รหัสโครงการ SUT7- 708-48-24-72

รายงานการวิจัย

ผลของขนาดไฮดรอกซีอะปาไทต์และผลของการใช้สารประสานต่อสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

(Effect of Hydroxyapatite Particle Size and Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties of Polypropylene Composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2548-2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2552

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติปีงบประมาณ 2548-2549 และได้รับการอำนวยความสะดวกด้านการใช้สถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ รวมทั้งอุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ในการทดลองจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดย มีผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวศศิวิมล แสนเมือง นายมูฮำหมัดซัรอีย์ บารู และ นายจักรกริช ฤทธิตา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อภาษาไทย

กระดูกสัตว์ถูกเตรียมให้อยู่ในลักษณะที่เป็นผง นำมาตรวจสอบองค์ประกอบและสมบัติทางกายภาพ สารประกอบหลักที่พบในผงกระดูก คือ ไฮดรอกซีอะปาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ในการศึกษาขั้นต้นตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ผลของขนาดสารตัวเติมที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์ขนาดต่างกัน 5 ขนาด (< 45-150 μm) ถูกเตรียมขึ้นและใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตซึ่งเตรียมขึ้นโดยมีปริมาณสารตัวเติมคงที่ที่ 40 % โดยน้ำหนัก จากการตรวจสอบผลการทดลอง พบว่า พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดต่างกัน มีค่าความแข็งแรงต่อการดึง ค่ามอดุลัสของยังก์และค่ามอดุลัสของแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน แต่พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กจะให้ค่าความเครียด ณ จุดแตกหักที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดใหญ่ และพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากสารตัวเติมขนาดเล็กกว่า < 45 μm ในสภาวะเปียกจะมีค่าความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าคอมโพสิตในสภาวะแห้งที่มีปริมาณสารตัวเติมเท่า ๆ กัน

ในการศึกษาในขั้นถัดไป คือ การศึกษาผลของสารประสานไซเลนต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้เลือกใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm เพื่อเตรียมพอลิ-โพรพิลีนคอมโพสิต โดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณคงที่ที่ 60 % โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงพื้นผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลนช่วยให้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์เกิดการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ช่วยให้เฟสทั้งสองเกิดการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น และมีผลช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ชนิดของสารประสานไซเลนมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตน้อยมาก

ABSTRACT

Cattle bones were prepared in a powder form and were characterized. Main component in the bone powder was hydroxyapatite (HA : $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). Then, the powder was used as a filler for producing polypropylene (PP) composites. Effect of filler size on physical properties of the polymer composites was investigated. For HA/polypropylene (PP) composites containing a 40% (w/w) of HA content, It was found that HA of different particle sizes does not significantly change tensile strength, tensile modulus and flexural modulus of the HA/PP composites. However, composites of smaller HA sizes show slightly higher elongation at break. The composites in the wet state with a particle size less than 45 μm have the highest impact strength in comparison with those in dry state.

Effect of silane coupling agents on physical properties of PP composites was investigated. The results indicated that treating HA surface with a silane coupling agent improved filler distribution in PP matrix and also enhanced adhesion between HA and PP leading to the better mechanical properties of silane treated HA/PP composites as compared with those of the untreated HA/PP composites. Types of silane coupling agents insignificantly affected mechanical properties of the PP composites.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
3. ขอบเขตของการวิจัย	4
4. การทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	4
5. ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิด	6
6. ผลสำเร็จของการวิจัย	7
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัตถุดิบและสารเคมี	8
วิธีการดำเนินการวิจัย	8
บทที่ 3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	
1. การเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์.	11
1.1. สมบัติทางกายภาพของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เตรียมจากกระดูกสัตว์	11
2. สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์	13
2.1 .ผลของขนาดไฮดรอกซีอะปาไทต์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีนค่อมโพสิต	13
2.2. ผลของการใช้สารประสานชนิดไซเลน..อสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากไฮดรอกซีอะปาไทต์	19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง 27

บรรณานุกรม 28

ประวัติคณะผู้วิจัย 32

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารประสานไซเลนที่ใช้ในการทดลอง	8
2	แสดงสัญลักษณ์แทนผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ แยกโดยตะแกรงร่อน และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยเครื่อง Diffraction Particle Sizer	12
3	แสดงอุณหภูมิการบิดงอของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีน คอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	14
4	แสดงอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีน-คอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
1	สัณฐานวิทยาของผงกระดูกถ่ายโดย SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	11
2	XRD pattern ของผงกระดูกหลังการเผาที่ 1100°C	12
3	สัณฐานวิทยาของผงกระดูกขนาดต่าง ๆ (a) < 45 μm (b) 45-63 μm (c) 63-90 μm (d) 90-125 μm และ (e) 125-150 μm	13
4	ค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	15
5	ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	16
6	ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	17
7	ค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ	17
8	ค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ ในสภาวะก่อนและหลังแช่น้ำ	18
9	ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนผิวหน้าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลน	20
10	ค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน-คอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)	21
11	ค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียม-จากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)	22
12	ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่-เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)	22

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูป **หน้า**

13 ค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA) 23

14 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA) 24

15 ค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA) 24

16 สัณฐานวิทยาของของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA) 26

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1. ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การดำรงชีวิตอยู่โดยมีสุขภาพที่แข็งแรงเป็นสิ่งที่ทุกคนปรารถนาจะรักษาไว้ให้ยาวนานที่สุด แต่เนื่องจาก วัย และ/หรือ เหตุสุดวิสัยบางประการอาจทำให้อวัยวะบางส่วนในร่างกายเสียหาย หรือทำหน้าที่บกพร่องก่อนถึงเวลาอันควร การศึกษาวิจัยด้านวัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) เป็นอีกทางหนึ่งที่สามารถเข้ามามีส่วนช่วยให้มนุษย์มีชีวิตที่ยืนยาวอย่างมีสุขภาพที่แข็งแรงและมีคุณภาพชีวิตที่ดี วัตถุประสงค์หลักของการใช้วัสดุทางชีวภาพ คือ เพื่อทดแทน และ/หรือซ่อมแซมอวัยวะส่วนที่ทำหน้าที่บกพร่องไป การเลือกวัสดุชนิดหนึ่งๆ มาใช้งาน จะมีข้อกำหนดที่สำคัญคือ วัสดุนั้นจะต้องไม่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกาย (nontoxic) ไม่ว่าโดยตรงหรือจากสารที่เกิดจากย่อยสลายทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่เหมาะสม มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) กับร่างกาย และสามารถทนต่อกรรมวิธีฆ่าเชื้อโรคได้ (sterilizability) ในทางปฏิบัติวัสดุทางชีวภาพจำเป็นต้องได้รับการทดสอบหลายอย่างตามลักษณะการใช้งานก่อนที่จะใช้งานได้จริง เช่น การทดสอบด้วยเทคนิคการปลูกเลี้ยงเซลล์และเนื้อเยื่อบนวัสดุนั้น ๆ (cell and tissue culture technique) เป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือในการศึกษาพัฒนาจากบุคคลที่มีความรู้ในหลายแขนงวิชา

กระดูกซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่สำคัญในร่างกาย เป็นคอมโพสิตระหว่างสารอินทรีย์ (องค์ประกอบหลัก คือ คอลลาเจน (collagen)) และ สารอนินทรีย์ (องค์ประกอบหลัก คือ ผลึกของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต) ซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก (Weiner *et al.* (1998), Martin *et al.* (1989)) จากชนิดองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี และการเรียงตัวขององค์ประกอบ ทำให้กระดูกมีคุณสมบัติเชิงกลที่พิเศษ คือมี stiffness และมีความแข็งแรง (strength) เชิงกลสูง มีพฤติกรรมแบบหยุ่นหนืด (viscoelastic behaviors) ซึ่งสมบัติจะขึ้นกับทิศทางของแรงกระทำ (anisotropic behavior) สมบัติเชิงกลของกระดูกจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบทางเคมี ตำแหน่งของกระดูก เพศ และ วัย แต่โดยทั่วไป ค่ามอดุลัส (tensile modulus) ของกระดูกตามแนวยาว (longitudinal direction) จะอยู่ในช่วง 7-25 GPa (Bonfield *et al.* (1987), Keller *et al.* (1990)) การแตกหักหรือร้าวของกระดูกอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุและในหลายช่วงวัย การเสื่อมสภาพของกระดูกเป็นปัญหาที่พบมากในผู้สูงอายุทั้งชายและหญิง นอกจากนี้อุบัติเหตุหรือ

เหตุสุดวิสัยอื่น ๆ อาจทำให้เกิดการการแตกหักของกระดูก โดยทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ได้เหมือนเดิม วัสดุทดแทนกระดูกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้ผู้ป่วยสามารถดำรงชีวิตได้อย่างเป็นปกติภายหลังเข้ารับการรักษา ดังนั้น การศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุทางชีวภาพเพื่อนำมาทดแทนหรือรักษาส่วนของกระดูกที่เสียหายจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญมาก

ในการพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกมุ่งหวังที่จะได้วัสดุที่มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกระดูกจริงมากที่สุด วัสดุทดแทนกระดูกที่ทำจากอัลลอยด์ของโลหะมีข้อด้อยเนื่องจากความแตกต่างระหว่าง stiffness ของโลหะและกระดูก โดยโลหะจะช่วยรับแรงที่กระทำต่อกระดูกไปเป็นส่วนใหญ่ และทำให้กระดูกที่อยู่บริเวณรอบๆวัสดุเกิดการสลายตัว (bone resorption) ทำให้เกิดการหลวมของอวัยวะขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ภายใน 5-20 ปีภายหลังจากการผ่าตัดการแก้ปัญหาอาจทำโดยการหาวัสดุที่มี stiffness ที่ใกล้เคียงกับกับกระดูกมาแทน โดยเฉพาะถ้าวัสดุนั้นสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเจริญเติบโตของกระดูกไปบนวัสดุฝัง (implant) ได้ (bioactive material) จะยิ่งเกิดผลดีขึ้นอีก (Bonfield *et al.* (1997))

ไฮดรอกซีอะปาไทต์ (hydroxyapatite, $Ca_6(PO_4)_{10}(OH)_2$) เป็นสารประเภทเซรามิกที่มีความคล้ายคลึงกับ สารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในกระดูก มีประโยชน์มากในทางการแพทย์เนื่องจากเป็นสารที่มีความเข้ากันได้กับร่างกายของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) ค่อนข้างสูง จึงมีผู้สนใจศึกษาในสถานะวัสดุทางชีวภาพอย่างหลากหลาย เช่น การนำไปเคลือบลงบนข้อสะโพกเทียมในส่วนที่เป็นแกนโลหะ เพื่อให้โลหะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกายและช่วยสร้างพันธะระหว่างข้อสะโพกเทียมกับกระดูก (Manley *et al.* (1993)) การใช้งานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การใช้ไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นสารตัวเติม (filler) ในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อผลิตเป็นวัสดุทดแทนกระดูก ซึ่งมีข้อดีคือ ค่า stiffness และความแข็งแรงสามารถปรับเปลี่ยนให้มีค่าใกล้เคียงกับกระดูกจริงได้มากกว่าการใช้โลหะหรือเซรามิก โดยอาศัยข้อดีจากพอลิเมอร์ เช่น การมีพฤติกรรมแบบ viscoelstic anisotropic และ ความเหนียว รวมกับข้อดีของเซรามิก คือ ความแข็งแรงและความเข้ากันได้กับระบบชีวภาพ ในปัจจุบันพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ได้มีการนำมาใช้จริงและผลิตในทางการค้าแล้วในชื่อ HAPEX™ (Bonfield *et al.* (1981), Bonfield *et al.* (1988))

สารไฮดรอกซีอะปาไทต์สามารถเตรียมได้จาก 3 แหล่ง คือ การสังเคราะห์จากสารเคมี การสกัดจากปะการัง และการสกัดจากกระดูกสัตว์รวมทั้งจากกระดูกมนุษย์ ไฮดรอกซีอะปาไทต์-สังเคราะห์จะมีความบริสุทธิ์สูง และสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้ตามสภาวะที่ใช้ในการ-สังเคราะห์ อย่างไรก็ตามสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตไฮดรอกซีอะปาไทต์มีราคาแพง จึงทำให้ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตสูงตามไปด้วย นอกจากนั้นยังต้องมีการตรวจสอบที่เข้มงวดเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพได้ (Yeter-Dal *et al.* (1992)) โครงกระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานชำแหละ

เนื้อสัตว์น่าจะเป็นแหล่งผลิตไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ราคาถูกและปลอดภัยสำหรับการใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ

ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากโครงกระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานชำแหละเนื้อสัตว์ ได้แก่ การนำไปบดเป็นอาหารให้แก่ สัตว์เลี้ยง การนำไปทำปุ๋ย หากสามารถนำมาสกัดไฮดรอกซีอะปาไทต์เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุชีวภาพจะเป็นการใช้ประโยชน์จากกระดูกสัตว์ได้คุ้มค่ายิ่งขึ้น การสกัดไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์ได้มีการศึกษาวิจัยแล้วในประเทศไทยโดยจรัสศรี ลอประยูรและคณะ (Itiravivong *et al.* (1992), Lorprayoon (1993)) หลังจากนั้นได้มีการนำไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่สกัดได้ไปทำลูกตาเทียมโดยศุภชัย วงศ์พิเชฐชัยและคณะ (Wongpichedchai (2001)) ซึ่งได้มีการทดลองในสัตว์ได้ผลดีและมีการใช้จริงในมนุษย์ ดังนั้นการนำไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์นำไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อการผลิตวัสดุทดแทนกระดูกน่าจะช่วยลดต้นทุนการผลิตวัสดุทดแทนกระดูกได้ในส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ ยังเป็นการขยายการใช้ประโยชน์จากกระดูกสัตว์ได้กว้างขวางและก่อให้ประโยชน์ด้านสุขภาพแก่ประชาชนในประเทศไทยได้มากขึ้นอีก

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นต่ำ มีจุดอ่อนตัว (vicat softening point) สูง มีความแข็งที่พื้นผิว (surface hardness) ดี มีความต้านทานต่อการขูดขีดและขัดสีดี มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และมีราคาไม่แพง มีคุณสมบัติที่ทนความล้า (fatigue) ได้ดี ขึ้นรูปได้ที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าพอลิเอทิลีน สมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูงลดลงช้ากว่าพอลิเอทิลีน นอกจากนี้ยังเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเข้ากันได้กับร่างกาย (Vinard *et al.* (1988), Park (1984), Falck (1995)) และมีการผลิตเป็นวัสดุทางชีวภาพที่ใช้จริง เช่น แผ่นตารางที่ใช้ในการผ่าตัดรักษาโรคลำไส้เลื่อน (mesh prosthesis for abdominal wall hernias) (Vinard *et al.* (1988)) จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นพอลิโพรพิลีนน่าจะมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกได้ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน แต่การศึกษาพัฒนาพอลิโพรพิลีนเพื่อการใช้งานด้านนี้ยังมีน้อยมาก ดังนั้นพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงถูกเลือกมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกขึ้นโดยใช้ทรัพยากรภายในประเทศ คือ กระดูกโคซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานชำแหละเนื้อเพื่อการบริโภค และพอลิโพรพิลีนซึ่งสามารถผลิตได้ในประเทศเช่นกัน ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเบื้องต้นในการนำไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์มาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิโพรพิลีน เพื่อนำใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกที่ใช้ได้ในร่างกายมนุษย์และสัตว์ การศึกษาครั้งนี้เป็นแนวทางหนึ่งในการใช้โครงกระดูกสัตว์ให้เกิดมูลค่าและประโยชน์สูงสุด รวมถึงเป็นการลดต้นทุนจากการสังเคราะห์หรือนำเข้าไฮดรอกซีอะปาไทต์จากต่างประเทศ และหากโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จะเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูก (ส่วนที่รับแรงไม่มาก เช่น กระดูกบริเวณใบหน้า) จากทรัพยากรในประเทศ เพื่อทดแทนการนำเข้าวัสดุในลักษณะเดียวกันจากต่างประเทศ และมีส่วนช่วยให้ประชาชนส่วนใหญ่ของประเทศสามารถดำรงชีวิตได้ยาวนาน โดยมีสุขภาพดีและมีคุณภาพชีวิตที่ดี ในด้านความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและความร่วมมือทางวิชาการ การพัฒนาวัสดุชนิดใหม่เพื่อ

จุดประสงค์การใช้งานทางชีวภาพ เป็นการศึกษาที่ต้องอาศัยความร่วมมือจากนักวิจัยผู้มีความรู้จากหลายสาขาวิชา ผลสำเร็จที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จะขยายผลไปสู่การทดลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่น การใช้วัสดุในสภาวะจำลองที่เหมือนในร่างกาย (*in vitro* test) และการทดลองกับสัตว์ (*in vivo* test) ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือในการทำวิจัยจากกลุ่มวิจัยอื่น ทำให้เกิดการถ่ายทอดความรู้ในระหว่างกลุ่มนักวิชาการ

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีเป้าหมายหลัก คือ ต้องการทราบความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุทดแทนกระดูกจากพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์เป็นสารตัวเติมในเมตริกซ์ของพอลิโพรพิลีน โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะสำหรับการวิจัยเพื่อให้บรรลุถึงเป้าหมายหลักคือ

1. เพื่อให้ทราบถึงผลของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ใช้เป็นสารตัวเติมต่อสมบัติทางเชิงกลรวมถึงสัณฐานวิทยา (morphology) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต
2. เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของสารประสาน (coupling agent) ต่อสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. หาขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีน โดยการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แตกต่างกันอย่างน้อยสามขนาด และผสมกับพอลิพอพิลีน ที่อัตราส่วนคงที่หนึ่งอัตราส่วน ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต
2. เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดที่เหมาะสมการตรวจสอบผลของการปรับปรุงผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยการใช้สารประสาน โดยเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีและไม่มีการปรับปรุงผิวหน้าโดยใช้สารประสาน ได้แก่ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต

4. การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) / สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่มีผู้สนใจศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง Bonfield และคณะ (Bonfield *et al.* (1981), Bonfield (1988)) เป็นกลุ่มวิจัยแรกที่ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์มาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก โดยมุ่งเน้นที่การพัฒนาสมบัติเชิงกลของ

วัสดุคอมโพสิต จากการปรับปริมาณสารตัวเติมพบว่าค่าความแข็งแรงเชิงกลของคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อปริมาณของไฮดรอกซีอะปาไทต์เท่ากับ 40 % โดยปริมาตร คอมโพสิตที่ได้มีค่ามอดุลัสและมีความเหนียว (toughness) สูง และวัสดุฝัง (implant) เกิดการยึดติดกับเนื้อเยื่อข้างเคียงได้ดี (bioactive properties) เมื่อฝังในร่างกายสัตว์ทดลองไม่เกิดการห่อหุ้มด้วยเส้นใย (fibrous encapsulation) เหมือนกับวัสดุฝังอื่น (Doyle *et al.* (1990)) พอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนและไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดยการศึกษาวิจัยของ Bonfield และคณะได้ถูกนำมาใช้จริงโดยเป็นวัสดุทดแทนกระดูกในส่วนของกระดูกที่ไม่ต้องรับแรงมาก เช่น ใช้ในการซ่อมกระดูกบริเวณฐานของเบ้าตาที่เกิดการแตกร้าว (orbital floor reconstruction) และกระดูกในส่วนของหูชั้นกลาง (middle ear implant) (Bonfield *et al.* (1997), Tanner *et al.* (1994)) การเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปโดยใช้ hydrostatic extrusion ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดเดียวกันนี้สามารถรับแรงได้มากขึ้นและมีสมบัติใกล้เคียงกับกระดูกส่วนนอก (cortical bone) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในกระดูกส่วนที่ต้องรับแรงมากขึ้นในส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย (Wang *et al.* (1997), Wang *et al.* (2000)) จากการฆ่าเชื้อโดยฉายรังสีแกมมา (γ-irradiation) พบว่า ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่งจะทำให้สมบัติการทนต่อความล้า (creep resistance) ของคอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดโครงสร้างร่างแหในเนื้อพอลิเอทิลีน (Tanner *et al.* (1998)) ขนาดและสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะปาไทต์เช่นเดียวกับสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ (Theocaris *et al.* (1981), Landon *et al.* (1977)) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต จากการศึกษาพบว่า ไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงของคอมโพสิตต่ำลงแต่จะทำให้คอมโพสิตมีค่า ductility เพิ่มขึ้น (Wang *et al.* (1998))

นอกเหนือจากการใช้พอลิเอทิลีนเป็นเมตริกซ์แล้ว การใช้เมตริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดอื่นสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกจากพอลิเมอร์-ไฮดรอกซีอะปาไทต์คอมโพสิตยังมีการศึกษาน้อยมาก ที่พบในวารสาร คือ พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone, PEEK) โดย Abu Bakar และคณะ (Bakar *et al.* (2003)) และพอลิโพรพิลีนโดย Bonner และคณะ (Bonner *et al.* (2001)) จากผลการวิจัยเบื้องต้นโดยทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก แต่ยังไม่มีรายงานการศึกษาใดใดเพิ่มเติม

การใช้สารประสานประเภทไซเลน (silane coupling agent) เป็นอีกหนึ่งที่วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อพอลิเมอร์ (interfacial bonding) เพื่อให้พอลิเมอร์-คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่น ๆ ที่ดีขึ้น จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารประสาน-ประเภทไซเลนเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ทางชีวภาพโดยหลายกลุ่มวิจัยพบว่าไซเลนสามารถเกิดอันตรกิริยากับไฮดรอกซีอะปาไทต์และผงแก้ว (glass bead) ได้ (Dupraz *et al.* (1996),Shinzato *et al.* (2001), Wang *et al.* (2000), Sousa *et al.* (2003), Tanaka *et al.* (1998)) นอกจากนี้ยังพบว่าสารไซเลนที่ถูกดูดซับและเกิดพันธะเคมีกับไฮดรอกซีอะปาไทต์จะมีสมบัติที่เข้า

กันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และช่วยให้เกิดการเจริญเติบโตของเซลสร้างกระดูกได้ ส่วนไซ-เลนที่ไม่เกิดพันธะเคมีกับไฮดรอกซีอะปาไทต์จะทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) กับเนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียง (Shinzato *et al.* (2001)) จากการศึกษาของ Sousa และคณะ (Sousa *et al.* (2003)) พบว่า คอมโพสิตของพอลิเอทิลีนและไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารไซเลนมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น Furuzono และคณะ (Furuzono *et al.*(2001)) ได้เสนอการปรับปรุงการยึดติดระหว่างผงไฮดรอกซีอะปาไทต์กับแผ่นซิลิโคน โดยการเคลือบผิวของไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลน และกราฟท์ที่ผิวของพอลิเมอร์ด้วยกรดอะคริลิก (acrylic acid) จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันทั้งสองชนิด คอมโพสิตที่ได้คาดว่าจะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นทั้งในด้านการยึดเกาะและความเป็นbioactive วิธีที่คล้ายคลึงกับ Furuzono และคณะ ได้ถูกใช้ในคอมโพสิตของพอลิเอทิลีน/ไฮดรอกซีอะปาไทต์ (Wang *et al.* (2000)) อย่างไรก็ตามทั้งสองกลุ่มวิจัยเสนอเพียงวิธีการปรับปรุงและการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันหลังการปรับปรุงแต่ยังไม่มีการรายงานเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอมโพสิตที่ได้ นอกจากนี้การกราฟท์ที่ผิวพอลิเมอร์หรือผิวของไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยสารอินทรีย์ (Liu *et al.* (1998), Borum *et al.* (2003), Liu *et al.* (1997)) เป็นอีกวิธีที่ช่วยให้มีการยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างผิวหน้าของไฮดรอกซีอะปาไทต์และเนื้อพอลิเมอร์ และคาดว่าจะช่วยทำให้คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น

ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำไฮดรอกซีอะปาไทต์ไปใช้งานด้านวัสดุชีวภาพที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) แต่ไม่พบเอกสารวิชาการที่กล่าวถึงลักษณะการศึกษา

5. ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework)

การพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อผลิตวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีสมบัติอื่น ๆ เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับกระดูกจริงของมนุษย์มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สารเคมีที่สำคัญที่ใช้มากในการศึกษาวิจัยคือ ไฮดรอกซีอะปาไทต์ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่พบมากในกระดูกและโครงสร้างที่เป็นเนื้อเยื่อแข็งอื่น ๆ ในร่างกาย นอกจากนี้ไฮดรอกซีอะปาไทต์ยังเป็นเป็นสารที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพดีมาก ไม่ละลายน้ำ และช่วยให้เซลออสทีโอบลาส (osteoblast cell) ซึ่งเป็นเซลที่ทำหน้าที่ผลิตกระดูกในร่างกายเจริญเติบโตได้ดี (osteoconductivity) (Hench (1998)) แนวทางหนึ่งในการทำวัสดุทดแทนกระดูกคือการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นสารตัวเติม (filler) โดยพอลิเมอร์ที่เลือกใช้จะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับการใช้เป็นวัสดุชีวภาพ (biomaterial) คือ จะต้องไม่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกาย มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ (sterilizability) (Tsuruta *et al.* (1993))

ตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตคือ การปรับปรุงการยึดติด (adhesion) ระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น การใช้สารประสาน (coupling agent) การใช้สารที่ช่วยให้เกดความเข้ากัน (compatibilizer) การทำให้เกิดพันธะโควาเลนซ์ระหว่างผิวของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ การเลือกใช้วิธีใดเพื่อพัฒนาวัสดุที่ใช้ทางชีวภาพจะต้องมีการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดสารที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย

กระดูกสัตว์เป็นแหล่งของไฮดรอกซีอะปาไทต์จากธรรมชาติที่ราคาถูกเมื่อเทียบกับไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และมีความเข้ากันได้ดีกับระบบชีวภาพ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสกัดและการนำมาใช้งานเกี่ยวกับวัสดุชีวภาพมีหลากหลายทั้งในและต่างประเทศ (Yeter-Dal *et al.* (1992), Itiravivong *et al.* (1992), Lorprayoon (1993), Wongpichedchai (2001), Johnson *et al.* (2000)) ตัวอย่างการศึกษาวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์ในด้านวัสดุชีวภาพ เช่น การทำลูกตาเทียม (Wongpichedchai (2001)) การใช้เป็นอนุภาคที่บรรจุในคอร์ลัมแยกของลิควิดโครมาโตกราฟีเพื่อใช้ในการแยกโปรตีน (Honda *et al.* (1998)) ส่วนการนำมาใช้งานในลักษณะที่เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตเท่าที่ค้นคว้าในเอกสารรายงานการวิจัยยังไม่ปรากฏ

6. ผลสำเร็จของการวิจัย

1. ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกได้
2. เป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานและมูลค่าให้กับกระดูกสัตว์
3. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองภายในประเทศจากการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้วัตถุดิบจากทรัพยากรภายในประเทศ
4. เป็นการพัฒนาความสามารถทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
5. ได้เอกสารวิชาการที่ตีพิมพ์ระดับประเทศและ/หรือระดับนานาชาติ
   - N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, and W. Sutapun, "*Effect of Surface Modification on Properties of Natural Hydroxyapatite/Polypropylene Composites*," **Key Eng. Mater., 361-363**, 511-514, 2008.
   - N. Suppakarn, J. Rittita, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and C. Lorprayoon, *"Effect of Filler Particle size on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-PolyPropylene Composite*," **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.242, 2005.

บทที่ 2
วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมี

กระดูกวัวซื้อจากบริษัทลิ้มอิ่มเส็ง จำกัด จังหวัดนครราชสีมา พอลิโพรพิลีน (PP700J) ซื้อจากบริษัทไทยพอลิพอพิลีน จำกัด และสารประสานไซเลน (ตารางที่ 1) ได้แก่ 3-aminopropyl triethoxysilane (APES), methyltrimethoxysilane (MTMS) และ glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPMS) ซื้อจากบริษัท GE Silane

ตารางที่ 1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารประสานไซเลนที่ใช้ในการทดลอง

สารประสานไซเลน	โครงสร้างทางเคมี
3-aminopropyltriethoxysilane (APES)	NH_2-CH_2-CH_2-CH_2-Si-$(OCH_2CH_3)_3$
methyltrimethoxysilane (MTMS)	CH_3-Si-$(OCH_3)_3$
glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPMS)	CH_2O-CH_2-CH_2-CH_2-Si-$(OCH_3)_3$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์

นำกระดูกวัวไปเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ และนำไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ได้ไปเตรียมให้อยู่ในลักษณะเป็นผง โดยการบดด้วยเครื่อง ball milling (Pot mill: Patkasem Ceramic Machine, Co.Ltd.) และนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ คือ

1.1 ชนิดของสารประกอบที่อยู่ในผงกระดูกโดย X-ray diffractometer (XRD)

1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาโดย Scanning Electron Microscope (SEM)

เนื่องจากกระดูกสัตว์เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่อาจมีหลายตัวแปรที่ทำให้องค์ประกอบของกระดูกแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ให้ได้ปริมาณมากเพียงพอที่จะใช้ตลอดโครงการ เพื่อลดความผันแปรของผลการทดลองที่อาจเกิดขึ้นจากการเตรียมเป็นครั้ง ๆ

2. การเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ

นำผงกระดูกที่เตรียมได้ในข้อ 1 มาบดโดยใช้ครกหินอีก เพื่อให้ผงกระดูกไม่ติดกันเป็นก้อน แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 125 μm จากนั้นนำกระดูกปริมาณ 100 กรัม ใส่สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA, ความเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก) ปริมาณ 36 กรัม นวดให้สารละลาย PVA กับผงกระดูกเข้ากัน ใช้เวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำของผสมที่ได้มาบดให้เป็นก้อนเล็ก ๆ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแห้งสนิท จากนั้นนำมาบดด้วยครกหินเบา ๆ เพื่อให้ของผสมแตกเป็นเม็ดละเอียด แล้วนำไปเผา โดยมีขั้นตอนการเผาเป็นสองขั้น เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปถึงอุณหภูมิ 500 °C ด้วยอัตราเร็ว 10 °C /min จากนั้นลดอัตราเร็วของการให้ความร้อนลงเหลือ 5 °C /minและเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 °Cไปถึงอุณหภูมิ 1100 °C แช่ไว้ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสาร-ตัวอย่าง*หรือผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการเผามาผ่านเครื่องร่อนโดยใช้ตะแกรงเบอร์ต่าง* ๆ คือ 150, 125, 90, 63 และ45 μm. เพื่อแยกผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน โดยจะได้ผง-ไฮดรอกซีอะปาไทต์*ที่มีขนาดต่าง ๆ ดังนี้ 125-150 μm, 90-125 μm, 63-90 μm, 45-63 μm และ สารที่* มีขนาดเล็กกว่า 45 μm

3. การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการผสมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์กับพอลิเมอร์

นำผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยแตกต่างกันมาผสมกับพอลิโพรพิลีนโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณคงที่ที่ 40% โดยน้ำหนัก ใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer, Polylab: Haake) ความเร็วรอบ 50 rpm, อุณหภูมิ 170 °C ใช้เวลาผสม 13 นาที

4. *การเตรียมชิ้นทดสอบจากพอลิเมอร์คอมโพสิตจากข้อ 3*

นำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมในข้อ 3 ไปบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโดยใช้การขึ้นรูปแบบฉีด โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก(injection molding machine, CLF-80T: Chuan Lih-Fa Co.Ltd.) ที่อุณหภูมิ 200 °C ใช้ความเร็วในการฉีด 50 %, ความดันในการฉีด 45 % และความดันคงค้าง 50 % จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

4.1 สมบัติทางความร้อน ได้แก่

- อุณหภูมิการบิดงอของชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัด heat distortion temperature (ASTM D648)

4.2 สมบัติเชิงกล ได้แก่

- ความทนต่อแรงดึง โดยใช้ Universal Testing Machine (ASTM D638) (10 mm/min)
- ความทนต่อแรงดัด โดยใช้ Universal Testing Machine (ASTM D790) (10 mm/min)
- ความทนต่อแรงตกกระทบ โดยใช้เครื่อง Impact Tester (ASTM D256) ทดสอบแบบ Izod

5. การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์กับพอลิ-โพรพิลีน โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM)

ตรวจดู fracture surface ของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบความทนต่อแรงดึง ตามข้อ 4.2

6. การปรับปรุงผิวหน้า (surface) ของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสาน (coupling agent)

จากผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต เลือกขนาดผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ให้สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีที่สุด เพื่อนำมาปรับปรุงผิวหน้าโดยใช้สารประสาน

สารประสานที่ใช้คือสารประสานประเภทไซเลน APES GPMS และ MTMS

เตรียมสารละลายไซเลนในน้ำ/เมทานอล โดยมีความเข้มข้นของไซเลน 1.0 %โดยน้ำหนัก ปรับค่า pH = 3.5 นำผงไฮดรอกซีอะปาไทต์มาแช่ประมาณ 1 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำ อบที่ 60° และ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

7. การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากการผสมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีการปรับปรุงผิวหน้าโดยใช้สารประสานกับพอลิเมอร์

นำผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีการปรับปรุงผิวหน้าโดยใช้สารประสานความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนักของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ มาผสมกับพอลิเมอร์โดยใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะปาไทต์คงที่ที่ 60% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องบดผสมภายใน อุณหภูมิ 200-220°C ความเร็วรอบ 50 rpm

8. การเตรียมชิ้นทดสอบจากพอลิเมอร์คอมโพสิตจากข้อ 7 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของสารประสานต่อการปรับปรุงผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์

นำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมในข้อ 7 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโดยการขึ้นรูปแบบฉีด (180-200°C) จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

8.1 สมบัติเชิงกล ได้แก่

- ความทนต่อแรงดึง โดยใช้เครื่อง Universal Testing (ASTM D638)
- ความทนต่อแรงดัด โดยใช้ Universal Testing Machine (ASTM D790)
- ความทนต่อแรงตกกระทบ โดยใช้เครื่อง Impact Tester (ASTM D256) ทดสอบแบบ Izod

9. การศึกษาอิทธิพลของสารประสานต่อการปรับปรุงผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์กับพอลิเมอร์ โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจดู fracture surface ของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบความทนต่อแรงดึงตามข้อ 8.1

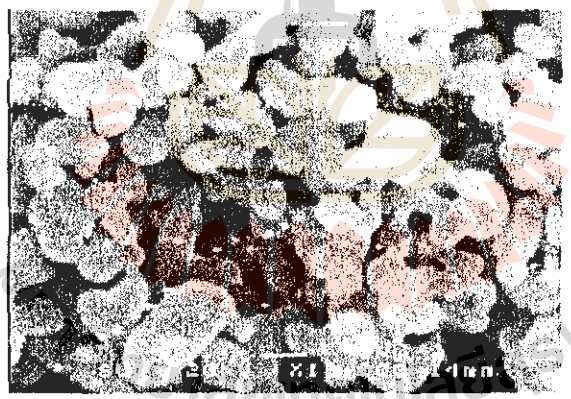
บทที่ 3

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. การเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์

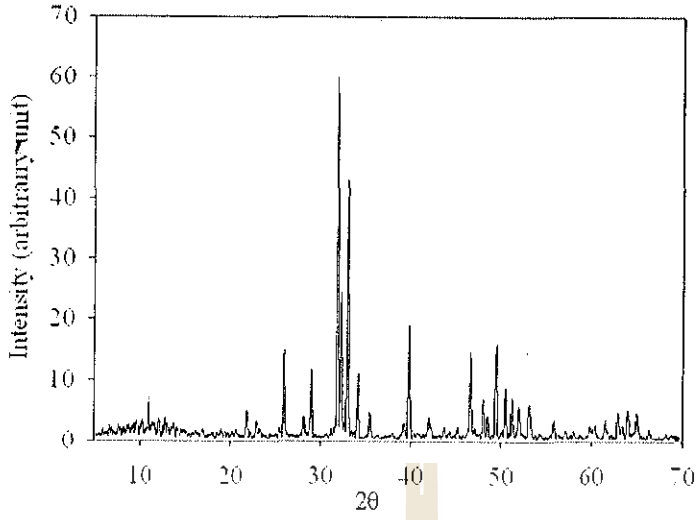
1.1. สมบัติทางกายภาพของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เตรียมจากกระดูกสัตว์

กระดูกสัตว์ถูกนำมาเผาและบดให้อยู่ในรูปผงละเอียด โดยใช้เครื่อง ball milling ผงกระดูกที่เตรียมได้มีสีขาว เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยเครื่อง SEM พบว่าผงกระดูกที่เตรียมได้มีรูปทรงที่ไม่ปกติ (irregular shape) คือ ไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต มีขนาดหลากหลาย พื้นผิวของอนุภาคค่อนข้างว่องไว ดังจะสังเกตเห็นได้จากการที่อนุภาคจะเกาะกลุ่มกัน (agglomeration) มากกว่าที่จะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สัณฐานวิทยาของผงกระดูก ถ่ายโดย SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

XRD pattern ของผงกระดูกหลังการเผาที่ 1100°C แสดงดังรูปที่ 2 จากการวิเคราะห์โดย XRD พบว่า ผงกระดูกที่เตรียมขึ้นมีความเป็นผลึกสูง และมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต (calcium hydroxide phosphate, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) หรือ ไฮดรอกซีอะปาไทต์ (hydroxyl apatite) ดังนั้น จากผลการศึกษานี้ยืนยันได้ว่า สามารถเตรียมไฮดรอกซีอะปาไทต์จากแหล่งธรรมชาติ คือ กระดูกสัตว์ และสามารถเรียกผงกระดูกสัตว์ที่เตรียมขึ้นว่า ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์

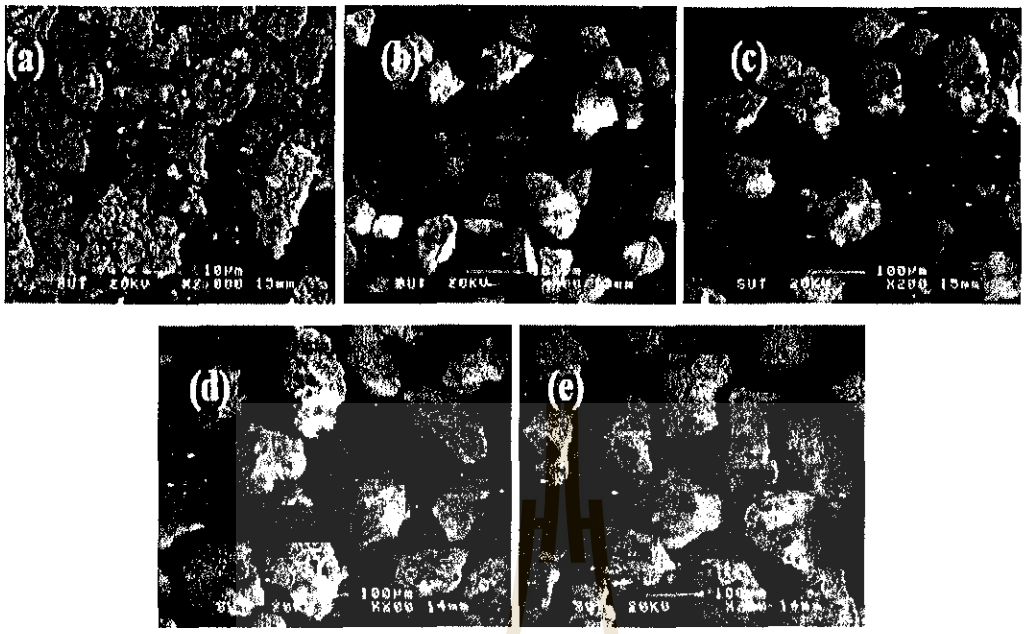


รูปที่ 2 XRD pattern ของผงกระดูกหลังการเผาที่ 1100°C

จากการเตรียมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ โดยใช้สารละลาย PVA เป็นสารยึดเกาะ (binder) เผาที่ 1100 °C และร่อนโดยใช้ตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ เพื่อแยกผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่างกันออกจากกัน จะได้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ตามขนาดช่องของตะแกรงแยก ดังนี้ 125-150 μm, 90-125 μm, 63-90 μm, 45-63 μm และ ผงที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm และสามารถหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่แยกแต่ช่วงได้โดยเครื่อง Diffraction Particle Sizer ดังแสดงผลในตารางที่ 2 นอกจากนี้ สามารถยืนยันขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงสัญลักษณ์แทนผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ แยกโดยตะแกรงร่อนและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยเครื่อง Diffraction Particle Sizer

สัญลักษณ์	ขนาดตะแกรง (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)*
A	< 45	21.71
B	45-63	46.86
C	63-90	52.78
D	90-125	62.32
E	125-150	92.54



รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของผงกระดูกขนาดต่าง ๆ (a) < 45 μm (b) 45-63 μm (c) 63-90 μm (d) 90-125 μm และ (e) 125-150 μm

2. สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์

2.1 .ผลของขนาดไฮดรอกซีอะปาไทต์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบภายใน ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ พอลิเมอร์-คอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจะมีปริมาณผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่คงที่ 40% โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิตทุกสภาวะจะถูกนำไปฉีดขึ้นรูปเพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

<u>สมบัติทางความร้อน</u>

ค่าอุณหภูมิการบิดงอ (HDT) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 จากตารางจะเห็นว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจะมีค่าอุณหภูมิการบิดงอที่สูงกว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีน และชิ้นงานพอลิโพรพิ-ลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm จะมีค่าอุณหภูมิการบิดงอที่สูงที่สุด

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิการบิดงอของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ

สัญลักษณ์	HDT (°C)
PP	81.67±2.08
PP/A	95.67±0.58
PP/B	92.33±0.58
PP/C	92.00±0.00
PP/D	92.50±3.54
PP/E	92.00±1.73

ค่าอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4 จากตารางจะเห็นว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีน แสดงให้เห็นว่าการนำผงไฮดรอกซีอะปาไทต์มาผสมกับพอลิโพรพิลีนทำให้ได้ชิ้นงานคอมโพสิตที่ทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม จากตาราง จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตไม่ขึ้นกับขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่นำมาผสมกับพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 4 แสดงอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ

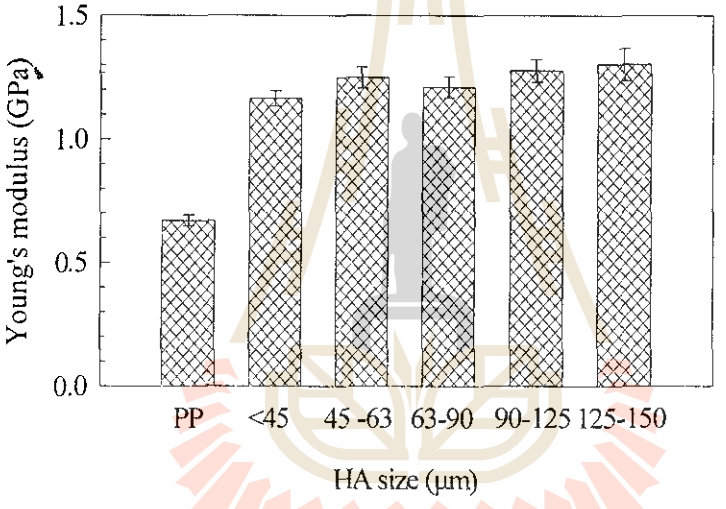
สัญลักษณ์	T_d(°C)
PP	454
PP/A	465
PP/B	465
PP/C	465
PP/D	464
PP/E	464

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมบัติทางกล

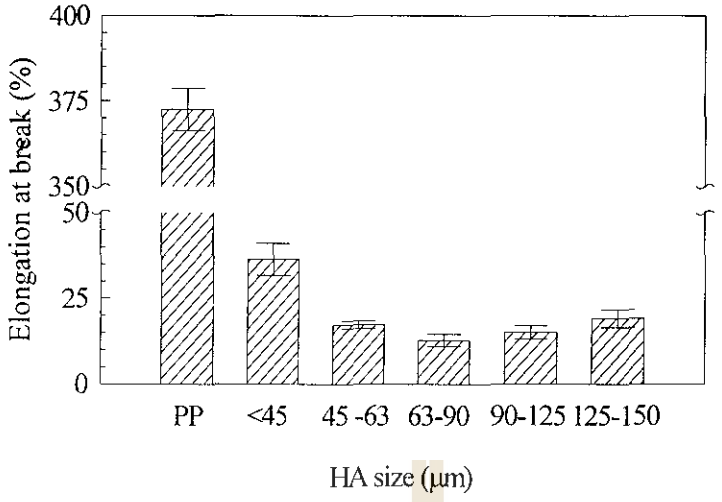
ความทนต่อแรงดึง (tensile property)

จากรูปที่ 4 ค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผสมเข้าไปมีค่ามอดุลัสสูงกว่า-พอลิโพรพิลีน และยังเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงดึง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากสารตัวเติมขนาดของต่าง ๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่า ค่ามอดุลัสของยังก์ของคอมโพสิตเหล่านั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดของผงไฮดรอกซีอะ-ปาไทต์ในช่วงที่ศึกษา (คือ เล็กกว่า 45 μm-150 μm) ไม่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง (stiffness) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 4 ค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ

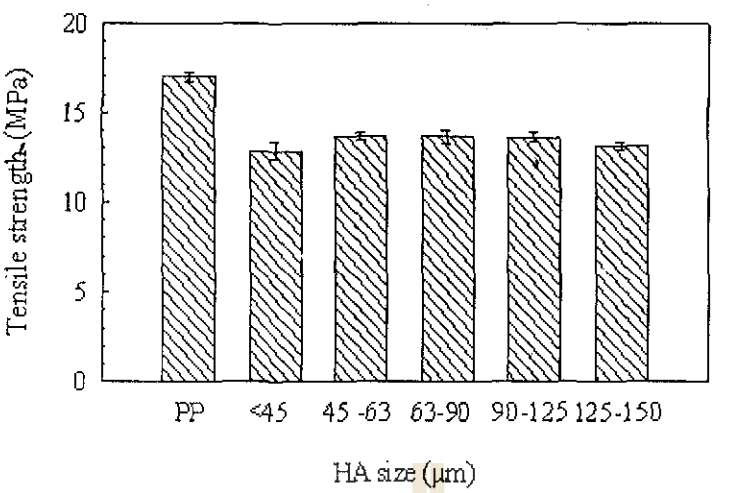
ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก (elongation at break) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียด ณ จุดแตกหักของพอลิโพรพิลีน เนื่องจากการที่พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรง (stiffness) ที่เพิ่มขึ้นจากการผสมกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความเครียด ณ จุดแตกหักของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ พบว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดเล็กกว่า 45 μm มีค่าความเครียด ณ จุดแตกหักสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่างๆ

ค่าความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีน ดังแสดงในรูปที่ 6 การเติมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีความสามารถในการต้านการแตกหัก (failure) ลดลง เนื่องจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์มีผิวหน้าที่ค่อนข้างมีขั้วเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน จึงทำให้ทั้งสองเฟสมีความเข้ากัน (compatible) ต่ำและเกิดแรงยึดเหนี่ยว (adhesion) ระหว่างสองเฟสได้ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่างกันพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ในช่วงที่ศึกษา (คือ เล็กกว่า 45 μm-150 μm) อาจทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสองเฟสได้ใกล้เคียงกัน

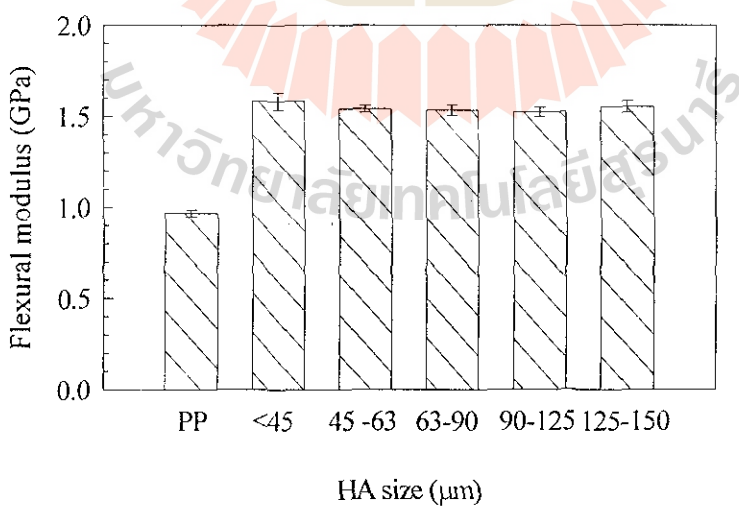
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 6 ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่างๆ

ความทนต่อแรงดัด (flexural property)

จากรูปที่ 7 ค่ามอดุลัสของแรงดัด (flexural modulus) ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากสารตัวเติมขนาดของต่าง ๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่า ค่ามอดุลัสของแรงดัดมีค่าไม่แตกต่างกัน

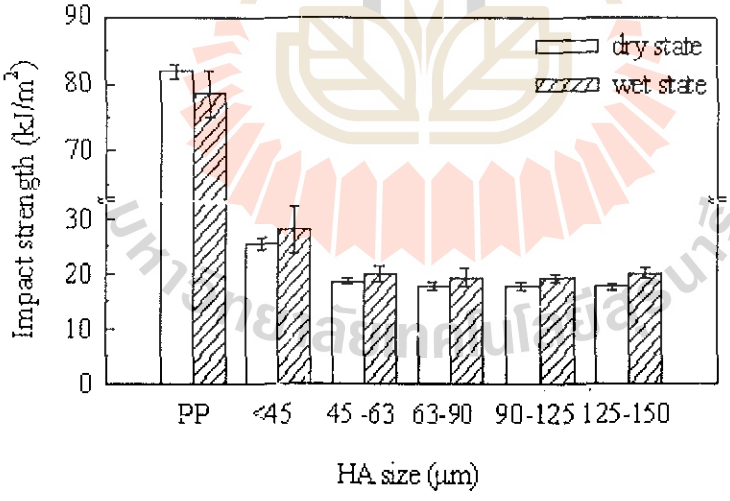


รูปที่ 7 ค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่างๆ

จากผลการทดสอบสมบัติการดึงและสมบัติการทนต่อแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตชี้ให้เห็นว่า ขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ในช่วงที่ใช้ศึกษาไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนค่ามอดุลัสของยังก์ ค่าความแข็งแรงต่อการดึง และค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต สาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการที่ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นผงที่มีขนาดเล็กลงจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการผสมในเครื่องบดผสมภายใน นอกจากนี้ การที่ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนด้วยแรงที่ใกล้เคียงกัน

สมบัติความทนต่อแรงตกกระทบ (izod impact property) และสมบัติความทนต่อแรงตกกระทบที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดูดซับน้ำ

ในรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อแรงตกกระทบในสภาวะก่อนการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต จะพบว่า ความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าต่ำว่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตมีขนาดใหญ่กว่า 45 μm



รูปที่ 8 ค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ ในสภาวะก่อนและหลังแช่น้ำ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงตกกระทบของชิ้นงานระหว่างสภาวะก่อนและหลังการดูดซับน้ำ พบว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนมีค่าความทนต่อแรงตกกระทบลดลงหลังผ่านการดูดซับน้ำ

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดที่เท่ากันพบว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตหลังผ่านการดูดซับน้ำมีค่าความทนต่อแรงตกกระทบของเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าที่สภาวะหลังผ่านการดูดซับน้ำชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดเล็กกว่า 45 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงตกกระทบที่สูงที่สุด การที่ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าความทนต่อแรงตกกระทบเพิ่มขึ้นหลังการดูดซับน้ำ อาจเนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) และ ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในการดูดซับน้ำที่มากกว่าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดใหญ่

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ พบว่า ขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ในช่วงที่ศึกษา (คือ เล็กกว่า 45 μm-150 μm) มีผลต่อค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงตกกระทบที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามขนาดของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ในช่วงที่ศึกษา ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนค่ามอดุลัสของยังก์ก์ ค่าความแข็งแรงต่อการดึง และค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ดังนั้นในการทดลองขั้นถัดไป จึงเลือกใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 45 μm ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณคงที่ที่ 60 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากรายงานการศึกษาอีกส่วนหนึ่ง (Supakarn *et al.* (2005)) พบว่า เป็นปริมาณผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ใช้ผสมได้สูงสุดที่สามารถทำให้การผสมพอลิโพรพิลีนกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นไปอย่างทั่วถึง

2.2. ผลของการใช้สารประสานชนิดไซเลนต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากไฮดรอกซีอะปาไทต์

ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ถูกปรับเปลี่ยนสมบัติที่ผิวหน้าโดยใช้สารประสานชนิดไซเลนสามชนิด คือ APES MTMS และ GPMS และนำมาผสมกับพอลิโพรพิลีนโดยใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะปาไทต์คงที่ที่ 60 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเปรียบเทียบกัน

สารประสานชนิดไซเลนมีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ $YSi(OR)_3$ เมื่อ OR และ Y แทน หมู่ที่สามารถถูกไฮโดรไลต์ได้ (hydrolysable) (เช่น เมทอกซี, OCH_3) และหมู่ที่ไม่สามาถถูกไฮโดรไลต์ได้ (non-hydrolysable) (เช่น อะมิโน, NH_2) ตามลำดับ การปรับเปลี่ยนสมบัติที่ผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสานชนิดไซเลนเกิดผ่านปฏิกิริยาเคมีสองแบบ คือ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) ดังแสดงในรูปที่ 9 หลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหมู่

OR จะถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่ OH ซึ่งเกิดพันธะกับธาตุซิลิคอน เรียกว่า หมู่ไซลานอล (silanol, -Si-OH) จากนั้น หมู่ไซลานอลที่เกิดขึ้นสามารถเกิดแรงกระทำกับหมู่ OH ที่ผิวของไฮดรอกซีอะปาไทต์และเกิดพันธะไซลอกเซน์ (siloxane, -Si-O-Si-) ผ่านปฏิกิริยาควบแน่น ดังนั้นผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จะถูกเปลี่ยนไปโดยมีหมู่ Y จากสารประสานไซเลนเกิดขึ้นแทน (Metin *et al.* (2004)) ผลจากการปรับเปลี่ยนพื้นผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จะทำให้เกิดความเข้ากันระหว่างผงไฮดรอก์ซีอะปาไทต์กับพอลิโพรพิลีนมากขึ้น

Hydrolysis reaction:

$$YSi(O-R)_3 + 3H_2O \rightarrow YSi(OH)_3 + 3ROH$$

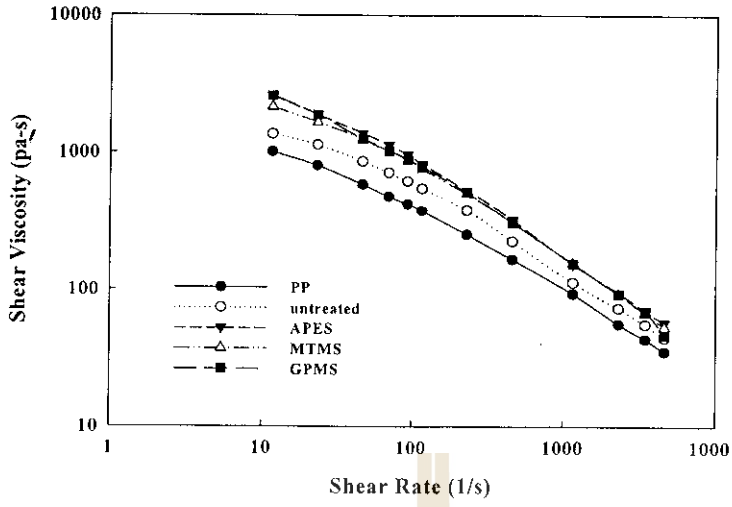
Condensation reaction:

$$\equiv Si-OH + YSi(OH)_3 \rightarrow \equiv Si-O-SiY + H_2O$$

รูปที่ 9 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนผิวหน้าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลน

<u>สมบัติทางวิทยกระแส</u>

รูปที่ 10 แสดงค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่อัตราเฉือน (shear rate) ต่าง ๆ ณ อัตราเฉือนที่เท่ากัน ค่าความหนืดเฉือนของพอลิโพรพิลีนมีค่าต่ำกว่าค่าความหนืดเฉือนของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตและมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า ณ อัตราเฉือนที่เท่ากัน พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะมีค่าความหนืดเฉือนที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนมีแรงกระทำและความเข้ากันได้กับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนมากขึ้น อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสานไซเลนชนิดต่างกันไม่มีผลต่อค่าความหนืดเฉือนของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

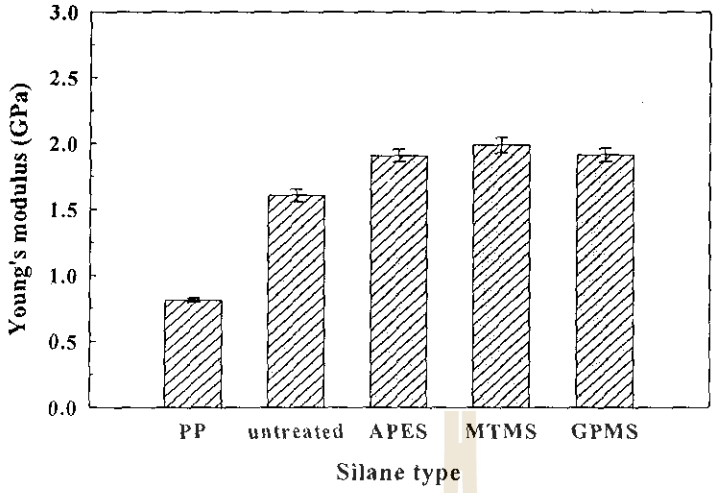


รูปที่ 10 ค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

- <u>สมบัติทางกล</u>
  - <u>ความทนต่อแรงดึง (tensile property)</u>

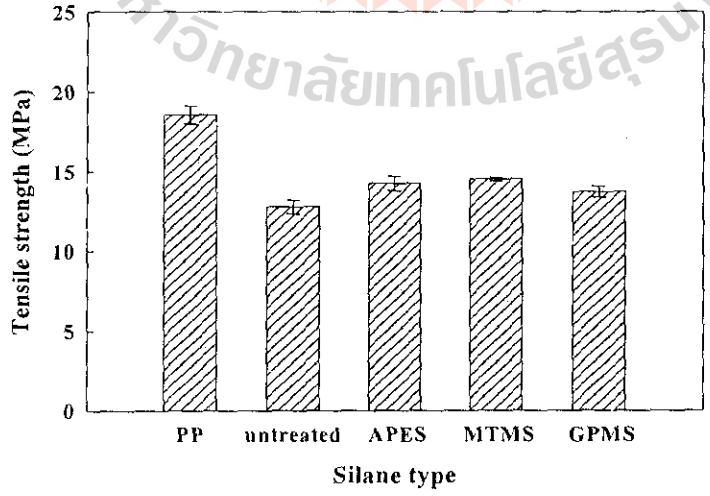
จากรูปที่ 11 ค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นมีค่าค่ามอดุลัสของยังก์สูงกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสานไซเลนชนิดต่างกันไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 11 ค่ามอดุลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

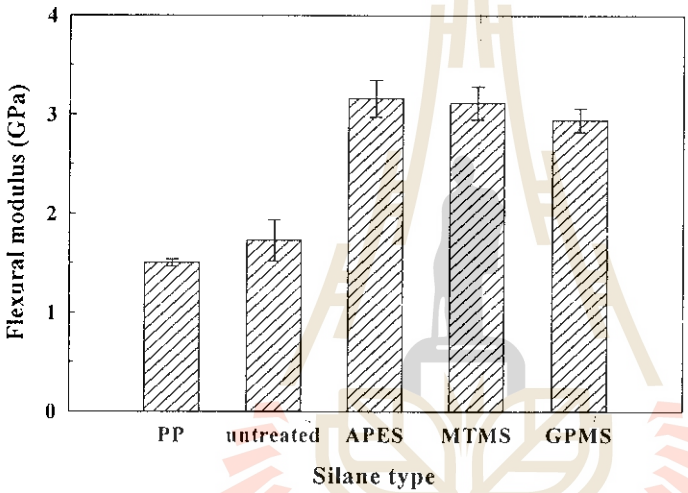
จากรูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึง ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นมีค่าความแข็งแรงต่อการดึงสูงกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสานไซเลนชนิดต่างกันไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต



รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

- ความทนต่อแรงดัด (flexural properties)

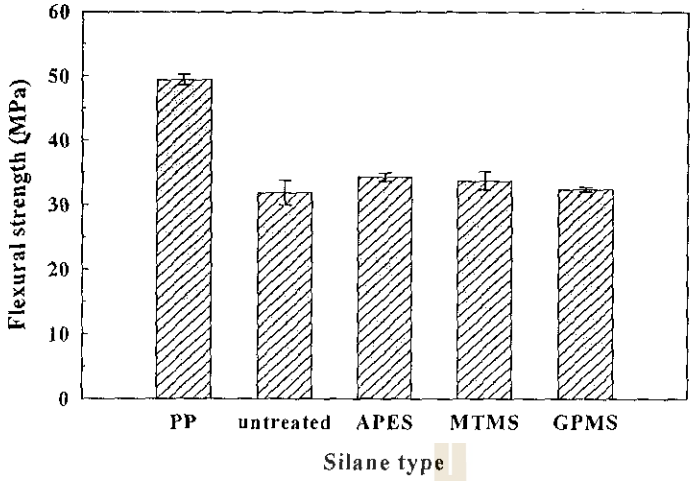
จากรูปที่ 13 ค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่าสูงกว่าค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นมีค่ามอดุลัสของแรงดัดสูงกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์โดยใช้สารประสานไซเลนชนิดต่างกันไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต



รูปที่ 13 ค่ามอดุลัสของแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

จากรูปที่ 14 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด (flexural strength) ของพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนชนิดต่าง ๆ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

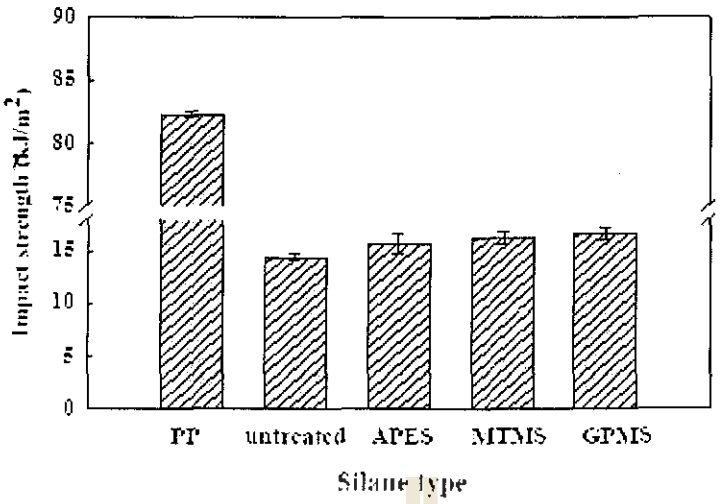
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 14 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

จากรูปที่ 15 ความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนมีค่าสูงกว่าค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ พบว่า การใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นมีค่าความทนต่อแรงตกกระทบที่สูงขึ้นกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับเปลี่ยนผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน แสดงให้เห็นว่า สารประสานไซเลนช่วยให้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์มีแรงกระทำและมีการกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้มีการส่งผ่านแรงระหว่างเฟสได้ดีขึ้น (แสดงในรูปที่ 16 หัวข้อสัณฐานวิทยา) แต่ชนิดของไซเลนไม่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



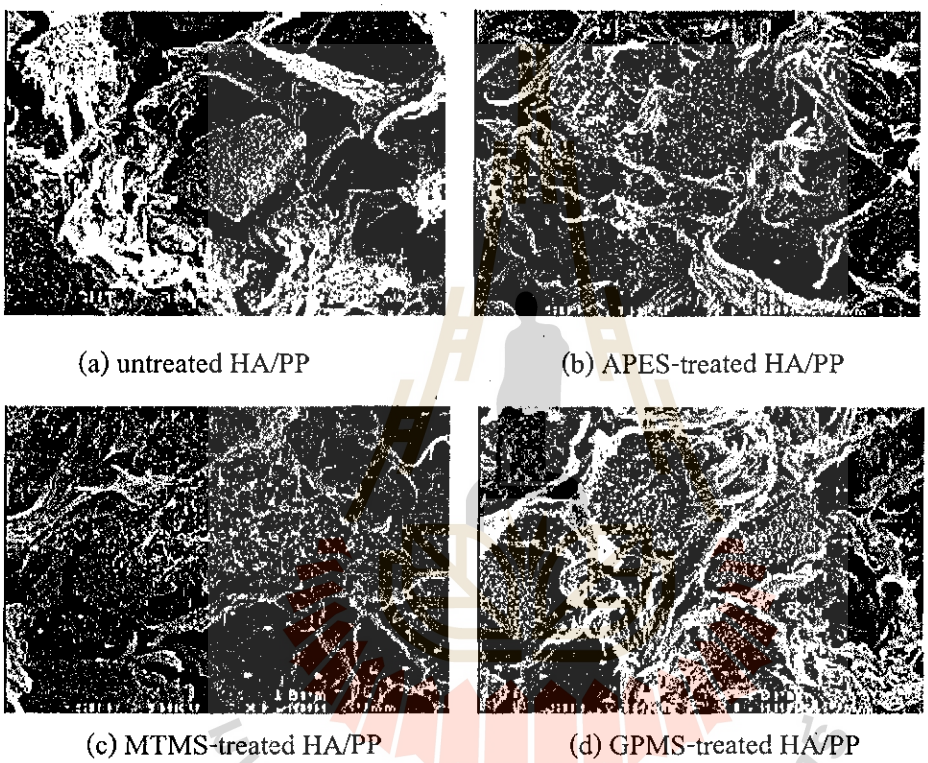
รูปที่ 15 ค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

จากการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนพบว่า พอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยไซเลน จะช่วยปรับปรุงค่ามอดุลัสของยังก์ ค่าความแข็งแรงต่อการดึง ค่ามอดุลัสของการดัด และค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นและได้ค่าที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงผิวหน้าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลนช่วยเพิ่มแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนและผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ได้

- <u>สัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต</u>

รูปที่ 16 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ผ่านการดึงยืดจนกระทั่งเกิดการแตกหักของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ ใน จากผลการทดลองพบว่า ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะมีการกระจายตัว (distribution) ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ได้ดีกว่าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มกำลังขยายให้สูงขึ้นจะพบว่า เมทริกซ์พอลิโพรพิลีนกับผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จะเกิดการยึดติดกันที่พื้นผิว (interfacial interaction)ได้ดีขึ้น เมื่อเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสาร-

ประสานไซเลนสังเกตได้จาก การแคบลงของโพรงหรือช่องว่างระหว่างพื้นผิวของเฟสทั้งสองและการที่มีเนื้อพอลิโพรพิลีนติดอยู่บนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน ข้อมูลทางสัณฐานวิทยาที่ได้สนับสนุนและอธิบายการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสของยังก์ ค่าความแข็งแรงต่อการดึง ค่ามอดุลัสของการดัด และค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเมื่อเตรียมโดยใช้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลน



(a) untreated HA/PP (b) APES-treated HA/PP

(c) MTMS-treated HA/PP (d) GPMS-treated HA/PP

รูปที่ 16 สัณฐานวิทยาของของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบต่าง ๆ (untreated-HA, APES-HA, MTMS-HA GPMS-HA)

บทที่ 4
สรุปผลการทดลอง

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากกระดูกสัตว์ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้ขนาดสารตัวเติมที่แตกต่างกัน เมื่อนำผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ขนาดต่าง ๆ มาเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่ปริมาณสารตัวเติมคงที่ที่ 40 %โดยน้ำหนัก พบว่า การใส่ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จะทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีค่ามอดุลัสของยังก์ ค่ามอดุลัสของแรงดัด และค่าความแข็งแรงต่อการดึงเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันทำให้ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก และค่าความทนต่อแรงตกกระทบมีค่าลดลง ค่าความทนต่อแรงตกกระทบของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะเปียกมีค่าต่ำกว่าค่าความทนต่อแรงตกระทบของพอลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตามพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตในสภาวะเปียกจะมีค่าความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตในสภาวะแห้งที่มีปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน

การปรับปรุงพื้นผิวหน้าของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยสารประสานไซเลน ช่วยให้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์เกิดการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และช่วยให้เฟสทั้งสองเกิดการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น จากการศึกษาผลของสารประสานไซเลนต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีปริมาณผงไฮดรอกซีอะปาไทต์คงที่ที่ 60% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนแล้ว การเติมผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนจะช่วยเพิ่ม ค่ามอดุลัสของยังก์ ค่าความแข็งแรงต่อการดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด ค่ามอดุลัสของแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต ชนิดของสารประสานไซเลนเมื่อใช้ปรับผิวหน้าผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ด้วยความเข้มข้น 1 % โดยน้ำหนักของผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต

อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวหน้าด้วยสารประสานไซเลนยังมีค่าค่อนข้างต่ำ (ค่ามอดุลัส (tensile modulus) ของกระดูกตามแนวยาว (longitudinal direction) จะอยู่ในช่วง 7-25 GPa (Bonfield *et al.* (1987), Keller *et al.* (1990))) และต้องศึกษาวิจัยต่อไป เพื่อหาวิธีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตให้สามารถใช้งานได้จริง

บรรณานุกรม

Abu Bakar, M.S., Cheang, P. and Khor, K. A. Mechanical Properties of Injection Molded Hydroxyapatite-Polyetheretherketone Biocomposites," *Composites Science and Technology*, **63**, 421-442 (2003)

Bonfield, W., Grynpas, M.D., Tully, A.E., Brawn, J. and Abram, J. "Hydroxyapatite Reinforced Polyethylene- a Mechanically Compatible Implant Material for Bone Replacement," *Biomaterials*, **2**, 185-6 (1981)

Bonfield, W. "Composites for Bone Replacement," *J. Biomed. Eng.*, **10**, 522-526 (1988)

Bonfield, W. "Advances in the Fracture-mechanics of Cortical Bone," *J. Biomech.*, **20**, 1071-1074 (1987)

Bonfield, W. "Hydroxyapatite Reinforced Polyethylene as an analogous Materials for Bone replacement," in *Bioceramics: Material Characterеristic Versus In Vivo Behavior*, edited by P. Ducheyne and J. Lemons. Annals of New York Academy of Science, New York, **523**, 173-7 (1988)

Bonfield, W. and Tanner, E. "Hydroxyapatite Composite Biomaterials – Evolution and Applications," *Materials World*, **5**(1), 18-20 (1997)

Bonner, M., Ward, I.M., McGreGor, W. and Bonfield, W. Hydroxyapatite/Polypropylene Composite: A Novel Bone Substitute Material," *J. Mater. Sci. Letters*, **20**, 2049-2051 (2001)

Borum-Nicholas, L. and Wilson Jr., O.C. "Suraface Modification of Hydroxyapatite. Part I Dodecyl Alcohol," *Biomaterials*, **24**, 3671-3679 (2003)

Doyle, C., Luklinska, Z.B., Tanner, K.E. and Bonfield, W. "An Ultrastructural Study of the Interface between Hydroxyapatite-Polymer Composite and Bone," in *Clinical Implant Materials*, edited by G.Heimke, U. Soltesz, and A. Lee, Elsevier, Amsterdam, 339-343 (1990)

Dupraz, A.M.P., Wijin, J.R., Meer, S.A.T. and Groot, K. "Characterization of Silane-Treated Hydroxyapatite Powder for Use as Filler in Biodegradable Composites," *J. Biomed. Mater. Res.*, **30**, 231-238 (1996)

Evans, G. P., Behiri, J. C., Bonfield, W. and Currey, J. D. " Microhardness and Young's Modulus in Cortical Bone Exhibiting a Wide range of Mineral Volume Fractions and in a Bone Analouge,"*J. Mater. Sci.: Mater. in Med.*, **1**, 38-43 (1990)

Falck, P. "Characterization of Human Neutrophils Adherent to Organic Polymers," *Biomaterials*, 16, 61-66 (1995)

Furuzono, T., Sonoda, K. and Tanaka, J. "A Hydroxyapatite Coating Covalently Linked onto a Silicone Implant Material," *J. Biomed. Mater. Res.*, **56**(1), 9-16 (2001)

Hench,L.L. "Bioceramics," *J. Am. Cer. Soc.*, 8(7),1705-1728 (1998)

Honda, F., Honda, H., Koishi, M. and Matsuno, T. "Properties of Cattle Bone Powder-Coated Composite Particles as High Performance and Open Column Liquid Chromatographic Column Packings," *J. Chromatography A*, **813**, 21-33 (1998)

Itiravivong, P., Lorprayoon, C., Sukpetch, A. and Ruruxsiriuorn, S. "A Comparative Study and Clinical Application of Hydroxyapatite from Different Origins," *5th International Symposium on Bioceramics in Medicine*, November 1992, Japan and in *Bioceramics*,**5**, 157-164 (1992)

Johnson, G.S., Mucalo, M. R., Lorier, M. A., Gieland, U. and Mucha, H. "The processing and Characterization of Animal-Derived Bone to Yield Materials with Biomedical Applications. Part II: Milled Bone Powders, Reprecipitated hydroxyapatite and the Potential Uses of These Materials," *J. Mater. Sci.: Mater. In Med.*, **11**, 725-741 (2000)

Keller, T. S., Mao, Z., Spengler, D.M. "Young's Modulus, Strength and Tissue Physical Properties of Humane Compact Bone, *J. Orthop. Res.*, **8**, 592-603 (1990)

Landon, G., Lewis, G., Boden, G.F. "The Influence of Particle Size on Tensile Strength of Particulate filled Polymers," *J. Mater. Sci.*, **12**, 1605-1613 (1977)

Liu, de Wijn, Q. J.R., de Groot, K., van Blitterswijk, C. A. Surafce Modification of Nano-Apatite by Grafting Organic Polymer, *Biomaterials*, **19**, 1067-1072 (1998)

Liu, Q., de Wijn, J.R. and van Blitterswijk, C. A. A Study on the Grafting Reaction of Isocyanates with Hydroxyapatite Particles, *J. Biomed. Mater. Res.*, **40**, 358-364 (1997)

Lorprayoon, C. "Sintering of Hydroxyapatite Derived from Cattle Bone" in *Proceeding of Internaitonal Union of Material Research Society International Conference* in Asia, 116-120, (1993)

Manley, M. T. " Calcium Phosphate Biomaterials: A Review of the literature," edited by M. T. Manley, in *Hydroxyapatite Coatings in Orthopaedic Sugery*, RavenPress, New York, 1-23 (1993)

Martin, R.B., Burr, D. B. "Structure, Function, and Adaptation of Compact Bone," Raven, New York (1989)

Metin, D., Tihminlioglu, F., Balkose, D., Ulku S. The effect of interfacial interactions on the mechanical properties of polypropylene/natural zeolite composites. *Composites Part A Applied Science and Manufacturin,* **35**, 23-32 (2004)

Park, J.B. "Biomaterials Science and Engineering," Plenum, New York (1984)

Shinzato, S., Nakmura, T., Kokubo, T. and Kitamura, Y. "Bioactive Bone Cement: Effect of Silane Treatment on Mechanical Properties and Osteoconductivity," *J. Biomed. Mater. Res.*, **55**(1), 277-284 (2001)

Sousa, R. A., Reis, R. L., Cunha, A. M. and Bevis, M. J. "Coupling of HDPE/Hydroxyapatite Composites by Silane-based Methodologies," *J. Mater. Sci.: Mater. In Med.*, **14**,475-487 (2003)

Suppakarn, N., Baru, M., Sanmuang, S., Lorprayoon, C. and Ekgasit, S. "*Effect of Filler Content on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-Polypropylene Composite*," **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.242, 2005.

Tanaka, H., Watanabe, T., Chikazawa, M., Kandori, K. and Ishikawa, T. Suraface Structure and properties of Calcium Hydroxyapatite Modified by Hexamethyldisilane," *J. Colloid Interface Sci.,* **206**, 205-211 (1998)

Tanner, K.E., Downes, R.N. and Bonfield, W. "Clinical Application of Hydroxyapatite Reinforced Materials," British Ceramics Trans., **93**, 104-107 (1994)

Tanner, K.E., Suwanprateeb, J., Turner, S. and Bonfield, W. "Influence of Sterilization by Gamma-Irradiation and of Thermal annealing on Creep of Hydroxyapatite Reinforced Polyethylene Composites," *J. Biomed. Mater. Res.*, **39**(1),16-22 (1998)

Theocaris, P.S., Papanicolaou, G.C., Papadopoulos, G.A. "The Effect of Filler Volume fraction on Crack-Propagation Behavior of Particulate Composites," *J. Comp. Mater.*, **15**, 41-54 (1981)

Tsuruta T. (editor in chief), "Biomedical Applications of Polymeric Biomaterials," CRC Press, London. (1993)

Vinard, E., Eloy, R. and Descotes J., Stability of Performances of Vascular Prostheses Retrospective Study of 22 Cases of Human Implanted prostheses," *J. Biomed. Mater. Res.*, **22**, 633-648 (1988)

Wang, M., Ward, I. M., Bonfield, W. "Hydroxyapatite-Polyethylene Composites for Bone Substitution: effect of hydrostatic Extrusion," in *Proc 11th Conf. Composite Materials*, edited by M. Scott, L., Glod Coast, Australia, July 1997, Woodhead Publishing, Cambridge, **1**, 488-95 (1997)

Wang, M., Joseph, R. and Bonfield, W. "Hydroxyapatite-Polyethylene Composites for Bone Substitution : Effects of Ceramics Particle Size and Morphology," *Biomaterials*, **19**, 2357-2366 (1998)

Wang, M., Deb, S., Bonfield, W. "Chemically Coupled Hydroxyapatite-Polyethylene Composites : Processing and Charcterization," *Materials Letters*, **44**, 119-124 (2000)

Wang, M., Laizesky, N.H., Tanner, K.E., Ward, I. M. and Bonfield, W. "Hydrostatically Extruded HAPEX™," *J. Mater. Sci.*, **35**, 1023-1030 (2000)

Weiner, S., Wagner, H.D. "The Material Bone: Structure-mechanical Function Relations," *Ann. Rev. Matter. Sci.*, **28**, 271-298 (1998)

Wongpichedchai, S. "Motility Porous Bovine Hydroxyapatite Buried Orbital-Eye-Ball-Implant," Brussels Eureka 2001,World Exhibition of Innovation Research and New Technology, Belgium (2001)

Yeter-Dal, B.F., Gross, V. and Turney, T.W. "Ceramic Adding the Value, *Proceeding of the International Ceramic Conference*, Australia, v.2 , CSIRO Publications, Melbourne, Australia, 617 (1992)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย): นางสาวนิธินาถ ศุภกาญจน์

   (ภาษาอังกฤษ): Miss Nitinat Suppakarn

2. ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์
   สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

   สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
   111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
   โทรศัพท์ (044) 22-4439 โทรสาร (044) 22-4605
   E-mail: nitinat@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

   2542 Ph.D. (Macromolecular Science and Engineering), Case Western Reserve University, USA
   2538 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พอลิเมอร์),วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
   2536 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

   - Polymer Characterization
   - Polymer Composites

6. ผลงานทางวิชาการ

   1. Y. Ruksakulpiwat, J. Sridee, N. Suppakarn, W. Sutapun, *"Improvement of impact property of natural fiber–polypropylene composite by using natural rubber and EPDM rubber,"* **Composites Part B, 40 (7)**, 619-622, 2009.
   2. N. Suppakarn, K. Jarukumjorn, *"Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content,"* **Composites Part B, 40 (7)**, 613-618, 2009.
   3. K. Jarukumjorn, N. Suppakarn, *"Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber–polypropylene composites,"* **Composites Part B, 40 (7)**, 623-627, 2009.
   4. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, *"Shear-induced crystallization of injection molded vetiver grass-polypropylene composites,"* **J. Appl. Polym. Sci., 113**, 4003-4014, 2009.

5. S. Rimdusit, N. Kampangsaeree, W. Tanthapanichakoon, T. Takeichi, and N. Suppakarn, *"Development of Wood-Substituted Composites from Highly Filled Polybenzoxazine-Phenolic Novolac Alloys,"* **Polym. Eng. Sci., 47**, 140-149, 2007.

6. U. Somnuk, G. Eder, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, W. Sutapun, and Y. Ruksakulpiwat, "*Quiescent Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*", **J. Appl. Polym. Sci., 106**, 2997-3006, 2007.

7. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, W. Thomthong, *"Vetiver - Polypropylene Composites: Physical and Mechanical Properties,"* **Composites Part A, 38**, pp. 590-601, 2007.

8. N. Suppakarn1, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, and W. Sutapun, "*Effect of Surface Modification on Properties of Natural Hydroxyapatite/Polypropylene Composites*," **Key Eng. Mater., 361-363**, 511-514, 2008.

9. N. Suppakarn, K. Jarukumjorn, and S. Tananimit, *"Effect of Flame Retardant on Mechanical Properties and Flammability of Sisal/PP Composites,"* **Adv. Mater. Research, 47-50**, 403-406, 2008.

10. Y. Ruksakulpiwat, J. Sridee, N. Suppakarn, and W. Sutapun, *"Natural Rubber and EPDM Rubber as An Impact Modifier in Vetiver grass-Polypropylene Composites,"* **Adv. Mater. Research, 47-50**, 427-430, 2008.

11. K. Jarukumjorn, N. Suppakarn, and J. Kluengsamrong, *"Mechanical and Morphological Properties of Sisal/Glass Fiber-Polypropylene Composites,"* **Adv. Mater. Research, 47-50**, 486-489, 2008.

12. S. Sanmuang, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun, *"Chicken Eggshell as a Filler for Polymer Composites: Preparation and Characterizations,"* **Adv. Mater. Research, 47-50**, 490-493, 2008.

13. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, P. Phinyocheep and Y. Ruksakulpiwat, **"***Effect of processing conditions on crystallization of vetiver grass-polypropylene composites*," **The 4th East Asian Polymer Conference**, China, May 28-31, pp.168-170, 2006.

14. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun,C. Lorprayoon, and S. Ekgasit, "*Mechanical Properties of Natural Hydroxyapatite/PP Composites*" **Annual Technical Conference 2006**, the Society of Plastics Engineers, Charlotte, North Carolina USA, p. 325, 2006.

15. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, J. Kleungsumrong, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun, "*Shear-Induced Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*," **Annual**

Technical Conference 2006, the Society of Plastics Engineers, Charlotte, North Carolina USA, p. 1225, 2006.

16. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun and Y. Ruksakulpiwat, "*Injection Molding of Vetiver Grass-Polypropylene Composites: Effect of Particle Sizes on Rheological, Thermal, and Mechanical Properties,*" **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**, Rotorua, New Zealand, P8, 2006.
17. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, P. Phinyocheep, N. Suppakarn and W. Sutapun, "*Effect of Particle Sizes of Vetiver Grass on Shear-Induced Crystallization of Injection Molded Vetiver Grass-Polypropylene Composites,*" **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**, Rotorua, New Zealand, P9, 2006.
18. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon and S. Ekgasit, "*Effect of Water Absorption and Silane coupling agent on Tensile Properties of Hydroxyapatite/PP Composites,*" **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**, Rotorua, New Zealand, P27, 2006.
19. Y. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, U. Somnuk, W. Sutapun, and N. Suppakarn, *"Comparison of Rheology Properties and Mechanical Properties of Polypropylene Composites from Various Types of Natural Fibers,"* **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p. 221, 2005.
20. U. Somnuk, W. Sutapun, and N. Suppakarn, P. Phinyocheep, and Y. Ruksakulpiwat, *"Effect of Processing Conditions on Shear-induced Crystallization of Vetiver Grass-Polypropylene Composites,"* **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.221, 2005.
21. Y. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, W. Sutapun, and N. Suppakarn, "*Injection Molding of Rossells-Polypropylene Composites: Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties,*" **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.227, 2005.
22. N. Suppakarn, W. Sutapun, S. Kiaw-on, and W. Tonukoon, "*Effect of Fiber Content and Fiber Treatment on Mechanical Properties of Rossells Fiber-Epoxy Composite,*" **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.237, 2005.
23. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong, "*Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated and Silane-Treated Rossell Fibers*", **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.241, 2005

24. N. Suppakarn, M. Baru, S. Sanmuang, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit, "*Effect of Filler Content on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-Polypropylene Composite*," **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.242, 2005.

25. N. Suppakarn, J. Rittita, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and C. Lorprayoon, *"Effect of Filler Particle size on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-PolyPropylene Composite*," **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.242, 2005.

26. Y. Ruksakulpiwat, W. Thomthong, A. Thitichaisri, W. Sutapun, and N. Suppakarn, *"Natural Rubber: an Impact Modifier for Vetiver Grass-Polypropylene Composites*," **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**, Nakhon Ratchasima, Thailand, p. 243, 2005.

27. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, กษมา จารุกำจร, จันทิมา ดีประเสริฐกุล, นิธินาถ ศุภกาญจน์, ปราณี ชุมสำโรง, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, *เส้นใยธรรมชาติ...ทางเลือกใหม่สำหรับโพลิเมอร์เชิงประกอบ*, **วิศวกรรมสาร**, **57** (683), p.44, 2547.

28. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun and W. Thomthong, "*The Study of Using Vetiver Grass as a Filler in Polypropylene Composites,*" **Annual Technical Conference 2004**, the Society of Plastics Engineers, Chicago, USA, p.1641, 2004.

29. N. Kampangsaree, N. Suppakarn, and S. Rimdusit, "*Development of Fire Resistant Wood-Substituted Composites from Polybenzoxazine Alloys*," **The 3rd Thailand Materials Science and Technology Conference**, Bangkok,Thailand, p.161, 2004.

30. W. Thuamthong, Y.Ruksakulpiwat, N. Suppakan, and W. Sutapan, "*Effect of Vetiver Contents and Vetiver Lengths on Mechanical and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites*," **The 3rd Thailand Materials Science and Technology Conference**, Bangkok, Thailand, p.167, 2004.

31. U. Somnuk, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn and W. Sutapun, "*Characterization of Chemical Treated Vetiver Grass,*" **The 3rd Thailand Materials Science and Technology Conference**, Bangkok, Thailand, p. 420, 2004.

32. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong, *"Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated Jute Fibers by Boiling and Soxhlet extraction*," **The 30th Congress on Science and Technology of Thailand**, Bangkok, Thailand, p. 175, 2004.

33. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutaphan, and N. Suppakarn, "*Thermal, Rheological, Mechanical, and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites*," **The 8th**

Pacific Polymer Conference (PPC8), the Pacific Polymer Federation (PPF), Bangkok, Thailand, p.118, 2003.

34. การศึกษาเบื้องต้นของการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารตัวเติมเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย *รายงานการวิจัย* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2546
35. N. Suppakarn, H. Ishida, and J.D. Cawley, "*Roles of Poly(propylene glycol) During Solvent-based Lamination of Ceramic Green Tape*," **J. Am. Ceram. Soc., 84(2)**, pp. 289-296, 2001.
36. N. Suppakarn, Z. Liu, and J.D. Cawley, "*Polymer Assisted Lamination of Ceramic Green Tape*," **The First Thailand Materials Science and Technology Proceedings**, MTEC, Thailand, p. 364, 2000.
37. Z. Liu, N. Suppakarn, and J.D. Cawley, "*Coated Feedstock for Fabrication of Ceramic Parts by CAM-LEM*," **Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings**, Edited by D. Bourell, J. J. Beaman, R. Crawford, H. L. Marcus, and J. W. Barlow, University of Texas, Austin, TX, pp. 393-401, 1999.

7. **รางวัลที่ได้รับ**

- Certificates of Excellence for the King of Thailand Vetiver Awards 2006/ An investigation of using vetiver grass in polypropylene composites (รางวัลด้านงานวิจัยหญ้าแฝกดีเด่นประเภทผลงานนอกภาคเกษตรกรรมจากมูลนิธิชัยพัฒนา ปี 2549)

<u>ผู้ร่วมวิจัย</u>

1. **ชื่อ (ภาษาไทย):** <u>ผู้ช่วยศาสตราจารย์</u> วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์
(ภาษาอังกฤษ): <u>Asistant Profeesor</u> Wimonlak Sutapun
2. **ตำแหน่งปัจจุบัน:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. **หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร**
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4435 โทรสาร (044) 22-4605
E-mail: <u>wimonlak@sut.ac.th</u>
4. **ประวัติการศึกษา**

2542 Ph.D. (Macromolecular Science and Engineering), Case Western Reserve University, USA
2535 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2532 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- Composite Interface/Interphase
- Spectroscopy of Polymers

6. ผลงานทางวิชาการ

1. Y. Ruksakulpiwat, J. Sridee, N. Suppakarn, W. Sutapun, *"Improvement of impact property of natural fiber–polypropylene composite by using natural rubber and EPDM rubber,"* **Composites Part B, 40 (7)**, 619-622, 2009.
2. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, *"Shear-induced crystallization of injection molded vetiver grass-polypropylene composites,"* **J. Appl. Polym. Sci.,** 113, 4003-4014, 2009.
3. Y. Ruksakulpiwat, G. Eder, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, W. Sutapun, and U. Somnuk, "*Quiescent Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*", **J. Appl. Polym. Sci.,** 106(2007), 2997-3006.
4. W. Sutapun, P. Rossapol, S. Kiaw-on, and D. Kittilertkul, "*Silkworm Fiber for Reinforcing Epoxy Composite*" **The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers**, Bangkok, Thailand, BC-P22, 2007.
5. K. Jarukumjorn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, and J. Kluengsamrong, "*Effect of Sinlane Coupling Agent and Compatibilizer on Properties of Rossells Fiber/PP Composites*" **The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers**, Bangkok, Thailand, BC-P16, 2007.
6. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, W. Thomthong. *Vetiver - Polypropylene Composites: Physical and Mechanical Properties*. **Composites Part A**. 38 (2007), 590-601.
7. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, P. Phinyocheep and Y. Ruksakulpiwat. "*Effect of processing conditions on crystallization of vetiver grass-polypropylene composites*". **The 4th East Asian Polymer Conference**. China. pp.168-170. 2006.
8. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. "*Mechanical Properties of Natural Hydroxyapatite/PP Composites*" **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 325. 2006.
9. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, J. Kleungsumrong, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Shear-Induced Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 1225. 2006.

10. K. Jarukumjorn, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and J. Kluengsamrong. *Compatibilization of Natural Fibers/PP Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 330. 2006.

11. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, and Y. Ruksakulpiwat. *Injection Molding of Vetiver Grass-Polypropylene Composites: Effect of Particle Sizes on Rheological. Thermal. and Mechanical Properties.* **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 8. 2006.

12. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Effect of Particle Sizes of Vetiver Grass on Shear-Induced Crystallization of Injection Molded Vetiver Grass-Polypropylene Composites*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 9. 2006.

13. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. *Effect of Water Absorption and Silane coupling agent on Tensile Properties of Hydroxyapatite/PP Composites*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 27. 2006.

14. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. *Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated and Silane-Treated Rossell Fibers*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 241. 2005

15. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, U. Somnuk, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Comparison of Rheology Properties and Mechanical Properties of Polypropylene Composites from Various Types of Natural Fibers*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 221. 2005.

16. U. Somnuk, W. Sutapun, N. Suppakarn, P. Phinyocheep, and Y. Ruksakulpiwat. *Effect of Processing Conditions on Shear-induced Crystallization of Vetiver Grass-Polypropylene /Composites*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 221. 2005.

17. K. Jarukumjorn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, and J. Kluengsamrong. *Short Rossells Fiber/Polypropylene Composites: Effect of Compatibilizer on Mechanical and Rheological Properties. and Heat Distortion Temperature*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 227. 2005.

18. Y. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Injection Molding of Rossells-Polypropylene Composites: Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties.*

The 31st Congress on Science and Technology of Thailand. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 227. 2005.

19. P. Chumsamrong, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Influence of Alkali-Treated Rossells Fibers on The Tensile Properties of Unsaturated Polyester*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 234. 2005.
20. N. Suppakarn, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Effect of Fiber Content and Fiber Treatment on Mechanical Properties of Rossells Fiber-Epoxy Composite*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 237. 2005.
21. N. Suppakarn, J. Rittita, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and C. Lorprayoon. *Effect of Filler Particle size on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-Polypropylene Composite*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 242. 2005.
22. Y. Ruksakulpiwat, W. Thomthong, A. Thitichaisri, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Natural Rubber: an Impact Modifier for Vetiver Grass-Polypropylene Composites*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 243. 2005.
23. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, กษมา จารุกำจร, จันทิมา ดีประเสริฐกุล, นิธินาถ ศุภกาญจน์, ปราณี ชุมสำโรง วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. *"เส้นใยธรรมชาติ...ทางเลือกใหม่สำหรับพอลิเมอร์เชิงประกอบ"*. **วิศวกรรมสาร**. 57. 44. 2547.
24. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. *"Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated Jute Fibers by Boiling and Soxhlet Extraction"*. **The 30th Congress on Science and Technology of Thailand**. Bangkok. Thailand. p. 175. 2004
25. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, and W. Thomthong. *"The Study of Using Vetiver Grass as a Filler in Polypropylene Composites"*. **Annual Technical Conference 2004**. The Society of Plastics Engineers. Chicago. Illinois. USA. p. 1641. 2004.
26. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *"Effect of Vetiver Contents and Vetiver Lengths on Mechanical and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites"*. **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 167. 2004.
27. U. Somnuk, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *"Characterization of Chemical Treated Vetiver Grass"*. **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 420. 2004.

28. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *"Thermal. Rheological. Mechanical. and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites"* **The 8th Pacific Polymer Conference (PPC8)**. Bangkok. Thailand. p. 118. 2003

29. W. Noobut and J. L. Koenig. *Interfacial Behavior of Epoxy/E-glass Fiber Composites under Wet-Dry Cycles by FTIR Microspectroscopy*. **Polym. Compos.**, 20 (1999), 38.

7. รางวัลที่ได้รับ

- Certificates of Excellence for the King of Thailand Vetiver Awards 2006/ An investigation of using vetiver grass in polypropylene composites (รางวัลด้านงานวิจัยหญ้าแฝกดีเด่นประเภทผลงานนอกภาคเกษตรกรรมจากมูลนิธิชัยพัฒนา ปี 2549)

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย): ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์

(ภาษาอังกฤษ): Assistant Professor Yupaporn Ruksakulpiwat

2. ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4433 โทรสาร (044) 22-4605
E-mail: yupa@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

2542 Ph.D.(Polymer Engineering), The University of Akron, USA
2537 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) วัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- Polymer Processing and Characterization
- Polymer Crystallization and Morphology

6. ผลงานทางวิชาการ

1. Y. Ruksakulpiwat, J. Sridee, N. Suppakarn, W. Sutapun, *"Improvement of impact property of natural fiber–polypropylene composite by using natural rubber and EPDM rubber,"* **Composites Part B, 40** (7), 619-622, 2009.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, *"Shear-induced crystallization of injection molded vetiver grass-polypropylene composites,"* **J. Appl. Polym. Sci.,** 113, 4003-4014, 2009,

3. Y. Ruksakulpiwat, G. Eder, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, W. Sutapun, and U. Somnuk, "*Quiescent Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*", **J. Appl. Polym. Sci., 106**(2007), 2997-3006.

4. K. Jarukumjorn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, and J. Kluengsamrong, "*Effect of Sinlane Coupling Agent and Compatibilizer on Properties of Rossells Fiber/PP Composites*" **The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers**, Bangkok, Thailand, BC-P16, 2007.

5. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, W. Thomthong. *Vetiver - Polypropylene Composites: Physical and Mechanical Properties*. **Composites Part A**. 38 (2007), 590-601,

6. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, P. Phinyocheep and Y. Ruksakulpiwat. "*Effect of processing conditions on crystallization of vetiver grass-polypropylene composites*". **The 4th East Asian Polymer Conference**. China. pp.168-170. 2006.

7. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. "*Mechanical Properties of Natural Hydroxyapatite/PP Composites*" **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 325. 2006.

8. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, J. Kleungsumrong, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Shear-Induced Crystallization of Natural Fiber-Polypropylene Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 1225. 2006.

9. K. Jarukumjorn, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and J. Kluengsamrong. *Compatibilization of Natural Fibers/PP Composites*. **Annual Technical Conference 2006**. The Society of Plastics Engineers. Charlotte. North Carolina USA. p. 330. 2006.

10. U. Somnuk, N. Suppakarn, W. Sutapun, and Y. Ruksakulpiwat. *Injection Molding of Vetiver Grass-Polypropylene Composites: Effect of Particle Sizes on Rheological. Thermal. and Mechanical Properties.* **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 8. 2006.

11. Y. Ruksakulpiwat, U. Somnuk, P. Phinyocheep, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *Effect of Particle Sizes of Vetiver Grass on Shear-Induced Crystallization of Injection Molded Vetiver*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Grass-Polypropylene Composites. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 9. 2006.

12. N. Suppakarn, S. Sanmaung, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, C. Lorprayoon, and S. Ekgasit. *Effect of Water Absorption and Silane coupling agent on Tensile Properties of Hydroxyapatite/PP Composites*. **The 28th Australasian Polymer Symposium (APS2006)**. Rotorua. New Zealand. p. 27. 2006.
13. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. *Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated and Silane-Treated Rossell Fibers*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 241. 2005
14. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, U. Somnuk, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Comparison of Rheology Properties and Mechanical Properties of Polypropylene Composites from Various Types of Natural Fibers*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 221. 2005.
15. U. Somnuk, W. Sutapun, N. Suppakarn, P. Phinyocheep, and Y. Ruksakulpiwat. *Effect of Processing Conditions on Shear-induced Crystallization of Vetiver Grass-Polypropylene /Composites*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 221. 2005.
16. K. Jarukumjorn, W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, and J. Kluengsamrong. *Short Rossells Fiber/Polypropylene Composites: Effect of Compatibilizer on Mechanical and Rheological Properties. and Heat Distortion Temperature*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 227. 2005.
17. Y. Ruksakulpiwat, J. Kluengsamrong, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Injection Molding of Rossells-Polypropylene Composites: Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 227. 2005.
18. P. Chumsamrong, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Influence of Alkali-Treated Rossells Fibers on The Tensile Properties of Unsaturated Polyester*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 234. 2005.
19. N. Suppakarn, W. Sutapun, Suriya Kiaw-on, and W. Tonukoon. *Effect of Fiber Content and Fiber Treatment on Mechanical Properties of Rossells Fiber-Epoxy Composite*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 237. 2005.

20. N. Suppakarn, J. Rittita, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and C. Lorprayoon. *Effect of Filler Particle size on Mechanical Properties of Cattle Bone Based Hydroxyapatite-Polypropylene Composite*, **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 242. 2005.

21. Y. Ruksakulpiwat, W. Thomthong, A. Thitichaisri, W. Sutapun, and N. Suppakarn. *Natural Rubber: an Impact Modifier for Vetiver Grass-Polypropylene Composites*. **The 31st Congress on Science and Technology of Thailand**. Nakhon Ratchasima. Thailand. p. 243. 2005.

22. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, กษมา จารุกำจร, จันทิมา ดีประเสริฐกุล, นิธินาถ ศุภกาญจน์, ปราณี ชุมสำโรง, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. *"เส้นใยธรรมชาติ...ทางเลือกใหม่สำหรับพอลิเมอร์เชิงประกอบ"* **วิศวกรรมสาร**. 57. 44. 2547.

23. W. Sutapun, Y. Ruksakulpiwat, K. Jarukumjorn, N. Supakarn, P. Chumsamrong, and J. Kluengsamrong. "*Studies of Thermal Properties and Surface Characteristics of Pretreated Jute Fibers by Bouing and Soxhlet Extraction*". **The 30th Congress on Science and Technology of Thailand**. Bangkok. Thailand. p. 175. 2004

24. Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, W. Sutapun, and W. Thomthong. "*The Study of Using Vetiver Grass as a Filler in Polypropylene Composites*". **Annual Technical Conference 2004**. The Society of Plastics Engineers. Chicago. Illinois. USA. p. 1641. 2004.

25. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *"Effect of Vetiver Contents and Vetiver Lengths on Mechanical and Morphological Properties of Vetiver-Polypropylene Composites"*. **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 167. 2004.

26. U. Somnuk, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun. *"Characterization of Chemical Treated Vetiver Grass"*. **The Third Thailand Materials Science and Technology Conference**. Bangkok. Thailand. p. 420. 2004.

27. W. Thuamthong, Y. Ruksakulpiwat, W. Sutapun, and N. Suppakarn, *The 8th Pacific Polymer Conference (PPC8)*, Bangkok, Thailand, 118, 2003.

28. Y. Ruksakulpiwat and C. Ruksakulpiwat , *The 8th Pacific Polymer Conference (PPC8)*, Bangkok, Thailand, 134, 2003.

29. Y. Ruksakulpiwat and A.I. Isayev, *Proceedings of the First Thailand Materials Science and Technology Conference*, Thailand, 116, 2000.

30. Y. Churdpunt and A.I. Isayev, "Crystallization Kinetic and Growth Rate Behaviour of Ziegler-Natta and Metallocene Based Isotactic Polypropylenes", *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, (submitted).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

31. Y. Ruksakulpiwat, "Comparative Study of Structure and Property of Ziegler-Natta and Metallocene Based Linear Low Density Polyethylene in Injection Moldings", *SPE Tech. Papers*, 582, 2001.

32. Y. Churdpunt and A.I. Isayev, "Comparison of Birefringence and Mechanical Properties of Injection Molded Metallocene and Ziegler-Natta Based Isotactic Polypropylenes", *J. Polym. Eng.*, **20**, 76, 2000.

33. A.I. Isayev, Y. Churdpunt, and X.Guo, "Comparative Study of Ziegler-Natta and Metallocene Based Isotactic Polypropylenes in Injection Molding", *Intern. Polym. Process.*, **15**, 72, 2000.

34. Y. Ruksakulpiwat and A.I. Isayev, " Shear-Induced Crystallization in Injection Moldings of Ziegler-Natta and Metallocene Based Isotactic Polypropylenes", *SPE Tech. Papers*, 486, 2000.

35. Y. Churdpunt and A.I. Isayev, "Crystallization and Microstructure of Ziegler-Natta and Metallocene Based Isotactic Polypropylenes: Simulation and Experiment", *SPE Tech. Papers*, 2527, 1999.

36. A.I. Isayev, Y. Churdpunt and X. Guo, *Proceeding of the 15th PPS Meeting*, Netherlands, paper no. 289, 1999.

37. Y. Churdpunt and A.I. Isayev, *Metallocene Technology and Modern Catalytic Methods in Commercial Applications*, Edited by George M. Benedikt and B. L. Goodall, ChemTec Publishing, Ontario, 1999.

7. รางวัลที่ได้รับ

- Certificates of Excellence for the King of Thailand Vetiver Awards 2006/ An investigation of using vetiver grass in polypropylene composites (รางวัลด้านงานวิจัยหญ้าแฝกดีเด่นประเภทผลงานนอกภาคเกษตรกรรมจากมูลนิธิชัยพัฒนา ปี 2549)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี