครอน เส้นใยที่ผ่านการบดและการร่อนผ่านตะแกรง เรียกว่า "KF-T-M-G"

#### 2.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยเซลลูโลส

เส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (KF-T-M-G) ด้วย กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเรียกแทนเส้นใยดังกล่าวนี้ว่า "เส้นใย K" และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย ซึ่ง เป็นเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า โดยจะเรียกแทนเส้นใยนี้ว่า "เส้นใย C"

#### 2.3.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500 ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน (accelerating voltage) คือ 5 กิโลโวลต์ โดยทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองผสมพาลาเดียมก่อนทำการ วิเคราะห์

นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ความกว้างของเส้นใย) วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ และหาค่าเฉลี่ย โดยใช้เส้นใยจำนวน 20 เส้น เป็นอย่างน้อย ทั้งนี้จะทำการวัดเส้นใยแต่ละเส้นจำนวน 3 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นใยแต่ละเส้น ซึ่งในการวัดขนาดเส้นใยนี้เป็นวิธีการเดียวกับการวัดเส้นใยปอ กระเจาที่ศึกษาโดย Romhány และคณะ (2003) สมมติให้ภาคตัดขวางของเส้นใยมีลักษณะเป็นวงกลม ส่วนความยาวของเส้นใย วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ และหาค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกัน สำหรับอัตราส่วนความ ยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (aspect ratio) คำนวณจากค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยหารด้วย ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

#### 2.3.2 การศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส

ศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลสโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกซัน (X-ray diffraction, XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE โดยสแกนในช่วงของ 20 ระหว่าง 5-6 องศา และใช้ step size 0.020 องศา สำหรับเวลาต่อ step ที่ใช้คือ 0.5 วินาที ค่าความต่างศักย์และกระแสที่ใช้ คือ 40 กิโลโวลต์ และ 40 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

#### 2.3.3 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส

การสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น 209 F3 ซึ่งศึกษาที่อุณหภูมิ 35-700 องศา เซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

#### 2.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารคู่ควบ

สารคู่ควบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (maleic anhydride grafted polypropylene, PP-g-MA หรือ maleated polypropylene, MAPP) 3 ชนิด ได้แก่

- 1. Aldrich PP-g-MA แบบเม็ด ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
  - 1) มีสีเหลือง
  - 2) มีค่าความเป็นกรด (acid value) ประมาณ 40-55 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม
  - 3) มีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เท่ากับร้อยละ 3.5-4.8 โดยน้ำหนัก
- 2. Licocene PP MA 6252 GR แบบเม็ด ผลิตโดยบริษัท Clariant Plastics and Coatings
  - 1) มีสีเหลือง
  - 2) มีค่าความเป็นกรด (acid value) ประมาณ 37-45 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม
  - 3) มีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เท่ากับร้อยละ 3.23-3.93 โดยน้ำหนัก
- 3. SCONA TPPP 8112 FA แบบผง ผลิตโดยบริษัท BYK Additives & Instruments
  - 1) มีสีขาว
  - 2) มีค่าความเป็นกรด (acid value) ประมาณ 16 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม
  - 3) มีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เท่ากับร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก

#### 2.4.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบ

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารคู่ควบ 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet iZ10 โดย ใช้เทคนิค universal attenuated total reflectance (UATR) ซึ่งวิเคราะห์ในช่วง 4000-700 ซม.<sup>-1</sup>

#### 2.4.2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ

การสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ศึกษาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analyser) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 30 – 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

#### 2.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารคู่ควบ

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของสารคู่ควบ 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ศึกษาโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 204F1 Phoenix ซึ่งตัวอย่างถูกให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 – 280 องศา เซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อเป็นการ กำจัดประวัติทางความร้อน (thermal history) หลังจากนั้นตัวอย่างดังกล่าวถูกให้ความเย็นลงมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อที่จะหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) จากนั้นให้ความร้อนอีกครั้งตั้งแต่อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>)

#### 2.5 การเตรียมวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส

วัสดุคอมโพสิตเตรียมจากเส้นใยปอแก้วที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์ ตามด้วยการเตรียมเยื่อสี ขาว ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง หรือ เส้นใย KF-T-M-G (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสจากฝ้าย (เส้น ใย C) โดยใช้พอลิพรอพิลีนเป็นเมทริกซ์ สำหรับอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแสดงในตารางที่ 1 โดยมีการ เปลี่ยนแปลงปริมาณของเส้นใย คือ ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และปริมาณของสารคู่ควบ คือ ร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารคู่ควบที่ใช้ในการศึกษาคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด ได้แก่ Aldrich PP-g-MA (A), Licocene PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ทั้งนี้ สารทั้งหมดที่จะใช้ในการขึ้นรูปถูกนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ ความชื้น

ตัวอย่างทั้งหมดในตารางที่ 1 ผสมโดยใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ผลิตโดย บริษัท แมช กรุ๊ป (1992) จำกัด รุ่น MGLRM-110 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยการกดอัดด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อน ยี่ห้อ NA-Rongchai Engineering รุ่น NALP-20 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 0.6 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 10 วินาที ใน แม่พิมพ์แบบแผ่น ขนาด 62 มิลลิเมตร x 70 มิลลิเมตร และนำไปกดอัดอีกครั้งที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความ ดัน 0.6 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 2 นาที

		อัตราส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
ตัวอย่าง		เส้นใยเซล	สารคู่ควบ (มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน)					
	พยุธ พรอพิลีน (PP)	เส้นใย KF-T-M- G (เส้นใย K)	เส้นใย เซลลูโลส จากฝ้าย (เส้นใย C)	Aldrich PP-g-MA (A)	Licocene PP MA 6252 GR (L)	SCONA TPPP 8112 FA (S)		
PP	100	-	-	-	-	-		
PP/K1	99	1	-	-	-	-		
PP/K1/A0.8	98.2	1	-	0.8	-	-		
PP/K1/L0.8	98.2	1	-	-	0.8	-		
PP/K1/S0.8	98.2	1	-	-	-	0.8		
PP/K1/A1	98	1	-	1	-	-		
PP/K1/L1	98	1	-	-	1	-		
PP/K1/S1	98	1	-	-	-	1		
PP/K5	95	5	-	-	-	-		
PP/K5/A1	94	5	-	1	-	-		
PP/K5/L1	94	5	-	-	1	-		
PP/K5/S1	94	5	-	-	-	1		
PP/C1	99	-	1	-	-	-		
PP/C1/A1	98	-	1	1	-	-		
PP/C1/L1	98	-	1	-	1	-		
PP/C1/S1	98	-	1	-	-	1		
PP/C5	95	-	5	-	-	-		
PP/C5/A1	94	-	5	1	-	-		
PP/C5/L1	94	-	5	-	1	-		
PP/C5/S1	94	-	5	-	-	1		

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน เส้นใยเซลลูโลส และสารคู่ควบ สำหรับการเตรียมวัสดุคอมโพสิต

## 2.6 การศึกษาสมบัติของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส

#### 2.6.1 การศึกษาสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ของวัสดุคอมโพสิต

ตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งตามด้วยการกดอัดด้วยความร้อนนั้น ถูกนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบตัวอย่างชนิดที่ 5 โดยใช้เครื่องตัด water jet cutter จำนวน 6 ชิ้นต่อตัวอย่าง จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบทางกล ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H10 KM ใช้ load cell ขนาด 500 นิวตัน อัตราเร็วใน การดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที gauge length ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่าง grips 25.4 มิลลิเมตร

ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต คือ ความเค้นแรง ดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด (strain at maximum stress) และ มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus)

#### 2.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของวัสดุคอมโพสิต

สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตหลังการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง ศึกษาโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU3500 ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน (accelerating voltage) คือ 15 กิโลโวลต์ ทั้งนี้มีการเคลือบตัวอย่างด้วยทองผสมพาลาเดียมก่อนทำการ วิเคราะห์

#### 2.6.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของวัสดุคอมโพสิต

#### (2.6.3.1) การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต

การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตศึกษาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติทาง ความร้อน (thermogravimetric analyser) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น 209 F3 ที่อุณหภูมิในช่วง 35 – 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

#### (2.6.3.2) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตศึกษาโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น DSC 204F1 Phoenix ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตัวอย่างถูกให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 – 280 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศา เซลเซียสต่อนาที เพื่อเป็นการกำจัดประวัติทางความร้อน (thermal history) หลังจากนั้นตัวอย่างดังกล่าว ถูกให้ความเย็นลงมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อที่จะหาอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนอีกครั้งตั้งแต่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อที่จะหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) จากนั้นให้ความร้อนอีกครั้งตั้งแต่ อุณหภูมิ 30 – 280 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>)

# บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

## 3.1 ลักษณะเฉพาะของเส้นใยเซลลูโลส

#### 3.1.1 ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส

สัณฐานวิทยาของเส้นใยปอแก้วที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์ ตามด้วยการเตรียมเยื่อสีขาว และผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง (KF-T-M-G) หรือเส้นใย K แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการ หักงอของเส้นใย และผิวของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นริ้ว ๆ



**รูปที่ 2** สัณฐานวิทยาของเส้นใยปอแก้วที่ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์ ตามด้วยการเตรียมเยื่อสีขาว และผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง (เส้นใย K) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 3** สัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)

สำหรับสัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสจากฝ้าย (เส้นใย C) แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้น ใยมีการบิดรวมกันเป็นเกลียว และมีเส้นใยขนาดเล็ก ๆ เกาะรวมกันอยู่เป็นเส้นใยขนาดใหญ่

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เซลลูโลสทั้ง 2 ชนิด (เส้นใย K และเส้นใย C) แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย K มีค่า น้อยกว่าเส้นใย C ประมาณร้อยละ 63 แต่ความยาวของเส้นใยทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันไม่มากนัก (ประมาณร้อยละ 2) สำหรับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย K มีค่ามากกว่าเส้นใย C ประมาณร้อยละ 61

		เส้นใยเซลลูโลส		
		เส้นใย K	เส้นใย C	
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	ค่าต่ำสุด	4.5	5.6	
	ค่าสูงสุด	14.6	34.0	
	ค่าเฉลี่ย	8.9 ± 2.1	17.1 ± 5.6	
	ค่าต่ำสุด	31.8	30.7	
ความยาว (ไมโครเมตร)	ค่าสูงสุด	304.2	307.7	
	ค่าเฉลี่ย	101.7 ± 57.6	103.9 ± 60.1	
อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง		11.5	6.1	

**ตารางที่ 2** เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)

#### 3.1.2 ความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส

ความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C) ศึกษาจาก XRD แพทเทิร์นของเส้นใยดังกล่าว (รูปที่ 4) ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าความเป็น ผลึกของเส้นใย K และเส้นใย C มีค่าร้อยละ 65.9 และ 37.0 ตามลำดับ โดยค่าความเป็นผลึกของเส้นใย K มีค่าสูงกว่าเส้นใย C ประมาณร้อยละ 56

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของเส้นใย K กับค่าความเป็นผลึกของเส้นใยปอแก้วที่ศึกษาโดย Bonatti และคณะ (2004) และ Jonoobi และคณะ (2009) พบว่า ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยที่ศึกษาโดย Bonatti และคณะ (2004) และ Jonoobi และคณะ (2009) มีค่าร้อยละ 42 และ 48 ตามลำดับ และมีค่า ต่ำกว่าค่าความเป็นผลึกที่ได้ในงานวิจัยนี้ (ประมาณร้อยละ 31-44)





#### 3.1.3 การสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส

การสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส K และ C ศึกษาจาก TGA และ DTG เทอร์โมแกรม ดังรูปที่ 5 ส่วนอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Onset</sub>) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T<sub>Max</sub>) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Endset</sub>) ของเส้นใยแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 5 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (เส้นใย
 K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)

อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด และอุณหภูมิ สิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใย K มีค่าสูงกว่าเส้นใย C ประมาณร้อยละ 18-19 ซึ่งคาดว่าน่าจะ เป็นผลมาจากกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการแยกเส้นใยเซลลูโลส ทั้งนี้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน สูงสุดของเซลลูโลสอยู่ในช่วงประมาณ 320-380 องศาเซลเซียส (Keshk & Haiji, 2011) **ตารางที่ 3** อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Onset</sub>) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T<sub>Max</sub>) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Endset</sub>) ของ เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จาก ปอแก้ว (เส้นใย K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (เส้นใย C)

เส้นใยเซลลูโลส	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ( <sup>°</sup> C)					
	T <sub>Onset</sub>	T <sub>Max</sub>	T <sub>Endset</sub>			
เส้นใย K	337.2	362.9	377.3			
เส้นใย C	278.7	302.0	312.8			

# 3.2 ลักษณะเฉพาะของสารคู่ควบ

#### 3.2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบ

อินฟาเรดสเปกตรัมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งใช้ใน การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิดที่กล่าวข้างต้น โดยพีคหลักที่ปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกันคือที่ 2,949 ซม.<sup>-1</sup>, 2,917 ซม.<sup>-1</sup>, 2,867 ซม.<sup>-1</sup> และ 2,838 ซม.<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึง C-H stretching vibrations ใน CH, CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> groups ส่วนการ ปรากฏพีคที่ 1,455 ซม.<sup>-1</sup> และ 1,375 ซม.<sup>-1</sup> แสดงถึง CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> deformations (Güldoğan และ คณะ 2004) นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ 1,166 ซม.<sup>-1</sup> แสดงถึง -CH<sub>3</sub> vibrations ของสายโซ่พอลิพรอพิลีน (Bettini และ Agnelli, 2000, Sclavons และคณะ 1996, Sclavons และคณะ 2000) สำหรับพีคที่ 997 ซม.<sup>-1</sup> และ 972 ซม.<sup>-1</sup> แสดง CH-CH<sub>3</sub> group conformation (Güldoğan และคณะ 2004)

อย่างไรก็ตามอินฟาเรดสเปกตรัมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีนแตกต่างกัน โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน ปรากฏพีคที่ 1,855 ซม.<sup>-1</sup> และ 1,775 ซม.<sup>-1</sup> แสดงถึง asymmetric C=O stretching vibrations และ symmetric C=O stretching vibrations ของ cyclic anhydrides ตามลำดับ อีกทั้งยังปรากฏพีคที่ 1,711 cm<sup>-1</sup> แสดงถึง C=O stretching vibrations ของกรด (Bettini และ Agnelli, 2000, Qiu และคณะ 2005, Sclavons และคณะ 1996, Sclavons และคณะ 2000) แต่ไม่ปรากฏพีคเหล่านี้ในอินฟาเรด สเปกตรัมของพอลิพรอพิลีน ทั้งนี้ตำแหน่งของพีคที่ปรากฏในอินฟาเรดสเปกตรัมของสารคู่ควบ 3 ชนิด พบว่าอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

สำหรับโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนทั้ง 3 ชนิด มี โครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน เนื่องจากตำแหน่งของพีคที่ปรากฏในอินฟาเรดสเปกตรัมของสารคู่ควบ 3 ชนิดอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน แสดงดังรูปที่ 7



**รูปที่ 6** อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)



รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน

#### 3.2.2 การสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ

การสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิ ลีน (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ศึกษาจาก TGA และ DTG เทอร์โมแกรมแสดงในภาคผนวก ก โดยพบว่ามีการสลายตัวทางความร้อน 1 ช่วง ซึ่งสารคู่ควบมี ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์น้อยมาก จึงไม่เห็นช่วงการสลายตัวทางความร้อนของมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์อย่างชัดเจน สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิก แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 4

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิก แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศ ในโตรเจน มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที ซึ่งแนวโน้มของอุณหภูมิการสลายตัวดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกัน **ตารางที่ 4** อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ( <sup>°</sup> C)						
ตัวอย่าง	อัตราการให้ความร้อน 10 <sup>°</sup> C/นาที			อัตราการให้ความร้อน 20 <sup>°</sup> C/นาที			
	T <sub>Onset</sub>	T <sub>Max</sub>	T <sub>Endset</sub>	T <sub>Onset</sub>	T <sub>Max</sub>	T <sub>Endset</sub>	
PP	437.8	458.4	471.6	443.3	469.7	483.8	
Aldrich PP-g-MA	417.7	456.3	473.0	426.6	469.6	487.0	
Licocene PP MA 6252 GR	411.9	457.5	472.7	418.9	470.3	486.9	
SCONA TPPP 8112 FA	437.9	465.4	477.5	451.4	477.8	491.5	

อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Onset</sub>) ของพอลิพรอพิลีนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่ม การสลายตัวทางความร้อนของ SCONA TPPP 8112 FA (ประมาณ 438 องศาเซลเซียส) แต่สูงกว่าของ Aldrich PP-g-MA และ Licocene PP MA 6252 GR (ประมาณ 418 และ 412 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) โดย อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อนของ Licocene PP MA 6252 GR มีค่าต่ำที่สุด ที่อัตราการให้ ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่วนที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิเริ่ม การสลายตัวทางความร้อนของ Licocene PP MA 6252 GR ยังคงมีค่าต่ำที่สุด และต่ำว่าของ Aldrich PPg-MA (ประมาณ 427 องศาเซลเซียส) ไม่มากนัก ซึ่งอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อนของสารคู่ควบ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าของพอลิพรอพิลีน (ประมาณ 443 องศา เซลเซียส) ทั้งนี้ SCONA TPPP 8112 FA มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด (ประมาณ 451 องศาเซลเซียส)

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T<sub>Max</sub>) ของพอลิพรอพิลีนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการ สลายตัวทางความร้อนสูงสุดของ Licocene PP MA 6252 GR และ Aldrich PP-g-MA โดยอยู่ในช่วง ประมาณ 456-458 องศาเซลเซียส และประมาณ 470 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าของ SCONA TPPP 8112 FA เล็กน้อย ทั้งนี้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของ SCONA TPPP 8112 FA มีค่าประมาณ 468 และ 478 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ใช้ใน งานวิจัยนี้สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ ศึกษาโดย Güldoğan และคณะ (2004) ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Güldoğan และคณะ (2004) คือประมาณ 395-405 องศา เซลเซียส อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Endset</sub>) ของพอลิพรอพิลีน ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที คือประมาณ 472 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่แตกต่างจากอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทาง ความร้อนของ Aldrich PP-g-MA และ Licocene PP MA 6252 GR (ประมาณ 473 องศาเซลเซียส) โดย อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าของ SCONA TPPP 8112 FA (ประมาณ 476 องศาเซลเซียส) สำหรับอุณหภูมิ สิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ของ SCONA TPPP 8112 FA มีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 492 องศาเซลเซียส) ซึ่งอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนของ Aldrich PP-g-MA และ Licocene PP MA 6252 GR มีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 487 องศาเซลเซียส) แต่ สูงกว่าของพอลิพรอพิลีน (ประมาณ 484 องศาเซลเซียส) เล็กน้อย

#### 3.2.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารคู่ควบ

DSC เทอร์โมแกรมเมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (แสดงพีคการเกิดผลึก) และเมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2 (แสดงพีคการหลอมผลึก) ของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) แสดงดังรูปที่ 8 - รูปที่ 9 ตามลำดับ ทั้งนี้อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature,  $T_c$ ) ได้จากพีคในรูปที่ 8 และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก ( $\Delta$ H<sub>c</sub>) ได้จากพื้นที่ใต้พีคในรูปที่ 8 ดัง แสดงในตารางที่ 5 ส่วนอุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature,  $T_m$ ) ได้จากพืคในรูปที่ 9 และ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H<sub>m</sub>) ได้จากพื้นที่ใต้พีคในรูปที่ 9 ดังแสดงในตารางที่ 5



ร**ูปที่ 8** DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) ของ พอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)



- **รูปที่ 9** DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิพรอพิลีนและสาร คู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)
- ตารางที่ 5 อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ เกิดผลึก ( $\Delta$ H<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>) และการเปลี่ยนแปลง เอนทัลปีในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H<sub>m</sub>) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA)

ตัวอย่าง	T <sub>c</sub> (°C)	$\Delta$ H <sub>c</sub> (J/g)	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta$ H <sub>m</sub> (J/g)
PP	110.5	102.3	165.2	103.4
Aldrich PP-g-MA	106.1	85.49	156.1	87.77
Licocene PP MA 6252 GR	90.9	54.54	126.2	61.31
SCONA TPPP 8112 FA	111.8	96.16	157.8	105.7

อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าใกล้เคียงกับของ SCONA TPPP 8112 FA ซึ่งอยู่ ในช่วงประมาณ 111-112 องศาเซลเซียส แต่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของ Aldrich PP-g-MA ไม่มากนัก โดยอุณหภูมิการเกิดผลึกของ Aldrich PP-g-MA มีค่าประมาณ 106 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิการเกิด ผลึกของ Licocene PP MA 6252 GR (ประมาณ 91 องศาเซลเซียส) มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารคู่ ควบอีก 2 ชนิด นอกจากนี้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกับ อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Seo และคณะ (2000) ซึ่งคือ 108 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิการเกิดผลึกของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าน้อย กว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Seo และคณะ (2000) และ Güldoğan และคณะ (2004) ซึ่งคือประมาณ 117 องศาเซลเซียส และ 122 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าสูงกว่าของสารคู่ควบมาเลอิก แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของ SCONA TPPP 8112 FA มากที่สุด รองลงมาคือ Aldrich PP-g-MA ส่วน Licocene PP MA 6252 GR มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ เกิดผลึกต่ำที่สุด

สำหรับอุณหภูมิการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าสูงกว่าของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด โดยมีค่าสูงกว่าของ Aldrich PP-g-MA และ SCONA TPPP 8112 FA เล็กน้อย ส่วน Licocene PP MA 6252 GR มีอุณหภูมิการหลอมผลึกต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารคู่ ควบอีก 2 ชนิด ทั้งนี้อุณหภูมิการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการ หลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) ซึ่งมีค่าประมาณ 151 องศาเซลเซียส สำหรับสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอุณหภูมิการหลอมผลึกต่ำ กว่าของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Güldoğan และคณะ (2004) ซึ่งอุณหภูมิ การหลอมผลึกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Güldoğan และคณะ (2004) อยู่ ในช่วงประมาณ 162-166 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน ที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) พบว่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิ ลีนที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) ซึ่งมีค่าประมาณ 146 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิดังกล่าว ของ Licocene PP MA 6252 GR แต่ต่ำกว่าของ Aldrich PP-g-MA และ SCONA TPPP 8112 FA

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าต่ำกว่าของ SCONA TPPP 8112 FA ไม่มากนัก แต่มีค่าสูงกว่าของ Aldrich PP-g-MA และ Licocene PP MA 6252 GR ซึ่ง Licocene PP MA 6252 GR มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกต่ำที่สุด ทั้งนี้แนวโน้มของการ เปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในงานวิจัย นี้กับที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีน ที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) มีค่าต่ำกว่ามาก โดยมีค่าประมาณ 59 จูล/กรัม ส่วนการเปลี่ยนแปลง เอนทัลปีในการหลอมผลึกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Ye และคณะ (2011) มีค่าประมาณ 63 จูล/กรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ Aldrich PP-g-MA และ SCONA TPPP 8112 FA แต่มีค่าสูง กว่าของ Licocene PP MA 6252 GR

## 3.3 สมบัติของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส

#### 3.3.1 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ของวัสดุคอมโพสิต

ความเค้นแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ความเครียดที่ความเค้นแรงดึงสูงสุด (strain at maximum stress) และมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอ ลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส (เส้นใย K และเส้นใย C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดย น้ำหนัก และมีการเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ในปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 10 - รูปที่ 12 ตามลำดับ



ร**ูปที่ 10** ความเค้นแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และวัสดุพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีน (MAPP) 3 ชนิด ได้แก่ Aldrich PP-g-MA (A), Licocene PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ในปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก

ความเค้นแรงดึงสูงสุดของพอลิพรอพิลีนมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 1-7 เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิด และจะลดลงมากขึ้นเมื่อเติมเส้นใยดังกล่าวในปริมาณสูงขึ้น อย่างไรก็ตามความเค้นแรงดึงสูงสุดวัสดุ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 106-133 เมื่อมีการเติมสารคู่ควบ ทั้งนี้โดยภาพรวม การเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความเค้น แรงดึงสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 1-3) สำหรับกรณีที่มีการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า การใช้สาร คู่ควบชนิด A และ L มีผลทำให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K สูง กว่าวัสดุดังกล่าวที่เติมเส้นใย C เพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 2-5) แต่การใช้สารคู่ควบชนิด S ไม่ แสดงผลความแตกต่างของค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C อย่างชัดเจน นอกจากนี้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่มีการเติมเส้นใยปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่ง ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมากกว่าวัสดุดังกล่าวที่มีการเติมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 2-3)

ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเค้นแรง ดึงของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Nayak และ Mohanty (2010) (32.0 เมกะปาสคาล) Qiu และคณะ (2005) (31.7 ± 2 เมกะปาสคาล) และ Vilaseca และคณะ (2010) (29.0 ± 0.7 เมกะปาสคาล) แต่มีค่าสูง กว่าค่าความเค้นแรงดึงของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Iwamoto และคณะ (2014) (24.0 ± 0.3 เมกะ ปาสคาล) นอกจากนี้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C และ ใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนในงานวิจัยนี้ มีค่าสูงกว่า (ประมาณ 1 เท่า) เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าความเค้นแรงดึงของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึก สูง (ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (ร้อยละ 2.5-20 โดยน้ำหนัก) ที่ศึกษาโดย Qiu และคณะ (2003)

เมื่อเปรียบค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ศึกษาในงานวิจัยนี้กับค่า ความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ร้อยละ 30 โดย น้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่ ศึกษาโดย Nayak และ Mohanty (2010) พบว่าสารคู่ควบ MAPP ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 แต่สารคู่ควบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีผลต่อการเพิ่มความเค้น แรงดึงสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าร้อยละ 100 ในปริมาณสารคู่ควบที่เท่ากัน

นอกจากนี้มีการศึกษาค่าความเค้นแรงดึงของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านยานยนต์ สำหรับทำชิ้นส่วนภายใน ที่ศึกษาโดย AL-Oqla และคณะ (2016) พบว่า การเติมเส้นใยปอแก้ว ปอกระเจา ลินิน อินทผาลัม ใยมะพร้าว และป่านศรนารายณ์ ประมาณร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตดังกล่าวมีค่า อยู่ในช่วงประมาณ 10-57 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตดังกล่าวมีค่า สิตที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ที่เติมเส้นใย K และ C เพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนเพียงร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ดังนั้นวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนในงานวิจัยนี้ มีแนวโน้มที่สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในงานเป็นชิ้นส่วนภายในยานยนต์ได้

การเติมเส้นใยเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิด (เส้นใย K และเส้นใย C) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดย น้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของพอลิพรอพิลีนลดลงประมาณร้อยละ 7-21 ซึ่งการ เติมสารคู่ควบในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต มีแนวโน้มทำให้ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอม โพสิตลดลงประมาณร้อยละ 0.4-14 ทั้งนี้การเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีผลในการลด ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตมากกว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 โดย น้ำหนัก (ประมาณร้อยละ 1-9) ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารคู่ควบและมีเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณร้อย ละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดต่ำกว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารคู่ควบและมีเส้นใย เซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (ประมาณร้อยละ 1-7) ทั้งนี้การใช้สารคู่ควบชนิด A มีแนวโน้ม ทำให้ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตลดลงมากกว่าการใช้สารคู่ควบชนิด L และ S เพียง เล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณร้อยละ 1-9) แต่การใช้สารคู่ควบชนิด L มีแนวโน้มทำให้ค่าความเครียดที่ความ เค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตน้อยกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดอื่นอีก 2 ชนิด





มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของพอลิพรอพิลีนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 1-10) เมื่อเติม เส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเมื่อวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีการเติมสารคู่ควบพบว่ามีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น สูงขึ้นประมาณร้อยละ 87-143 ทั้งนี้การเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 ทำให้ค่ามอดุลัสของสภาพ ยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นกว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 (ประมาณร้อยละ 7-12) ทั้งนี้ในภาพรวม การเติมสารคู่ควบชนิด A มีแนวโน้มที่จะเพิ่มค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพ สิตได้ประมาณร้อยละ 111-139 ซึ่งมากกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดอื่น ทั้งนี้คาดว่าอาจเป็นผลมาจากสารคู่
ควบชนิด A มีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มากกว่าสารคู่ควบชนิด L และ S ทำให้อัตรกิริยา (interaction) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน กับหมู่ไฮดรอกซิลของ เส้นใยเซลลูโลสมากกว่าการใช้สารคู่ควบอื่นอีก 2 ชนิด นอกจากนี้ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุคอม โพสิตที่เติมสารคู่ควบและเติมเส้นใย K มีแนวโน้มสูงกว่าของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบและเติมเส้นใย C (ประมาณร้อยละ 7-23)





ร**ูปที่ 12** มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ของพอลิพรอพิลีน (PP) และวัสดุพอลิพรอพิลีน คอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้ว (K) และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย (C) ใน ปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) 3 ชนิด ได้แก่ Aldrich PP-g-MA (A), Licocene PP MA 6252 GR (L) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ในปริมาณร้อยละ 0, 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก

โดยภาพรวมแล้ว จากการศึกษาพบว่าการใช้สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน ในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต สามารถช่วยเพิ่มสมบัติความทนแรงดึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค้นแรงดึง สูงสุด และมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น ได้เป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลจากอัตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส โดยเป็นการปรับปรุงการ ยึดติดระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้ดีขึ้น (Kaewkuk et al., 2013)

## 3.3.2 สัณฐานวิทยา (morphology) ของวัสดุคอมโพสิต

สัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีน (PP) แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าไม่ปรากฏฟองอากาศขนาดใหญ่ใน ชิ้นงาน สำหรับสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) แสดงดังรูปที่ 14 โดยสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวที่ดีของเส้น ใย K ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่พบการหลุดออกของเส้นใย และมีช่องว่างปรากฏระหว่างเส้นใย K และพอลิ พรอพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Kaewkuk et al., 2013; Miyazaki et al., 2009; Qiu et al., 2003) เนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ของเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมี ความมีขั้วและพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีความมีขั้ว



ร**ูปที่ 13** สัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 14** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)

เมื่อวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตดังกล่าวมีการเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อย ละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก และสัณฐานวิทยาของวัสดุดังกล่าว (PP/K1/A0.8, PP/K1/L0.8, PP/K1/S0.8, PP/K1/A1, PP/K1/L1 และ PP/K1/S1) แสดงในรูปที่ 15 – รูปที่ 20 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตเห็น การยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใย K และพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารคู่ควบ ทั้งนี้ผลที่สังเกตได้ เป็นเช่นเดียวกับผลจากการศึกษาโดย Qiu และคณะ (2003) และ Qiu และคณะ (2006)

ส่วนสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) แสดงดังรูปที่ 21 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของเส้นใยใน ปริมาณที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PP/K1 ทั้งนี้ยังพบการหลุดออกของเส้นใย และช่องว่างระหว่างเส้นใย เซลลูโลสและพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงการยึดติดระหว่างเส้นใย K และพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1) แสดงดังรูปที่ 22 – รูปที่ 24 ตามลำดับ ปรากฏการหลุดออกของ เส้นใย K บางส่วน ในขณะที่เส้นใยจำนวนหนึ่งมีการยึดติดที่ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์



**รูปที่ 15** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดย น้ำหนัก (PP/K1/A0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 16** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/L0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 17** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/S0.8) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



ร**ูปที่ 18** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA ในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก (PP/K1/A1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)

สำหรับสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) แสดงดังรูปที่ 25 โดยพบช่องว่างระหว่างเส้นใย C และพอลิพรอพิลีนเม ทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงการยึดติดระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี เนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ ในกรณีของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1 และ PP/C1/S1) มีสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 26 – รูปที่ 28 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใย C และพอลิเมอร์ เมทริกซ์ลดลง โดยเป็นการแสดงถึงการยึดติดที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของ PP/C1



**รูปที่ 19** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/L1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 20** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก (PP/K1/S1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 21** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 22** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA ในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก (PP/K5/A1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 23** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K5/L1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 24** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก (PP/K5/S1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 25** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 26** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 27** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/L1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 28** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/S1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 29** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 30** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/A1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



**รูปที่ 31** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/L1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)



ร**ูปที่ 32** สัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/S1) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (ซ้าย) และ 1,000 เท่า (ขวา)

ส่วนสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อย ละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) แสดงดังรูปที่ 29 ซึ่งพบการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใย C กับพอลิพรอพิลีนพอลิ แมอร์ โดยสังเกตจากช่องว่างระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ สำหรับสัณฐานวิทยาของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพ สิตที่ใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1) แสดงดังรูปที่ 30 – รูปที่ 32 ตามลำดับ ซึ่งพบร่องรอยการหลุดออกของเส้นใยบางส่วน ในขณะที่เส้นใยอีกส่วนหนึ่งมีการยึดติดกับพอลิ พรอพิลีนเมทริกซ์ดี

#### 3.3.3 การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต

TGA เทอร์โมแกรม และ DTG เทอร์โมแกรม (ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วใน ปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K1 และ PP/K5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ใน ปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/L0.8, PP/K1/S0.8, PP/K1/A1, PP/K1/L1, PP/K1/S1, PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1) แสดงในภาคผนวก ข

สำหรับ TGA เทอร์โมแกรม และ DTG เทอร์โมแกรม (ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศา เซลเซียสต่อนาที) ของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C1 และ PP/C5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จาก ฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดย น้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1, PP/C1/S1, PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1) แสดงในภาคผนวก ข

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (ที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อ นาที) ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตทั้งที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Onset</sub>) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T<sub>Max</sub>) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Endset</sub>)

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที มีค่าสูงกว่าที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ไม่มากนัก สำหรับการเติมเส้นใย เซลลูโลสในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงการสลายตัวทางความร้อน เพียงขั้นเดียว เนื่องจากเส้นใยที่เติมมีปริมาณน้อยมาก จึงแสดงผลการสลายตัวทางความร้อนของพอลิ พรอพิลีนอย่างเด่นชัด แต่การเติมเส้นใยดังกล่าวในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักนั้น พบการสลายตัวทาง ความร้อน 2 ขั้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากปริมาณของเส้นใย โดยการสลายตัวทางความร้อนในขั้นแรกมีความ สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 3.1.3 ที่ศึกษาสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของแล้นใยเซลลูโลสที่ ใช้ ส่วนการสลายตัวทางความร้อนในขั้นที่ 2 เป็นผลจากการเติมเส้นใยนั้น ยังพบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลส ากไข้ เน้นใย K) ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน ทั้งนี้ ในการสลายตัวทางความร้อนที่ขั้นที่ 1 ที่เป็นผลจากการเติมเส้นใยนั้น ยังพบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลส จากฝ้าย (เส้นใย C) โดยผลดังกล่าวนี้เกิดเนื่องมาจากอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยดังกล่าว ที่แสดงผลในหัวข้อ 3.1.3 ที่กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้การเติมสารคู่ความทั้ง 3 ชนิด (ปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก) ในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต พบว่าไม่มีผลกระทบอย่างเด่นขัดต่ออุณหภูมิการ สลายตัวทางความร้อนจังกล่าว ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการยึดติดที่ดีระหว่างเล้นใยเซลลูโลสและพอลิ พรอพิลีนเมทริกซ์ (Kaewkuk et al., 2013) ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวเป็นแนวโน้มเดียวกับการศึกษาวัสดุพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วร้อยละ 30 โดยปริมาตร และเติมสารคู่ควบร้อยละ 5 โดย ปริมาตร ที่ศึกษาโดย Lee และคณะ (2013)

	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (°C)											
ตัวอย่าง	อัตราการให้ความร้อน 10 <sup>°</sup> C/นาที						อัตราการให้ความร้อน 20 <sup>°</sup> C/นาที					
	Peak 1			Peak 2			Peak 1			Peak 2		
	T <sub>Onset</sub>	$T_{Max}$	T <sub>Endset</sub>	T <sub>Onset</sub>	$T_{Max}$	T <sub>Endset</sub>	T <sub>Onset</sub>	T <sub>Max</sub>	T <sub>Endset</sub>	T <sub>Onset</sub>	T <sub>Max</sub>	T <sub>Endset</sub>
PP	-	-	-	440.9	463.0	474.8	-	-	-	446.7	473.0	485.3
PP/K1	-	-	-	436.6	461.1	474.0	-	-	-	450.5	474.4	487.4
PP/K1/A0.8	-	-	-	434.5	460.5	472.4	-	-	-	447.7	472.5	485.2
PP/K1/L0.8	-	-	-	433.1	459.2	472.7	-	-	-	441.5	470.3	483.5
PP/K1/S0.8	-	-	-	429.0	459.0	471.6	-	-	-	448.1	472.9	485.5
PP/K1/A1	-	-	-	442.6	462.4	473.7	-	-	-	448.0	474.3	486.6
PP/K1/L1	-	-	-	438.3	462.7	474.2	-	-	-	447.3	474.1	486.2
PP/K1/S1	-	-	-	442.1	462.1	473.6	-	-	-	450.5	473.4	486.5
PP/K5	343.6	362.1	374.4	444.0	463.4	475.6	359.1	377.1	390.2	453.3	474.5	486.9
PP/K5/A1	342.8	365.6	371.1	444.9	463.8	475.2	354.1	377.5	386.6	454.4	476.6	489.0
PP/K5/L1	344.6	365.6	372.8	442.3	462.8	475.0	353.9	378.1	388.9	452.1	475.9	488.0
PP/K5/S1	340.9	365.5	379.4	439.7	462.7	474.4	353.6	376.8	387.7	451.5	474.8	487.9
PP/C1	-	-	-	441.7	463.1	475.2	-	-	-	449.5	473.9	486.6
PP/C1/A1	-	-	-	441.5	462.1	473.4	-	-	-	450.9	473.6	486.3
PP/C1/L1	-	-	-	440.0	462.2	473.2	-	-	-	449.7	471.4	485.3
PP/C1/S1	-	-	-	441.6	461.7	473.4	-	-	-	450.7	473.8	486.4
PP/C5	286.6	302.1	312.0	443.8	463.5	475.4	299.8	313.3	323.9	450.7	474.3	486.4
PP/C5/A1	289.1	304.2	311.8	436.9	463.1	474.2	297.8	313.9	328.4	451.4	475.2	487.2
PP/C5/L1	289.2	301.9	309.8	437.8	463.0	474.1	301.6	314.8	326.4	450.6	475.1	487.4
PP/C5/S1	287.6	302.3	313.7	440.6	463.0	474.2	298.3	313.7	325.8	451.9	474.6	487.0

ตารางที่ 6 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อ นาที ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตทั้งที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ

### 3.3.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต

ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิด ผลึก ( $\Delta$ H<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ หลอมผลึก ( $\Delta$ H<sub>m</sub>) ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตทั้งที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ แสดง ดังตารางที่ 7 **ตารางที่ 7** อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallisation temperature, T<sub>c</sub>) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ เกิดผลึก ( $\Delta$ H<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature, T<sub>m</sub>) และการเปลี่ยนแปลง เอนทัลปีในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H<sub>m</sub>) ของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตทั้งที่ เติมและไม่เติมสารคู่ควบ

ตัวอย่าง	Т <sub>с</sub> ( <sup>°</sup> С)	$\Delta$ H <sub>c</sub> (J/g)	T <sub>m</sub> (°C)	$\Delta$ H <sub>m</sub> (J/g)
PP	110.5	102.3	165.2	103.4
PP/K1	114.5	120.5	162.5	114.8
PP/K1/A0.8	113.0	104.6	160.5	109.4
PP/K1/L0.8	111.8	104.5	162.6	101.2
PP/K1/S0.8	116.2	100.3	162.0	110.0
PP/K1/A1	112.1	96.0	163.8	103.2
PP/K1/L1	111.3	99.2	165.5	102.3
PP/K1/S1	114.6	99.4	163.1	103.5
PP/K5	119.4	124.9	163.4	111.8
PP/K5/A1	114.9	89.9	163.0	98.63
PP/K5/L1	111.5	91.0	161.7	92.6
PP/K5/S1	118.4	95.6	164.3	103.2
PP/C1	113.3	112.0	163.1	113.4
PP/C1/A1	111.2	95.3	164.7	98.43
PP/C1/L1	111.8	97.1	162.9	105.9
PP/C1/S1	116.0	99.5	163.4	108.2
PP/C5	114.3	111.4	161.6	110.6
PP/C5/A1	111.1	92.0	165.0	94.9
PP/C5/L1	111.8	92.9	162.6	95.9
PP/C5/S1	114.7	95.4	162.7	98.6

DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K1 และ PP/K5) และวัสดุ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และ สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/A1, PP/K1/L0.8, PP/K1/L1, PP/K1/S0.8, PP/K1/S1, PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1) แสดงดังรูป ที่ 33 - รูปที่ 34



ร**รูปที่ 33** (a) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (b) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิ พรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อย ละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อย ละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/A1, PP/K1/L0.8, PP/K1/L1, PP/K1/S0.8 และ PP/K1/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ 34 (a) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (b) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิ พรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อย ละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อย ละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1 ตามลำดับ)



ร**ูปที่ 35** (a) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (b) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิ พรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1 และ PP/C1/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ 36 (a) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1) และ (b) DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของพอลิ พรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายใน ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1 ตามลำดับ)

สำหรับ DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคการเกิดผลึก (เมื่อลดอุณหภูมิลงหลังจากการให้ความร้อนครั้ง ที่ 1) และพีคการหลอมผลึก (เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2) ของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C1 และ PP/C5) และวัสดุพอลิพรอพิ ลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเล อิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1, PP/C1/S1, PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1) แสดงดังรูปที่ 35 – รูปที่ 36

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่า 110.5 องศา เซลเซียส ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Bahar และคณะ (2012) Panaitescu และคณะ (2007) และ Spoljaric และคณะ (2009) (115 องศาเซลเซียส) เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อุณหภูมิการ เกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 3-8 เมื่อมีการเติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก โดยคาดว่าน่าจะเป็นผลจากเส้นใยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารก่อ ผลึก (nucleating agent) สำหรับการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีน (Miyazaki et al., 2009; Qiu et al., 2003) แต่ผลดังกล่าวยังไม่เด่นชัด เนื่องจากเส้นใยที่เติมมีปริมาณน้อย ส่วนการเติมสารคู่ควบชนิด A และ ชนิด L ส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตลดลงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 1-7 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตลดลงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ เติมสารคู่ควบ แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบชนิด S ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุพอลิ พรอพิลีนคอมโพสิต ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่สารคู่ควบชนิด S มีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใกล้เคียงกับ พอลิพรอพิลีน ในขณะที่สารคู่ควบชนิด A และชนิด L มีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำกว่าพอลิพรอพิลีน เล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 5

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 9-22 เมื่อมีการเติมเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ เกิดผลึกของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่าลดลง ประมาณร้อยละ 11-28 เมื่อมีการเติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก โดยคาดว่าเป็นผลจากค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการ เกิดผลึกของสารคู่ควบที่น้อยกว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึกของพอลิพรอพิลีน ดังแสดงใน ตารางที่ 5

อุณหภูมิการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 165 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูง กว่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนที่ศึกษาโดย Bahar และคณะ (2012) และ Spoljaric และ คณะ (2009) (162 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เพียงเล็กน้อย สำหรับการเติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิการหลอมผลึกของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพ สิตลดลงเพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 1-2) ทั้งนี้การเติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตอย่างเด่นชัด ถึงแม้ว่า สารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิการหลอมผลึกต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนก็ตาม (ตารางที่ 5)

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกของพอลิพรอพิลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7-11 เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก แต่การเติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด (ปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก) ในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลง เอนทัลปีในการหลอมผลึกของวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงประมาณร้อยละ 4-17

นอกจากนี้ผลของการเติมสารคู่ควบที่มีต่ออุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมผลึกของ วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเติมสารคู่ควบร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วร้อยละ 30 โดยปริมาตร ที่ศึกษา โดย Lee และคณะ (2013)

# บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 4.1 สรุปผลการวิจัย

เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากเส้นใยปอแก้ว (เส้นใย K) โดยผ่านกระบวนการอัลคาไลน์ทรีทเม้นท์และ การเตรียมเยื่อสีขาว มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 9 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยเซลลูโลส ทางการค้าที่สกัดจากเส้นใยฝ้าย (เส้นใย C) ประมาณร้อยละ 63 แต่ความยาวของเส้นใยทั้งสองชนิดมีขนาด ใกล้เคียงกัน อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ของเส้นใย K มากกว่าเส้นใย C ประมาณร้อยละ 61 นอกจากนี้เส้นใย K มีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 66 ซึ่งสูงกว่าความเป็นผลึกของ เส้นใย C ประมาณร้อยละ 56 เส้นใย K ยังมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงกว่าเส้นใย C ด้วย ดังนั้น เส้นใย K ที่สกัดได้ สามารถใช้ทดแทนเส้นใย C ซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า ในการใช้เป็นสารตัวเติม ในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตได้

ลักษณะเฉพาะของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีนทั้ง 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างทางเคมี เหมือนกัน สารคู่ควบ Licocene PP MA 6252 GR (L) มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Onset</sub>) ต่ำกว่าสารคู่ควบ Aldrich PP-g-MA (A) และ SCONA TPPP 8112 FA (S) ในขณะที่สารคู่ควบชนิด A มี อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T<sub>Max</sub>) และ อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน (T<sub>Endset</sub>) ของสารคู่ควบชนิด S มีค่าสูงกว่าสารคู่ควบชนิด A และ L ทั้งนี้สารคู่ควบชนิด A และ L มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก (ΔH<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมผลึก (T<sub>m</sub>) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึก (ΔH<sub>m</sub>) ของสารคู่ควบชนิด S มีค่าสูงที่สุด แต่อุณหภูมิการเกิดผลึก การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมผลึก และ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึกของสารคู่ควบชนิด L มีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด

ในงานวิจัยนี้ วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกลิ้งและอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน มีผลทำให้ค่า ความเค้นแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าของพอลิพรอพิลีนเล็กน้อย ทั้งนี้ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเค้นแรง ดึงสูงสุดลดลงมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมสารคู่ควบ 3 ชนิด (A, L และ S) ในปริมาณเพียงร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ประมาณร้อยละ 106-133 ซึ่งการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความเค้นแรง ดึงสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มสูงกว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพียง เล็กน้อย ทั้งนี้โดยภาพรวม การใช้สารคู่ควบชนิด A มีแนวโน้มที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นแรงดึง สูงสุดของวัสดุคอมโพสิตมากที่สุด ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของพอลิพรอพิลีนมีค่าลดลงเมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และลดลงมากขึ้นเมื่อเติมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่ง ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีลดลงมากขึ้น เมื่อเติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด โดยการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพ สิตลดลงมากกว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก และการใช้สารคู่ควบชนิด A มี แนวโน้มทำให้ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตลดลงมากที่สุด แต่การใช้สารคู่ควบชนิด L มีแนวโน้มทำให้ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตลดลงน้อยที่สุด

มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุพอลิพรอพิลีนมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อมีการเติมเส้นใย เซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่ามอดุลัส ของสภาพยืดหยุ่นสูงขึ้นประมาณร้อยละ 87-143 เมื่อมีการเติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ซึ่งการเติมสารคู่ควบ ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าการ เติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และการใช้สารคู่ควบชนิด A มีแนวโน้มที่จะเพิ่มค่ามอดุลัส ของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตมากที่สุด นอกจากนี้การเติมเส้นใย K ในวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสาร คู่ควบ มีแนวโน้มทำให้มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นสูงกว่าการเติมเส้นใย C ในวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารคู่ ควบ

สัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีน (PP) ไม่ปรากฏฟองอากาศขนาดใหญ่ สำหรับสัณฐานวิทยาของ วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก แสดงร่องรอย การหลุดออกของเส้นใย และช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งซื้ถึงการยึดติดที่ ไม่ดีระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ ส่วนสัณฐานวิทยาของวัสดุ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเติมสารคู่ควบ 3 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก แสดงการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่ง แสดงว่าสารคู่ควบดังกล่าวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนี้สัณฐานวิทยาของ วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเติมสารคู่ควบ 3 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงการยึดติดของเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น สังเกตจาก ช่องว่างระหว่างเส้นใยและพอลิพรอพิลีนลดลง แต่ยังปรากฏร่องรอยการหลุดออกของเส้นใยบางส่วน ซึ่ง คาดว่าน่าจะเป็นผลจากปริมาณของสารคู่ควบที่ใช้

วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทั้งที่มีการ เติมและไม่เติมสารคู่ควบ 3 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการสลายตัวทาง ความร้อนใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีน แต่การเพิ่มปริมาณเส้นใยจากร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น โดยขั้นแรกเป็นการ สลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเส้นใย K มีการสลายตัวทางความร้อนช้ากว่าเส้นใย C และ ขั้นที่สองเป็นการสลายตัวทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน ทั้งนี้สารคู่ควบที่ใช้ ไม่มีผลทำให้การสลายตัว ทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นผลจากการยึดติดที่ดีของเส้นใยและ เมทริกซ์

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน พบว่าการเติมเส้นใย K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมี อุณหภูมิการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) และการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ในการเกิดผลึก ( $\Delta$ H<sub>c</sub>) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบ 3 ชนิด พบว่าสารคู่ควบมีผลต่ออุณหภูมิการเกิด ผลึกเพียงเล็กน้อย แต่ลดค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการเกิดผลึกของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้การเติม เส้นใย K และ C และการเติมสารคู่ควบ มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก (T<sub>m</sub>) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการ เติมเส้นใย K และ C เพิ่มการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึก ( $\Delta$ H<sub>m</sub>) ของวัสดุคอมโพสิต แต่การ เติมสารคู่ควบทั้ง 3 ชนิด ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการหลอมผลึก ของวัสดุคอมโพสิต แต่การ สิตมีแนวโน้มลดลง

นอกจากนี้วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส K และ C ในปริมาณร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และเติมสารคู่ควบในปริมาณร้อยละ 0.8 และ 1 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มความเป็นไปได้สำหรับ การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนภายในยานยนต์

# 4.2 ข้อเสนอแนะ

- ▶ ศึกษาการแยกเส้นใยเซลลูโลสด้วยสารเคมีอื่นหรือกระบวนการอื่น
- ▶ ศึกษาการแยกเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น
- ศึกษาวิธีการอื่นหรือใช้สารคู่ควบชนิดอื่น เพื่อเพิ่มการยึดติดที่ดีระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและพอลิ พรอพิลีนเมทริกซ์
- ศึกษากระบวนการอื่นที่ใช้ในการผสมและการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ใช้เส้นใย เซลลูโลสเป็นสารตัวเติม

# เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

AL-Oqla, FM, Sapuan, SM, Ishak, MR & Nuraini, AA 2016, 'A decision-making model for selecting the most appropriate natural fiber – Polypropylene-based composites for automotive applications', *Journal of Composite Materials*, vol.50, no.4, pp. 543-556.

Ashori, A, Harun, J, Raverty, WD & Yusoff, MNM 2006, 'Chemical and morphological characteristics of Malaysian cultivated kenaf (*Hibiscus cannabinus*) fiber', *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol.45, no.1-3, pp. 131-134.

Bahar, E, Ucar, N, Onen, A, Wang, Y, Oksüz, M, Ayaz, O, Ucar, M & Demir, A 2012, 'Thermal and mechanical properties of polypropylene nanocomposite materials reinforced with cellulose nano whiskers', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.125, no.4, pp. 2882-2889.

Bettini, SHP & Agnelli, JAM 2000, 'Evaluation of methods used for analysis maleic anhydride grafted onto polypropylene by reactive processing', *Polymer Testing*, vol.19, pp. 3-15.

Bonatti, P, Ferrari, C, Focher, B, Grippo, C, Torri, G & Cosentino, C 2004, 'Histochemical and supramolecular studies in determining quality of hemp fibres for textile applications', *Euphytica*, vol.140, no.1, pp. 55-64.

Espert, A, Vilaplana, F & Karlsson, S 2004, 'Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in propylene composites and its influence on their mechanical properties', *Composites: Part A*, vol. 35, no. 11, pp. 1267-1276.

Feng, D, Caulfield, DF & Sanadi, AR 2001, 'Effect of compatibilizer on the structureproperty relationships of kenaf-fiber/polypropylene composites', *Polymer Composites*, vol.22, no.4, pp. 506-517. Güldoğan, Y, Eğri, S, Rzaev, ZMO & Pişkin, E 2004, 'Comparison of maleic anhydride grafting onto powder and granular polypropylene in the melt by reactive extrusion', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.92, pp. 3675-3684.

Iwamoto, S, Yamamoto, S, Lee, S-H & Endo, T 2014, 'Mechanical properties of polypropylene composites reinforced by surface-coated microfibrillated cellulose', *Composites: Part A*, vol.59, pp. 26-29.

Jonoobi, M, Harun, J, Shakeri, A, Misra, M & Oksman, K 2009, 'Chemical composition, crystallinity, and thermal degradation of bleached and unbleached kenaf bast (Hibiscus cannabinus) pulp and nanofibers', *BioResources*, vol.4, no.2, pp. 626–639.

Jonoobi, M, Harun, J, Mathew, AP & Oksman, K 2010, 'Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion', *Composites Science and Technology*, vol.70, no.12, pp. 1742-1747.

Jonoobi, M, Mathew, AP, Abdi, MM, Makinejad, MD & Oksman, K 2012, 'A comparison of modified and unmodified cellulose nanofiber reinforced polylactic acids (PLA) prepared by twin screw extrusion', vol.20, no.4, pp. 991-997.

Kabir, MM, Wang, H, Lau, KT & Cardona, F 2012, 'Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview', *Composites Part B: Engineering*, vol.43, no.7, pp. 2883-2892.

Kaewkuk, S, Sutapun, W & Jarukumjorn, K 2013, 'Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites', *Composites: Part B*, vol.45, no.1, pp. 544-549.

Keshk, SMAS & Haija, MA 2011, 'A new method for producing microcrystalline cellulose from Gluconacetobacter xylinus and kenaf', *Carbohydrate Polymers*, vol.84, no.4, pp. 1301-1305.

45

Lee, JM, Mohd Ishak, ZA, Mat Taib, R, Law, TT & Ahmad Thirmizir, MZ 2013, 'Mechanical, thermal and water absorption properties of kenaf fiber-based polypropylene and poly(butylene succinate) composites', *Journal of Polymer and the Environment*, vol.21, no.1, pp. 293-302.

Miyazaki, K, Moriya, K, Okazaki, N, Terano, M & Nakatani, H 2009, 'Cellulose/polypropylene composites: Influence of the molecular weight and concentration of oxidatively degraded and maleated polypropylene compatibilizers on tensile behavior', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.111, no.4, pp. 1835-1841.

Nayak, SK & Mohanty, S 2010, 'Sisal glass fiber reinforced PP hybrid composites: Effect of MAPP on the dynamic mechanical and thermal properties', *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol.29, no.10, pp. 1551-1568.

Panaitescu, DM, Donescu, D, Bercu, C, Vuluga, DM, Iorga, M & Ghiurea, M 2007, 'Polymer composites with cellulose microfibrils', *Polymer Engineering and Science*, vol.47, no.8, pp. 1228-1234.

Qiu, W, Endo, T & Hirotsu, T 2006, 'Structure and properties of composites of highly crystalline cellulose with polypropylene: Effects of polypropylene molecular weight', *European Polymer Journal*, vol.42, no.5, pp. 1059-1068.

Qiu, W, Zhang, F, Endo, T & Hirotsu, T 2003, 'Preparation and characteristics of composites of high-crystalline cellulose with polypropylene: Effects of maleated polypropylene and cellulose content', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.87, no.2, pp. 337-345.

Qiu, W, Zhang, F, Endo, T & Hirotsu, T 2005, 'Effect of maleated polypropylene on the performance of polypropylene/cellulose composite', *Polymer Composites*, vol.26, no.4, pp. 448-453.

Romhány, G, Karger-Kocsis, J, & Czigány, T 2003, 'Tensile fracture and failure behavior of technical flax fibers', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.90, no.13, pp. 3638-3645.

Sanadi, A, Caulfield, D, Jacobson, R & Rowell, R 1995, 'Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: Mechanical properties of kenaf fiber polypropylene composites', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.34, no.5, pp. 1889-1896.

Sclavons, M, Carlier, V, De Roover, B, Franquinet, P, Devaux, J & Legras, R 1996, 'The anhydride content of some commercial PP-g-MA: FTIR and Titration', *Journal of Applied Polymer Science*, vol.62, pp. 1205-1210.

Sclavons, M, Franquinet, P, Carlier, V, Verfaillie, G, Fallais, I, Legras, R, Laurent, M & Thyrion, FC 2000, 'Quantification of the maleic anhydride grafted onto polypropylene by chemical and viscosimetric titrations, and FTIR spectroscopy', *Polymer*, vol.41, pp. 1989-1999.

Seo, Y, Kim, J, Kim, KU & Kim, YC 2000, 'Study of the crystallization behaviors of polypropylene and maleic anhydride grafted polypropylene', *Polymer*, vol.41, pp. 2639-2646.

Song, Y, Wi, SG, Kim, HM & Bae, H-J 2016, 'Cellulose bioethanol production from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) using hydrogen peroxide-acetic acid (HPAC) pretreatment', *Bioresource Technology*, vol.214, pp. 30-36.

Spoljaric, S, Genovese, A & Shanks, RA 2009, 'Polypropylene-microcrysatlline cellulose composites with enhanced compatibility and properties', *Composites: Part A*, vol.40, pp. 791-799.

Takagi, H, Nakagaito, AN & Bistamam, MSA 2013, 'Extraction of cellulose nanofiber from waste papers and application to reinforcement in biodegradable composites', *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, pp. 1-5.

Tan, H, Yang, R, Sun, W & Wang, S 2010, 'Peroxide-acetic pretreatment to remove bagasse lignin prior to enzymatic hydrolysis', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.49, no.4, pp. 1473-1479.

Thomas, S, Paul, SA, Pothan, LA & Deepa, B 2011, 'Natural fibres: Structure, properties and applications', in Kalia, S, Kaith, BS & Kaur, I (eds), *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 3-42.

Thwe, MM & Liao, K 2003, 'Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites', *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 3-4, pp. 375-387.

Vilaseca, F, Valadez-Gonzalez, A, Herrera-Franco, PJ, Pèlach, MA, López, JP & Mutjé, P 2010, 'Biocomposites from abaca strands and polypropylene. Part I: Evaluation of the tensile properties', *Bioresource Technology*, vol.101, pp. 387-395.

Wang, B, Sain, M & Oksman 2007, 'Study of structural morphology of hemp fiber from the micro to the nanoscale', *Applied Composite Materials*, vol.14, pp. 89-103.

Wang, B & Sain, M 2007, 'Isolation of nanofibers from soybean source and their reinforcing capability on synthetic polymers', *Composite Science and Technology*, vol.67, no.11-12, pp. 2521-2527.

Yang, H-S & Gardner, DJ 2011, 'Mechanical properties of cellulose nanofibril-filled polypropylene composites', *Wood and Fiber Science*, vol.43, no.2, pp. 143-152.

Ye, Y, Qian, J & Xu, Y 2011, 'Ultrasonic induced grafting of maleic anhydride onto polypropylene in melt state', *Journal of Polymer Research*, vol.18, pp. 2023-2031.

ภาคผนวก

#### ภาคผนวก ก

# TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์ พอลิพรอพิลีน



**รูปที่ ก-1** TGA เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ที่อัตรา การให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที (R10 และ R20 ตามลำดับ)



**รูปที่ ก-2** DTG เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีนและสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน 3 ชนิด (Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA) ที่อัตรา การให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที (R10 และ R20 ตามลำดับ)

#### ภาคผนวก ข

TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีนและวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้น ใยเซลลูโลส ทั้งเติมและไม่เติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน



ร**ูปที่ ข-1** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/L0.8 และ PP/K1/S0.8 ตามลำดับ)



ร**ูปที่ ข-2** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A0.8, PP/K1/L0.8 และ PP/K1/S0.8 ตามลำดับ)



ร**รูปที่ ข-3** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A1, PP/K1/L1 และ PP/K1/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ ข-4 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K1/A1, PP/K1/L1 และ PP/K1/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ ข-5 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ ข-6 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากปอ แก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/K5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากปอแก้วในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/K5/A1, PP/K5/L1 และ PP/K5/S1 ตามลำดับ)



**รูปที่ ข-7** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส ที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1 และ PP/C1/S1 ตามลำดับ)



รูปที่ ข-8 (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส ที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C1/A1, PP/C1/L1 และ PP/C1/S1 ตามลำดับ)



ร**ูปที่ ข-9** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากฝ้าย ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลส ที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ พรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ใน ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1 ตามลำดับ)



ร**ูปที่ ข-10** (a) TGA เทอร์โมแกรม และ (b) DTG เทอร์โมแกรม (อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที) ของพอลิพรอพิลีน (PP) วัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จาก ฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PP/C5) และวัสดุพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เติมเส้นใย เซลลูโลสที่ได้จากฝ้ายในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิพรอพิลีน Aldrich PP-g-MA, Licocene PP MA 6252 GR และ SCONA TPPP 8112 FA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PP/C5/A1, PP/C5/L1 และ PP/C5/S1 ตามลำดับ)
# ประวัติคณะผู้วิจัย

# หัวหน้าโครงการ

ชื่อ (ภาษาไทย): นิภาพรรณ โสตถิยานนท์
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ): Niphaphun Soatthiyanon
ตำแหน่ง: นักวิจัย
คณะ/สถาบัน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์: 0-2218-4242
โทรสาร: 0-2611-7586
E-mail: Niphaphun.S@chula.ac.th

### ประวัติการศึกษา:

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ พ.ศ.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิทยาศาสตรบัณฑิต	เคมีอุตสาหกรรม	2546
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	2548
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหาร ศาสตร์	บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต	การบริหารการปฏิบัติการ	2550
University of New South Wales	Master of Philosophy	Material Science and Engineering	2553
University of New South Wales	Doctor of Philosophy	Materials Science and Engineering	2557

# สาขาความเชี่ยวชาญพิเศษ:

- Biocomposites

- Processing and characterization of polymer blends and composites
- Natural fibre-reinforced polymer-matrix composites

### ผลงานวิจัยที่พิมพ์เผยแพร่:

### <u>Book Chapter</u>

 Crosky, A., Soatthiyanon, N., Ruys, D., Meatherall, S. & Potter, S. 2014, 'Thermoset matrix natural fibre-reinforced composites' in A. Hodzic & R. Shanks (eds.), *Natural fibre composites: Materials, processes and applications*, Woodhead Publishing Limited, pp. 233-270.

### Conference Proceedings

- Wangpunya, S., Soatthiyanon, N., & Potiyaraj, P. 2017, 'Properties of poly(butylene succinate)/graphene oxide/ microcrystalline cellulose composites' in *Proceedings of the International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)*, June 1-2, 2017, Bangkok, Thailand.
- Ampaiwong, J., **Soatthiyanon, N.**, & Potiyaraj, P. 2017, 'Properties of carboxymethyl cellulose nanocomposite films incorporated with graphene oxide and reduced graphene oxide' in *Proceedings of the International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)*, June 1-2, 2017, Bangkok, Thailand.
- Soatthiyanon, N., Crosky, A. & Heitzmann, M.T. 2015, 'Comparison of experimental and calculated tensile properties of flax fibres' in Fernando, D., Teng, J.-G. & Torero, J.L., *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)*, December 9-11, 2015, Brisbane, QLD, Australia.
- Soatthiyanon, N. & Crosky, A. 2015, 'Elementary kenaf fibre extraction' in Fernando, D., Teng, J.-G. & Torero, J.L., *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)*, December 9-11, 2015, Brisbane, QLD, Australia.
- Legras, A., Truss, R., Rao, S., Bhattacharyya, D., **Soatthiyanon**, N., Crosky, A. & Heitzmann, M. 2014, 'Optimisation of the twin-screw compounding process for short fibre biocomposites' in *Proceedings of Composites Australia and CRC-ACS Conference 2014: Materials for a Lighter and Smarter World,* April 7-9, 2014, Newcastle, NSW, Australia.

- Soatthiyanon, N., Deng, S., Crosky, A., Beehag, A. & Leong, K.H. 2011, 'Mechanical behaviour of kenaf fibre polyolefin matrix composites' in *Proceedings of the Sustainability Symposium*, July 7-8, 2011, Sydney, Australia.
- Soatthiyanon, N., Deng, S., Crosky, A., Beehag, A. & Leong, K.H. 2011, 'Mechanical behaviour of kenaf fibre polyolefin matrix composites' in *Proceedings of the Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM) XIX*, January 14-17, 2011, Auckland, New Zealand.
- Soatthiyanon, N., Deng, S., Falzon, P.J., Crosky, A., Samsudin, M.S.F., Patrick, C. & Leong, K.H. 2010, 'Investigation on the use of kenaf fibre as a substitute for wood composites' in *Proceedings of the Society of Aerospace Material and Process Engineers (SAMPE) ASIA 2010*, January 19-20, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.

### <u>Journal Articles</u>

- Ampaiwong, J., Rattanawaleedirojn, P., Saengkiettiyut, K., Rodthongkum, N., Potiyaraj, P. & Soatthiyanon, N. 2019, 'Reduced graphene oxide/carboxymethyl cellulose nanocomposites: novel conductive films', *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 19, pp. 3544-3550.
- Promphet, N., Rattanawaleedirojn, P., Siralertmukul, K., Soatthiyanon, N., Potiyaraj, P., Thanawattano, C., Hinestroza, J.P. & Rodthongkum, N. 2019, 'Non-invasive textile based colorimetric sensor for the simultaneous detection of sweat pH and lactate', *Talanta*, vol. 192, pp. 424-430.
- Chuayjuljit, S., Soatthiyanon, N. & Potiyaraj, P. 2006, 'Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber', *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 102, pp. 452-459.

ผู้ร่วมวิจัย 1
ชื่อ (ภาษาไทย): สรินทร ลิ่มปนาท
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ): Sarintorn Limpanart
ตำแหน่ง: อาจารย์
คณะ/สถาบัน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์: 0-2218-4240
โทรสาร: 0-2611-7586
E-mail: Sarintorn.c@chula.ac.th

# ประวัติการศึกษา:

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ พ.ศ.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอก (วทด.)	วัสดุศาสตร์	2546
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	โท (วทม.)	เคมีชีวภาพ	2536
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ตรี (กศบ.)	เคมี	2531

สาขาความเชี่ยวชาญพิเศษ: - Polymer/clay nanocomposite

# ผลงานวิจัยที่พิมพ์เผยแพร่:

### Journal Articles

### 2017

1. Qin J.; Yang C.; Cao M. et al. Two-dimensional porous sheet-like carbon-doped ZnO/g-C3N4 nanocomposite with high visible-light photocatalytic performance. Materials Letters 2017, 189, 156-159.

2. Das, Malay K.; Li R.; Qin J. et al. Effect of electrodeposition conditions on structure and mechanical properties of Ni-W/diamond composite coatings. Surface & Coatings Technology 2017, 309, 337-343.

3. Pranee RojsitthisakSrichalai KhunthonKhanittha NoomunSarintorn Limpanart Response surface method to optimize the preparation of carboxymethyl cellulose from corn peel agricultural waste. ScienceAsia 2017, 43(1):8

### 2016

1. Qin J., Zhang X., Umporntheep K., et al. Electrodeposition and Mechanical Properties of Ni-W Matrix Composite Coatings with Embedded Amorphous Boron Particles. International Journal Of Electrochemical Science 2016, 11(11), 9529-9541

2. Zhang X., Qin J., Das, Malay K., et al. Co-electrodeposition of hard Ni-W/diamond nanocomposite coatings.Scientific Reports 2016, 6(22285)

2015

1. Kawee Srikulkit, Sirilak Arunsawad, Sarintorn Limpanart: Effect of surfactant on conductivity of Poly(pyrrole-co-formyl pyrrole) via Emulsion Polymerization. Journal of Metals, Materials and Minerals. 01/2015; 24(2):29-34.

2. Jiaqian Qin, Xinyu Zhang, Yannan Xue, Malay Kumar Das, Adisak Thueploy, Sarintorn Limpanart, Yuttanant Boonyongmaneerat, Mingzhen Ma, Riping Liu, The high concentration and uniform distribution of diamond particles in Ni-diamond composite coatings by sediment co-deposition, Surface and Interface Analysis 47 (2015) 331-339.

### 2014

1. Jiaqian Qin<sup>\*</sup>, X. Zhang, Y. Xue, N. Kittiwattanothai, P. Kongsittikul, N. Rodthongkum, S. Limpanart, M. Ma, R. Liu, A facile synthesis of nanorods of ZnO/ Graphene oxide composites with enhanced photocatalytic activity, Applied Surface Science 321 (2014) 226-232.

### 2012

1. Pranee Lertsutthiwong, Khanittha Noomun, Srichalai Khunthon, Sarintorn Limpanart: Influence of chitosan characteristics on the properties of biopolymeric chitosan-montmorillonite. Progress in Natural Science 10/2012; 22(5):502-508.

2. Somwangthanaroj, Photyotin, Limpanart, Tanthapanichakoon: Effect of Type of Surfactants and Organoclay Loading on the Mechanical Properties of EVOH/Clay Nanocomposite Blown Films. Polymer-Plastics Technology and Engineering 07/2012; 51(11):1173-1180.

# ผู้ร่วมวิจัย 2 ชื่อ (ภาษาไทย): นายศรีไฉล ขุนทน ชื่อ (ภาษาอังกฤษ): Mr. Srichalai Khunthon ตำแหน่ง: นักวิทยาศาสตร์ ชำนาญการพิเศษ คณะ/สถาบัน: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทรศัพท์: 02-218-4246 โทรสาร: 0-2611-7586 E-mail: Srichalai@gmail.com

# ประวัติการศึกษา:

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ พ.ศ.
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	วิทยาศาสตรบัณฑิต	พืชศาสตร์	2539
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	ปฐพี	2546

สาขาความเชี่ยวชาญพิเศษ: -วิทยาศาสตร์ทางดิน (Soil Science)

# ผลงานวิจัยที่พิมพ์เผยแพร่:

# <u>Book Chapters</u>

 1. ศรีไฉล ขุนทน. 2543. เครื่องรีด. ใน เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการ ทำงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 27-46 น.

 2. ศรีไฉล ขุนทน. 2543. เครื่องอัดความดันทุกทิศทางแบบร้อน. *ใน*เครื่องมือวิจัยทางวัสดุ ศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.87-106 น.

 สรินทร ลิ่มปนาทและศรีไฉล ขุนทน. 2543. เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน. ใน เครื่องมือวิจัย ทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 309-322 น.

# Conference Proceedings

 ศรีไฉล ขุนทน สุพิณ ต่างวิวัฒน์และโสภณ เริงสำราญ. "ประโยชน์ของขี้เถ้าแกลบต่อการ ผลิตซิลิกาเจลดูดความชื้น." *วารสารโลหะ วัสดุ และแร่*. ปีที่ 7 ฉบับที่1 ธันวาคม 2540: หน้า 21-30.

 สรินทร ลิ่มปนาท กฤษณา ศิรเลิศมุกุล ศรีไฉล ขุนทน และ โสภณ เริงสำราญ "การ เตรียมแผ่นกรองซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ"จุลสารจุฬาวิจัย ปีที่ 19 ฉบับที่ 6 มิถุนายน 2543 หน้า 19-21. 3. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ **ศรีไฉล ขุนทน.** "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน*. ณ บ้านโค้งสวรรค์ จังหวัด หนองบัวลำภู. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.19 เมษายน 2545. หน้า 3-15.

4. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ **ศรีไฉล ขุนทน.** "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน.* ณ บ้านคำอ้อ จังหวัดอุดรธานี. ภายใต้ โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะและ วัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 20 เมษายน 2545. หน้า 3-15.

 5. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ ศรีไฉล ขุนทน. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน" ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน. ณ บ้านเชียงเครือ จังหวัดสกลนคร. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
21 เมษายน 2545. หน้า 3-16.

6. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ **ศรีไฉล ขุนทน.** "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน.* ณ บ้านเทอดไทย จังหวัดร้อย. ภายใต้ โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะและ วัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 22 เมษายน 2545. หน้า 3-15.

7. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ ศรีไฉล ขุนทน. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน"ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน. ณ บ้านหม้อ จังหวัดมหาสารคาม. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเชรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 23 เมษายน 2545. หน้า 3-15.

8. ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล และ **ศรีไฉล ขุนทน.** "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การขุดดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสานงานดิน*. ณ บ้านหัวบึง จังหวัดขอนแก่น. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1, สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 24 เมษายน 2545. หน้า 3-15.

9. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การใช้ทรัพยากรแหล่งดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสาน...งานดิน*. ณ บ้านสทิงหม้อ จังหวัดสงขลา. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 2, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ. 25 กุมภาพันธ์ 2546. หน้า 3-17.

10. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การใช้ทรัพยากรแหล่งดิน"*ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสาน...งานดิน*. ณ บ้านมะยิง จังหวัด นครศรีธรรมราช. ภายใต้โครงการ ยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 2, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 27 กุมภาพันธ์ 2546. หน้า 3-17. 11. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การใช้ทรัพยากรแหล่งดิน" *ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สีบสาน...งานดิน.* ณ บ้านม่อนเขาแก้ว จังหวัดลำปาง. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 2, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ. 3 มีนาคม 2546. หน้า 3-17.

 12. ศรีไฉล ขุนทน และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินและการสาธิต การใช้ทรัพยากรแหล่งดิน" ใน การประชุมและเผยแพร่ผลการวิจัย สืบสาน...งานดิน. ณ บ้านเหมืองกุง จังหวัดเชียงใหม่. ภายใต้โครงการยกระดับ คุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่
2, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ. 4 มีนาคม 2546. หน้า 3-17.

13. **ศรีไฉล ขุนทน**. " ธรณีวิทยาบริเวณแหล่งดินจังหวัดอ่างทอง " *ใน การอบรมสัมมนา โครงการวิจัยดินเพื่อการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดินเผา*. ณ โรงแรมซี แอล การ์เดนอินน์ จังหวัดอ่างทอง. ภายใต้โครงการวิจัยดินเพื่อการพัฒนาคุณภาพ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดินเผา. สถาบันวิจัย โลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ. 15 ธันวาคม 2548. หน้า 11-19.

 14. ศรีไฉล ขุนทน. "การแก้ปัญหาคราบเกลือสีขาวบนผิวอิฐด้วยวิธีการใช้ดินล่างผสมดินบน " ใน การอบรมสัมมนาโครงการวิจัยดินเพื่อการพัฒนาคุณภาพ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดินเผา. ณ โรงแรมซี แอล การ์เดนอินน์ จังหวัดอ่างทอง. ภายใต้โครงการวิจัยดินเพื่อการพัฒนาคุณภาพ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ดินเผา. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 15 ธันวาคม 2548. หน้า 54-67.

 15. ศรีไฉล ขุนทน. "การทดสอบปริมาณหินปูนในดินวัตถุดิบ " การเผยแพร่ผลงานวิจัย "โครงการขยายผลการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมดินเผาจังหวัดอ่างทอง. ณ หมู่ที่
2 และ หมู่ที่ 3 ตำบล ตรีณรงค์ อำเภอไซโย จังหวัดอ่างทอง. ภายใต้โครงการขยายผลการวิจัยและถ่ายทอด เทคโนโลยีเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมดินเผาจังหวัดอ่างทอง.สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 25 สิงหาคม 2549. เอกสารประกอบการบรรยาย

16. สิริพรรณ นิลไพรัช และศรีไฉล ขุนทน. "การศึกษาสมบัติดินเหนียววัตถุดิบที่ใช้ผลิตเครื่อง ปั้นดิเผา "การเผยแพร่ผลงานวิจัย "โครงการขยายผลการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อพัฒนา อุตสาหกรรมดินเผาจังหวัดอ่างทอง ณ หมู่ที่ 2 และ หมู่ที่ 3 ตำบล ตรีณรงค์ อำเภอไซโย จังหวัดอ่างทอง. ภายใต้โครงการขยายผลการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมดินเผาจังหวัดอ่างทอง. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 25 สิงหาคม 2549. เอกสารประกอบการ บรรยาย

17. ศรีไฉล ขุนทน, สิริพรรณ นิลไพรัช, ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุลและสุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. "การ สำรวจปริมาณดินเหนียวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในแหล่งหัตถกรรมพื้นบ้านเครื่องปั้นดินเผาภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย." ใน การประชุมแห่งชาติเรื่องการประยุกต์โทรสัมผัสต่อธรณีศาสตร์ และภูมิลักษณ์วัฒนธรรม. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 11 12 มกราคม 2550. หน้า 69-70.

18. สุพิณ แสงสุข, **ศรีไฉล ขุนทน**, สวลี เสนาพิทักษ์, สิริพรรณ นิลไพรัช และณัฏฐิตา ชวน เกริกกุล. " การใช้ฝุ่นหินปูนจากโรงโม่หินสำหรับเครื่องปั้นดินเผาของไทยที่อุณหภูมิการเผาต่ำ." การ ประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. นครศรีธรรมราช. 18-20 ตุลาคม 2550

19. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจแหล่งดินสำรอง" *ใน การประชุม ฝึกอบรมเชิงวิชาการ สืบสานงานดิน...ถิ่นอีสาน.* ณ ห้องประชุม องค์การบริหารส่วนตำบลน้ำคำใหญ่ อำเภอเมืองจังหวัด ยโสธร. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรม เซรามิกปีที่ 1: ภาคอีสาน, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 25 มีนาคม 2551. หน้า 7-21.

20. สิริพรรณ นิลไพรัช **ศรีไฉล ขุนทน** และปริญญา พวงนาค. "การตรวจสอบสมบัติดิน." *ใน การประชุมฝึกอบรมเชิงวิชาการ สืบสานงานดิน...ถิ่นอีสาน*. ณ ห้องประชุมองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำคำ ใหญ่ อำเภอเมืองจังหวัดยโสธร. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับ อุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 1: ภาคอีสาน, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 25 มีนาคม 2551. หน้า 23-49.

21. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณสำรองแหล่งดินวัตถุดิบ" *ใน การประชุมฝึกอบรมเชิงวิชาการ สืบสานงานดิน...ถิ่นล้านนา.* ณ ห้องประชุมศูนย์การเรียนรู้ปรัชญา เศรษฐกิจพอเพียงตำบลแม่สา อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและ ผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 2: ภาคเหนือ, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 26 พฤษภาคม 2552. หน้า 7-21.

22. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณดินเหนียววัตถุดิบ" *ใน การ* สัมมนาเชิงวิชาการสืบสานงานดิน.. ณ ห้องประชุมอุตสาหกรรมจังหวัดอ่างทอง อำเภอเมือง จังหวัด อ่างทอง. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 3: ภาค กลาง, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 3 มิถุนายน 2553. หน้า 8-26.

23. **ศรีไฉล ขุนทน** และธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. "การสำรวจปริมาณดินเหนียวดินวัตถุดิบ" *ใน การ สัมมนาเชิงวิชาการ สืบสานงานดิน*. ศูนย์การเรียนรู้ตำบลปากพูนอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช. ภายใต้โครงการยกระดับคุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกปีที่ 4: ภาคใต้ , สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 23 กรกฎาคม 2554. หน้า 8-21.

24. สุพิณ แสงสุข, **ศรีไฉล ขุนทน**, สิริพรรณ นิลไพรัช และ สวลี เสนาพิทักษ์. " ดินเผานา โน'' การประชุมจุฬาฯวิชาการ *เสาหลักแห่งปัญญา สืบราชมรรคาพัฒนาแผ่นดิน: ตามรอยเศรษฐกิจ พอเพียง (Pillar of Wisdom – Developing the Country in the Footsteps of His Majesty the King: Towards a Self – Sufficiency Economy)*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 14-18 พฤศจิกายน 2555.

### <u>Journal Articles</u>

1. Sangsuk, S., **Khunthon, S.,** and Nilpairach, S. <u>Nano porous pottery using calcined</u> <u>waste sediment from tap water production as an additive</u>. Journal of Waste Management Research.15-Jul-2009. Impact Factor = 0.661

2. Lertsutthiwong, P., **Khunthon, S.,** Siralertmukul, K., Noomun, K. and Chandrkrachang, S. <u>New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes</u> <u>from tissue paper manufacturing and corn peel</u>. *Bioresource Technology*. 2008; 99: 4841-4845. Impact Factor = 3.103

3. Lertsutthiwong, P., **Khunthon, S.,** Siralertmukul, K., Noomun, K. and Chandrkrachang, S. <u>Effect of chitosan on properties of new particleboards from solid waste</u> <u>of tissue paper manufacturing</u>. *Journal of Chitin and Chitosan*. 2006; 11(4): 201-204.

4. S. Limpanart, **S. Khunthon**, P. Taepaiboon, P. Supaphol, T. Srikhirin, W. Udomkichdecha and Y. Boontongkong, <u>Effect of the surfactant coverage on the preparation of polystyrene-clay nanocomposites prepared by melt intercalation</u>, Materials Letters. 2005; 59: 2292-2295.

5. Sangsuk, S., **Khunthon, S.,** and Nilpairach, S. <u>Effect of Limestone Dust on the</u> <u>Properties of Thai Pottery Sintering at Low Temperature</u>. Journal of Metals, Materials and Minerals.2008; 18(1): 1-7.

6. Wangyao, P., Joypradit, S., Tuengsook P., Homkrajai V. and **Khunthon, S.** <u>Effect</u> of <u>HIP</u> Parameters on <u>Microstructural Repair and Rejuvenation Long-Term Serviced</u> <u>Superalloy Turbine Blade,in-738</u>. Journal of Metals, Materials and Minerals.2004; 14(1): 89-94.

7. Rattanawaleedirojn, P., **Khunthon, S.** and Roengsumran, S. Preparation of carboxymethylcellulose from bagasse. <u>The 37<sup>th</sup> Kasetsart University</u> <u>Annual Conference</u>, Feb. 3-5, p. 215. Thailand, 1999.

8. Lertsutthiwong, P., **Khunthon, S.,** Siralertmukul, K., and Chandrkrachang, S. <u>Particleboards produced from solid wastes of tissue paper manufacturing</u>. *Me Tissue Magazine*. Issue 1-Winter 2008, pp. 30-32.

9. J. Hoshino, S. Limpanart, **S. Khunthon,** T. Osotchan, R. Traiphol and T. Srikhirin Adsorption of single-strand alkylammonium salts on bentonite, surface properties of the modified clay and polymer nanocomposites formation by a two-roll mill. Materials Chemistry and Physics, vol. 123, No.2-3, 2010, 706-713. 10. Sangsuk, S., **Khunthon, S.,** and Nilpairach, S. <u>Recycling limestone dust waste</u> <u>for Thai pottery production</u>. International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development. Journal of Advanced Materials Research. October 21-23, Shanghai, China, 2011.

11. Sangsuk, S., **Khunthon, S.,** and Nilpairach, S. <u>Recycling limestone dust waste</u> <u>for Thai pottery production</u>. Progress in Environment Science and Engineering. Journal of Advanced Materials Research. 2012; 356-360: 2051-2054.

12. Lertsutthiwong, P., Noomun, K., **Khunthon, S.,** and Limpanart, S. <u>Influence of chitosan characteristics on the properties of biopolymeric chitosan-montmorillonite</u>. Progress in Natural Science: Materials International . Journal of Chinese Materials Research Society. 2012; 22(5): 502-508.

13. Sangsuk, S., **Khunthon, S.,** and Nilpairach, S. <u>Recycling Lime Mud Waste from</u> <u>Pulp Mill in Thai Pottery.</u> 3W Research Fair 2013@ 3W Expo2013, (Water, Wastewater& Waste Treatment). January 22-24, Bangkok International Trade and Exhibition Center (BITEC), Bangkok, Thailand, 2013.

14. Khunthon, S., Nilpairach, S., and Sangsuk, S. <u>Using Lime Mud Waste from Pulp</u> <u>Mill as an Additive in Brick Clay</u>. International Conference on Traditional and Aavanced Ceramics, (ICTA 2013). September 11-13, Bangkok International Trade and Exhibition Center (BITEC), Bangkok, Thailand, 2013; 78