

อิทธิพลของสารคู่ควบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล

Effect of Coupling Agent on Mechanical Properties of Recycled Polypropylene and Recycled High Density Polyethylene Blend

อนุชิต คงฤทธิ์¹ กนกวรรณ แซ่มพุดชา² รัชนก แป้นโพธิ์กลาง² พงษ์ศักดิ์ รุณกระโทก²
จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร^{3*}

¹โปรแกรมวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³หน่วยวิจัยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และการอบชุบความร้อนโลหะ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เมือง นครราชสีมา 30000

*Corresponding author: E-mail: jittiwat.ni@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (r-PP) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (r-HDPE) โดยใช้ไวนิลไตรเมทอซซิลีน (VTMS) เป็นสารคู่ควบ โดยทำการศึกษาสองปัจจัยได้แก่ สัดส่วนการผสมพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล โดยมีทั้งสิ้น 5 สัดส่วนคือ 0:100, 20:80, 50:50, 80:20 และ 100:0 และปริมาณสารคู่ควบไซเลน 4 ระดับคือ 0, 1, 3 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยเครื่องอัดรีดสกรูคู่และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบโดยวิธีการกดอัดร้อน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกลและศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ผลการศึกษาทำให้ทราบว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีค่าความแข็ง ค่าความทนต่อแรงดึง ความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล แต่ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นน้อยกว่า สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน จากการวิเคราะห์พบว่าสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมคือ 80:20 และปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมคือ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคู่ควบไซเลนมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนต่างๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมาก แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนส่งผลให้เกิดความแตกต่างของพื้นฐานวิทยาที่สัมพันธ์กับสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบ

คำสำคัญ: สารคู่ควบ, พอลิเมอร์ผสม, สมบัติทางกล

ABSTRACT

This research aims to improve mechanical properties of recycled polypropylene (r-PP) and recycled high density polyethylene (r-HDPE) blends. Vinyltrimethoxy silane was used as a coupling

agent. In this research, two factors including blend fractions between r-PP and r-HDPE (0:100, 20:80, 50:50, 80:20 and 100:0) and Vinyltrimethoxy silane contents (0, 1, 3 and 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน) were studied. Polymer blends were prepared by twin screw extruder and ASTM specimens were prepared by hot compression molding. Then, mechanical properties and physical properties were evaluated. The result found that, both of two factors effected to mechanical properties and physical properties and significant by statistical analyses. Recycled polypropylene has higher values of hardness, tensile strength and เมกะปาสกาลต strength than recycled high density polyethylene. However, Young's Modulus of r-PP lower than r-HDPE. Mechanical properties of polymer blends improve with increased silane coupling content. Optimum blends fraction and Silane coupling agent were 80:20 (80% r-PP:20% r-HDPE) and 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน respectively. Mechanical properties of polymer blends with silane coupling agent were superior than Recycled polypropylene and recycled high density polyethylene Morphology investigation of polymer blends in various fraction, found that similar fracture surface on polymer blends. However, adding Silane coupling agent effected to morphology and related to mechanical properties.

Keyword: Coupling agent, Polymer blends, Mechanical properties

1. บทนำ

พอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์หลายชนิดจึงมีสมบัติที่หลากหลายและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง มีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เหมาะต่อการนำไปผลิตเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์ หรืออุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน ส่งผลให้อัตราการผลิตและใช้ประโยชน์วัสดุประเภทนี้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันก็คือ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เนื่องจากสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายตามความต้องการ

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์ที่ทนต่อการหักงอได้ปานกลาง ทนต่อสารเคมี โปร่งแสง ป้องกันการผ่านของความชื้นได้สูง ป้องกันการผ่านของอากาศได้ดี ยอมให้แสงผ่านได้ดี หากนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร สามารถมองเห็นอาหารที่บรรจุอยู่ภายในได้ ทนความร้อนได้สูงกว่าถึง 149 องศาเซลเซียส รับแรงดึงได้ถึง 100,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และมีความเหนียวสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งแรงเหนียว ใช้ในกระบวนการผลิตเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) โดยใช้ทำเป็นขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ ที่ต้องทนต่อแรงดัน และต้องมีแรงต้านทานสูง นอกจากนี้ยังใช้สร้างเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) เช่น ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อ และรางน้ำ ทั้งนี้ ท่อที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสามารถใช้แทนท่อที่ทำจากพีวีซีได้เนื่องจากมีความทนทานใกล้เคียงกัน แต่มีราคาถูกกว่า

จากที่กล่าวมาข้างต้นพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้วจึงกลายเป็นขยะทำให้เกิดของเสีย (Waste) อีกทั้งพอลิเมอร์เหล่านี้มีการสลายตัวช้าจึงสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม วิธีการกำจัดขยะพอลิเมอร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปฝังกลบ (Landfill) การนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง (Incineration) และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ซึ่งทางเลือกหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมคือการนำขยะพอลิเมอร์เหล่านั้นมาหลอม และผลิตเป็นเม็ดพอลิเมอร์รีไซเคิล แต่เนื่องด้วยเม็ดรีไซเคิลเหล่านี้มีสมบัติทางกลที่ด้อยกว่า

เม็ดใหม่ จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวิธีการปรับปรุงสมบัติทางกลให้สูงขึ้น หรือเทียบเคียงเพื่อให้เหมาะแก่การนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันมีการพัฒนาด้านสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ทำได้ตั้งแต่การสังเคราะห์ใหม่ การใส่สารเติมแต่ง ตลอดจนการนำพอลิเมอร์หลายชนิดมาผสมรวมกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งเป็นการเพิ่มพูนสมบัติโดยการนำจุดเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาใช้ ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

Tanoue และคณะ (2012) [1] ทำการวิจัยกระบวนการหลอมละลายของพอลิโพรพิลีน/ท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ ทดสอบสมบัติทางกล ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการนำความร้อน พบว่าการกระจายตัวของคาร์บอนทำได้เป็นอย่างดี

JIAQI GU, HAIYAN XU และ CHIFEI WU [2] ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารเปอร์ออกไซด์เพื่อเชื่อมขวางสายโซ่ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และการผสมกับพอลิโพรพิลีน โดยการทำให้ปฏิกิริยาในเครื่องอัดรีด เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารเปอร์ออกไซด์ (DCP) และพอลิโพรพิลีน (PP) ที่ส่งผลต่อสมบัติ ของพอลิเมอร์ผสม การเพิ่มปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์ทำให้อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมลดลง และทำให้สมบัติความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

K. Anuchit และ M. Utai (2011) [3] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนด้วยการสร้างเป็นวัสดุเชิงประกอบจากการเติมผงไม้และใช้เทคนิคการเชื่อมขวางสายโซ่ และผลการศึกษาพบว่า การเติมผงไม้และการใช้เทคนิคการเชื่อมขวางสายโซ่ทำให้ความต้านทานต่อการดึงและความทนต่อแรงกระแทกสูงขึ้น

M. Beltran และ C. Mijangos (2000) [4] ทำการศึกษากากราฟท์สายโซ่และการเชื่อมขวางในน้ำร้อนของ พอลิโพรพิลีน โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาและ เชื่อมใช้สารไซเลนเป็นตัวเชื่อมขวางในปริมาณที่แตกต่างกัน และเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน โดยทำการศึกษาสมบัติทางกล ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนที่สูงกว่า 4 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ทำให้ความหนืดของพอลิ

โพรพิลีนหลอมสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลที่ดีขึ้นด้วย ค่าความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้น

Yanjie An และคณะ (2008) [5] ได้ศึกษาปรับปรุงสมบัติการนำไปใช้ของพอลิโพรพิลีนโดยการสร้างเป็นพอลิโพรพิลีนที่มีความหนืดขณะหลอมละลายสูง (High melt strength polypropylene, HMSPP) โดยใช้เทคนิคการกราฟท์และเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์โดยใช้สารคู่ควบไซเลน ผลการศึกษาโดยเทคนิค FTIR ทำให้ทราบถึงปฏิกิริยาของการกราฟท์ระหว่างสายโซ่พอลิโพรพิลีนกับสารคู่ควบไซเลน ทำการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของ HMSPP ผลที่ได้ทำให้ทราบว่าปริมาณการกราฟท์ของสารคู่ควบไซเลนที่สูงขึ้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อค่าความหนืดขณะหลอมละลายจะสูงขึ้นตามไปด้วย

Kalyanee Sirisinha และ Keskanok Kawko (2005) [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมขวางโครงสร้างร่างแหโดยสารคู่ควบไซเลนของพอลิโพรพิลีนที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม การเพิ่มปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาทำให้สายโซ่ของพอลิโพรพิลีนถูกตัดออก เป็นผลทำให้ความหนืดลดลง และการเชื่อมขวางสายโซ่โดยสารคู่ควบไซเลนทำให้สมบัติทางกลคือ ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้น

Kalyanee Sirisinha และ Keskanok Kawko (2005) [7] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกราฟท์ด้วยไซเลนและเชื่อมขวางสายโซ่ด้วยน้ำของพอลิโพรพิลีน โดยมุ่งเน้นการศึกษาสมบัติของการกราฟท์และการเชื่อมโยงสายโซ่ของผลิตภัณฑ์ ใช้การกราฟท์โดยการหลอม ด้วยการใส่สารคู่ควบไซเลนและไดคลอไรด์เปอร์ออกไซด์ อิทธิพลจากการเชื่อมขวางสายโซ่ต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน พบว่าโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมขวางสายโซ่สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น, ความต้านทานแรงดึง

อนุชิต คงฤทธิ์ และ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร (2558) [8] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยเทคนิคการเชื่อมขวางสายโซ่ด้วยสารคู่ควบไซเลนและไอน้ำ จากผลการศึกษาพบว่า การเติมปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการอบไอน้ำที่มากขึ้นทำให้เกิด

โครงสร้างร่างแหที่มากขึ้น ทำให้สมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงและความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

จุฑามาศ ไชยวงศ์ และคณะ (2556) [9] ได้ทำการศึกษาการไฟโรไลซิสของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (r-PP) และพอลิเอทิลีน (r-PE) เป็นการทดสอบความเหนียว ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR ผลการศึกษาพบว่ากรไฟโรไลซิสเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลผสมระหว่างชนิด r-PP และ r-PE พบว่าควาไฟโรไลซิสที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเม็ดพลาสติก r-PE ต่ำกว่าร้อยละ 25 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นหลัก และพบว่าพลาสติกกรีไซเคิลที่นำมาศึกษานี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการไฟโรไลซิสได้ แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาในลักษณะของการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของ r-PP และ r-PE

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้เป็นมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกรีไซเคิล (r-PP) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกรีไซเคิล (r-HDPE) โดยการนำมาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ และใช้ไวไนลไตรเมทอออกซีไซเลน (VTMS) เป็นสารคู่ควบ เพื่อศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยมีเป้าหมายเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะ r-PP/r-HDPE ในภาคอุตสาหกรรมการผลิต ตลอดจนการพัฒนาด้านการวิจัยที่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ทำการวิจัย

1. พอลิโพรพิลีนกรีไซเคิล (r-PP) ที่มีค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 39.53 กรัม/10 นาที และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกรีไซเคิล (r-HDPE) ที่มีค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 4.8 กรัม/10 นาที จากบริษัทโคราชทีอาร์ซีพลาสติกจำกัด

2. สารคู่ควบปฏิกิริยาไซเลนชนิดไวไนลไตรเมทอออกซีไซเลน (Vinyl trimethoxy silane; VTMS) A-171 จากบริษัท ออฟติมอลเทค จำกัด

3. สารริเริ่มปฏิกิริยาไดคิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl Peroxide; DCP) จากบริษัท ออฟติมอลเทค จำกัด

2.2 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมในงานวิจัยนี้เริ่มจากการผสม r-PP กับ r-HDPE ที่สัดส่วน 0:100, 20:80, 50:50, 80:20 และ 100:0 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาไดคิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ปริมาณ 0.1 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ และเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น (ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 50) ทำการผสมตามสูตรต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) ที่มีค่า L/D=40 ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ซึ่งได้อัตราการผลิตอยู่ที่ 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อุณหภูมิในการผสมจากส่วนป้อน (feed zone) จนถึงส่วนหลอม (metering zone) คือ 180-200 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปขึ้นรูปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding) รุ่น PR2D-W30L350 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส แรงดัน 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.3 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์

2.3.1 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LS 100 plus ขนาดแรง 10 กิโลนิวตัน ของบริษัท LLOYD ในการทดสอบจะใช้อัตราเร็วในการดึง (Cross Head Speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยการทดสอบใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact testing) โดยใช้แรงกระทำ 2.7 กิโลจูล ที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore D) ตามมาตรฐาน

ASTMD2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ
ยี่ห้อ TECLOK รุ่น GS-702G Type D

2.3.2 สมบัติเชิงกายภาพ

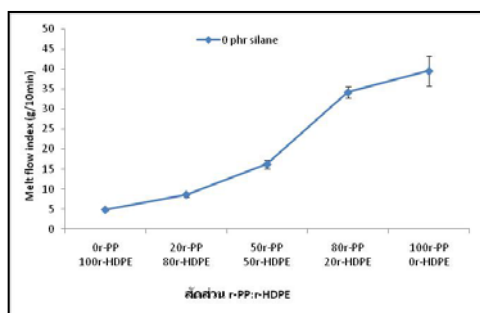
การศึกษาสมบัติการหลอมไหลของพอลิเมอร์
โดยการวัดค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ตาม
มาตรฐาน ASTM D1238 ที่อุณหภูมิ 190 องศา
เซลเซียส น้ำหนักกด 10 กิโลกรัม

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์
ผสมจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก โดยใช้
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning
Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น
TM3030

3. ผลการทดลอง

3.1 ค่าดัชนีการหลอมไหล

จากรูปที่ 1 แสดงค่าดัชนีการหลอมไหล
(MFI) ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคู่ควบไซเลนที่ 0
ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน พบว่า r-HDPE 100% มีค่าเป็น
4.8 กรัม/10 นาที และมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง
เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสม r-PP ค่าดัชนีการหลอมไหล
สูงสุดคือสูตร r-PP 100% มีค่าเท่ากับ 39.53 กรัม/10
นาที



รูปที่ 1 ค่าดัชนีการหลอมไหลของ r-PP:r-HDPE
ที่ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน 0 ส่วนต่อหนึ่ง
ร้อยส่วน

3.2 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

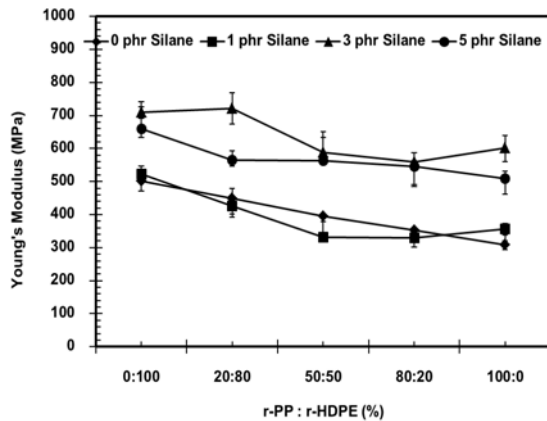
จากผลการทดสอบพบว่าค่ามอดูลัสความ
ยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของพอลิเมอร์ผสมทุก
สัดส่วนที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลนมีค่าต่ำที่สุด แต่มี

แนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนที่
ปริมาณ 3 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน การเติมสารคู่ควบ
ไซเลนที่มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถ
ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น
สูงขึ้นแต่จะลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบ
เป็น 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน

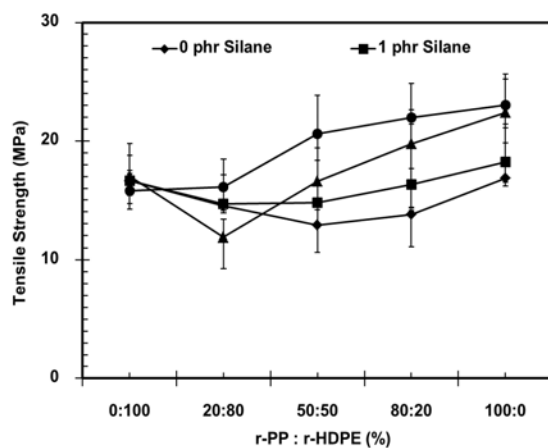
ผลการทดสอบพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น
ของ r-HDPE มีค่าสูงกว่า r-PP ดังนั้นผลที่ได้จากการ
ทดสอบมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสม
r-PP สูตรที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุดคือพอลิ
เมอร์ผสม r-PP:r-HDPE สัดส่วน 20:80 ที่เติมสารคู่
ควบ 3 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน มีค่าเท่ากับ 730.49 เมกะ
ปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 ค่าความต้านทานแรงดึง

ผลการทดสอบจากรูปที่ 3 พบว่ามีค่าความ
ต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของ r-PP:
r-HDPE สัดส่วน 0:100 และ 20:80 ที่เติมสารคู่ควบไซ
เลนปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ไม่
แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้ค่าความต้านทานแรงดึงมี
ความสัมพันธ์กับการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent
Deformation) ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของ
โครงสร้างหลัก (Matrix) โดยที่โครงสร้างหลักของพอลิ
เมอร์ผสมคือ 0:100 (r-HDPE) การเติมสารคู่ควบ
ไซเลนที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น
โดยพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 50:50, 80:20 และ 100:0 ที่
เติมสารคู่ควบ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน มีค่าความ
ต้านทานแรงดึงเป็น 20.57 เมกะปาสคาล 21.98
เมกะปาสคาลและ 23.02 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 2 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ r-PP:r-HDPE ที่ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน 0 ถึง 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ

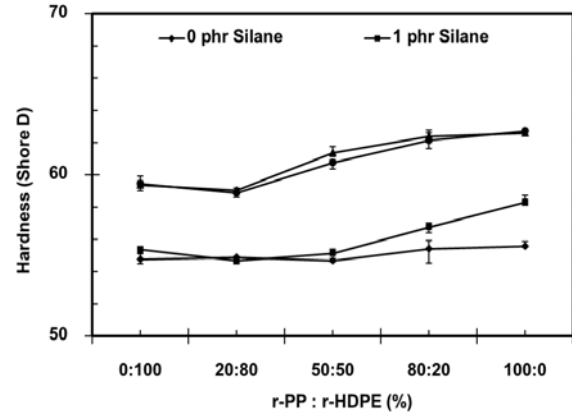


รูปที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดึงของ r-PP:r-HDPE ที่ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน 0 ถึง 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ

3.4 ค่าความแข็ง

จากรูปที่ 4 ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของพอลิเมอร์ผสม (r-PP:r-HDPE) สัดส่วนการผสม 50:50, 80:20 และ 100:0 ที่เติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณ 1, 3 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ พบว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยผลการทดสอบที่ได้สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่เติม และเติมสารคู่ควบไซเลน 1 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ ซึ่งมีค่าความแข็ง 54.5 ถึง 57.5 ชอร์ ดี ตามลำดับ และเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลน 3 และ 5

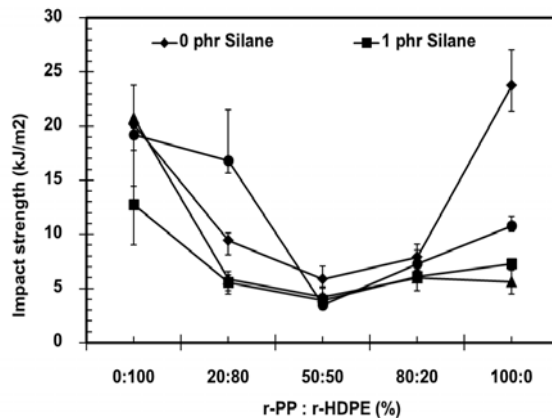
ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ จะมีค่าความแข็ง 60.5 ถึง 62.5 ชอร์ ดี ตามลำดับ



รูปที่ 4 ค่าความแข็งของ r-PP:r-HDPE ที่ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน 0 ถึง 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ

3.5 ค่าความทนแรงกระแทก

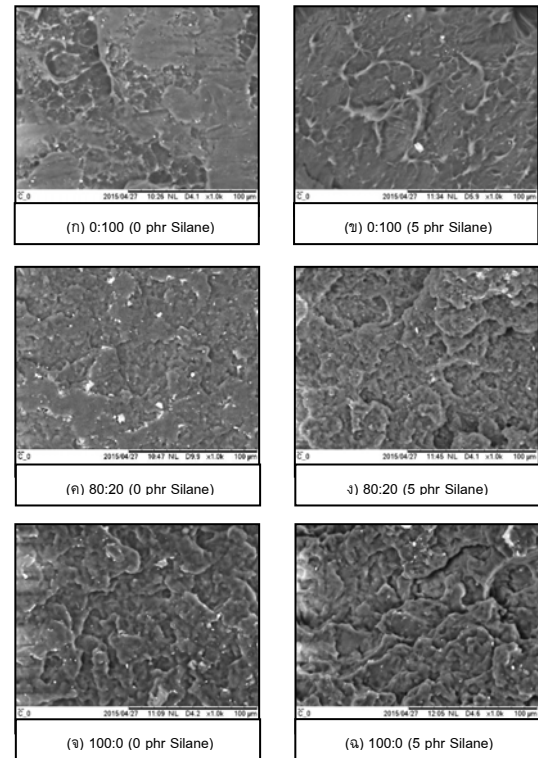
จากรูปที่ 5 ค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์ผสม (r-PP:r-HDPE) สัดส่วน 100:0, 50:50 และ 0:100 ที่ไม่เติมสารคู่ควบมีค่าเป็น 23.7, 5.8 และ 20.1 กิโลจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า การผสมกันของ r-PP:r-HDPE ที่สัดส่วน 50:50 มีค่าต่ำสุด และผลที่ได้มีลักษณะแบบเดียวกันในสูตรที่เติมสารคู่ควบ 1, 3 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยละ แต่จากผลการทดสอบที่ได้ เมื่อเพิ่มปริมาณสารคู่ควบให้สูงขึ้นค่าความทนต่อแรงกระแทกกลับลดต่ำลง ทั้งนี้จากการเติมสารคู่ควบที่สูงขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเปราะมากขึ้นตามไปด้วย การผสมของพอลิเมอร์ในสัดส่วนต่างๆ สารคู่ควบไซเลนจะไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีเท่ากับพอลิเมอร์ไรไซเคิลแบบเดี่ยว ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของประทุมมา สุโส (2554) ที่พอลิเมอร์ชนิดเดี่ยวจะสามารถเพิ่มพูนความสามารถในการรับแรงกระแทกจากการเติมสารคู่ควบได้ดีกว่าการผสม



รูปที่ 5 ค่าความทนแรงกระแทกของ r-PP:r-HDPE ที่ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน 0 ถึง 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน

3.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 6 เป็นการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (r-PP:r-HDPE) ใช้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยสูตรที่เลือกนำมาวิเคราะห์คือพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 0:100, 80:20 และ 100:0 ที่เติมสารคู่ควบไซเลน 0 และ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกมาวิเคราะห์ จากภาพจะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล จะมีลักษณะของเฟสที่มีขนาดใหญ่เป็นเนื้อเดียวและชัดเจนกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เติม และไม่เติมสารคู่ควบ พบว่าเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนพื้นผิวของชิ้นมีลักษณะหยาบและขรุขระมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของผิวชิ้นงานที่มีการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) สัมพันธ์กับค่าความทนแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบ สำหรับพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วน 80:20 ที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน (รูปที่ 6 ค) และที่เติมสารคู่ควบ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน (รูปที่ 6 ง) พบว่ามีลักษณะสัณฐานที่ใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลอันเนื่องมาจากมีปริมาณสัดส่วนการผสมที่สูงกว่านั่นเอง และเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลน 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ทำให้พบลักษณะของผิวชิ้นงานที่มีการแตกหักแบบเหนียวคล้ายกับรูป (ข) และ รูป (ฉ)



รูปที่ 6 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนการผสมและปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ต่างกัน

4. วิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากผลการทดลองได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้การทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (Two way ANOVA) ที่ความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.05$) ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการผสม r-PP:r-HDPE ส่งผลต่อความทนแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า P-Value เท่ากับ 0.005 ส่วนปริมาณสารคู่ควบไม่ส่งผลต่อค่าต้านทานแรงกระแทกเนื่องจากมีค่า P-Value เป็น 0.127 ซึ่งมากกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนด ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมได้รับอิทธิพลจากปริมาณสารคู่ควบไซเลน และสัดส่วนการผสม r-PP:r-HDPE อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value ของทั้งสองตัวแปรมีค่าเป็น 0.000 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับของตัวแปรทั้งสองอันนี้ส่งผลต่อค่าความแข็ง

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง ได้แก่ ค่าความทนต่อแรงดึง และมอดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งผลการทดสอบความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลน และสัดส่วนของ r-PP: r-HDPE ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.012 และ 0.019 ตามลำดับ และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสม แสดงผลที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือทั้งสองตัวแปรส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P-Value ของสารคู่ควบไซเลนคือ 0.000 และค่า P-Value ของสัดส่วนการผสมมีค่าเป็น 0.000 เช่นกัน

Two-way ANOVA: Impact strength						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Silane content (phr)	3	121.778	40.593	2.32	0.127	
r-HDPE fraction (%)	4	452.659	113.165	6.48	0.005	
Error	12	209.656	17.471			
Total	19	784.093				

Two-way ANOVA: Tensile str						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Silane content (phr)	3	60.504	20.1681	5.69	0.012	
r-HDPE fraction (%)	4	63.370	15.8425	4.47	0.019	
Error	12	42.553	3.5461			
Total	19	166.428				

Two-way ANOVA: Tensile MOD						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Silane content (phr)	3	223532	74510.8	68.75	0.000	
r-HDPE fraction (%)	4	73447	18361.9	16.94	0.000	
Error	12	13005	1083.8			
Total	19	309985				

Two-way ANOVA: Hardness						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Silane content (phr)	3	143.933	47.9777	86.90	0.000	
r-HDPE fraction (%)	4	25.048	6.2620	11.34	0.000	
Error	12	6.625	0.5521			
Total	19	175.606				

รูปที่ 7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ
Two way ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab

5. วิจัยรณัผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่แสดงดังรูปที่ 7 ทำให้ทราบว่าสัดส่วนการผสม และปริมาณการเติมสารคู่ควบส่งผลต่อค่าการรับแรงดึงสูงสุด ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำสมบัติทางกลที่กล่าวมาข้างต้นนี้มาวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟเรดาร์ในการเปรียบเทียบสมบัติทางกลเพื่อหาสูตรที่เหมาะสม

5.1 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม

ความสัมพันธ์การศึกษาปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม โดยเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณเท่ากัน ค่าความแข็ง และค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าของ r-PP มีค่าสูงกว่า r-HDPE แต่ในทางกลับกัน ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ r-HDPE มีค่าสูงกว่า r-PP ที่เติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณเดียวกัน สำหรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนจาก 3 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ไปเป็น 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ทำให้ค่าความแข็งแรง (มอดูลัสความยืดหยุ่น) ลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารคู่ควบที่ใส่พอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้มีความเปราะมากขึ้นซึ่งส่งผลให้มอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อย แต่โดยภาพรวมของสมบัติทางกลทั้งหมดพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนที่ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติทางกลเหมาะสมในการนำไปใช้มากที่สุด

5.2 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนในการผสมต่อสมบัติทางกล

อิทธิพลของสัดส่วนการผสมที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล สูตรที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน พบว่า r-HDPE (สูตร 0:100) มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด และ r-PP (สูตร 100:0) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ดังนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ r-PP ในพอลิเมอร์ผสมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง แต่เมื่อมีการผสม r-HDPE ในสัดส่วน 80:20 ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมสูตร 0:100 แต่ยังคงให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นพอลิเมอร์สัดส่วน 80:20 ที่เติมสารคู่ควบไซเลน 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากที่สุดโดยมีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 21.98 เมกะปาสคาล ค่ามอดูลัสความ

ยืดหยุ่นเท่ากับ 545.27 เมกะปาสคาล มีค่าความแข็งเท่ากับ 62.16 Shore D และมีค่าความทนต่อแรงกระแทก 16.795 กิโลจูลต่อตารางเมตร

6. สรุปผล

จากการศึกษาพบว่าอิทธิพลของปริมาณการเติมสารคู่ควบไซเลนที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความแข็งสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ทำให้ความทนต่อแรงกระแทกลดลง อย่างไรก็ตามการใช้สารคู่ควบในระดับที่สูงก็ยังมีเหมาะสมในการนำไปใช้ นั่นคือทำให้สมบัติทางกลต่างๆ สูงกว่าเดิม แม้การเติมสารคู่ควบไซเลนจาก 3 ไปเป็น 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน ส่งผลให้ค่าความแข็ง และมอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อย แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคู่ควบ 0 และ 1 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วน อิทธิพลของสัดส่วนการผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลพบว่า สมบัติทางกลที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเส้นตรง อันเนื่องมาจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีการผสมแบบไม่เข้ากัน (Immiscible blend) แต่จะแสดงจุดเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดออกมาเมื่อมีสัดส่วนผสมที่มากกว่า (เช่น 80:20 หรือ 20:80) ผลจากการทดสอบสมบัติและการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้ อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อวิเคราะห์ดูสมบัติทางกลที่ได้พบว่า r-PP มีสมบัติทางกลหลายประการที่เด่นกว่า r-HDPE การวิจัยทำให้ทราบว่าไม่มีสูตรใดที่มีสมบัติทางกลสูงสุดในทุกๆ การทดสอบ แต่สามารถบอกได้ว่า สัดส่วนการผสมที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้คือ พอลิเมอร์ผสม r-PP:r-HDPE ในสัดส่วน 80:20 ที่เติมสารคู่ควบ 5 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งสูงสุดซึ่งเหมาะสมแก่การนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sihama และคณะ (2013) [10] ที่พบว่า สัดส่วนการผสมของ PP และ HDPE ที่ทำให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดคือสัดส่วน 80:20 เช่นกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ บริษัท โคราชทีอาร์ซีพลาสติก จำกัด ที่เอื้อเฟื้อพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในการทำวิจัยตลอดจนให้แนวคิดเบื้องต้นสำหรับประเด็นการวิจัย ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัย และสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว วิทยาเขตขอนแก่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนเครื่องมือเครื่องจักรในการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Shuichi and N. Jittiwat, S. Takeo, U. Hideyuki, I. Yoshiyuki, "Effect of Electric Irradiation on the Mechanical Properties of Polypropylene/Vapor Grown Carbon Fiber Composites Prepared by Melt Compounding," *Journal of Textile Engineering*, vol. 58, no.1, pp. 1-7, 2012.
- [2] J. Gu, H. Xu, and C. Wu, "The Effect of PP and Peroxide on the Properties and Morphology of HDPE and HDPE/PP Blends," *Advances in Polymer Technology*, vol. 33, no. 1, 2013.
- [3] K. Anuchit and M. Utai. "Design of experiment: Wood composite based on crosslinked polypropylene". *The 18th International Conference on Composite Materials*. 21-26/ August/2011. Jeju Island, Korea: (2011).
- [4] B. Beltran and C. Mijangos, "Silane Grafting and Moisture Crosslinking of Polypropylene," *Polymer Engineering and Science*, vol. 40, pp. 1534-1541, 2009.

- [5] Y. An, Z. Zhang, W. Bi, Y. Wang, and T. Tang, "Characterization of High Melt Strength Polypropylene Synthesized via Silane Grafting Initiated by In Situ Heat Induction Reaction," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 110, pp. 3727–3732, 2008.
- [6] K. Sirisinha and K. Kawko, "Crosslinkable Polypropylene Composites Made by the Introduction of Silane Moieties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 97, pp. 1476–1483, 2005.
- [7] K. Sirisinha and K. Kawko, "Properties and Characterization of Filled Poly(Propylene) Composites Crosslinked Through Siloxane Linkage," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 290, pp. 128–135, 2005.
- [8] อนุชิต คงฤทธิ์ และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. "การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนชนิดนา กลับมาใช้ใหม่ที่มีโครงสร้างร่างแหโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ". *การประชุมวิชาการช่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2558. 6-7 สิงหาคม/2558. กรุงเทพฯ: 667-672, 2558.*
- [9] จุฑามาศ ไชยวงศ์, สุธาสินี แดงประดิษฐ์, สมมาส แก้วล้วน และสิทธิพันธ์ ท่อแก้ว. "การไฟโพลีเอทิลีนของพลาสติกกรีซไคลระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน" *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 8 (2): หน้า 21-31, 2556.
- [10] S. E. Salih, A. F. Hamood and A. H. Abd alsalam. "Comparison of the Characteristics of LDPE : PP and HDPE : PP Polymer Blends". *Modern Applied Science*. 7(3): 33-42, 2013.