การพัฒนาสูตรคอมเปานด์สำหรับงานอัดรีดจากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน

Formulation Development of Extrusion - Compound from PP Scraps and Waste

ชวลิต แสงสวัสดิ์ [1], ชัชวาลย์ สุรัสวดี [2], วีรศักดิ์ หมู่เจริญ [1] และทินกร วรกุลชัย [3]

บทคัดย่อ:

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรคอมเปานด์สำหรับกระบวนการผลิตสายรัดกล่องสินค้าจากเศษพอลิพรอพิลีนที่เหลือจากสายงานผลิตประเภทอัดรีด (Extrusion) งานเริ่มต้นจากการวัดดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์ การวัดสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค DSC การหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR การทดสอบหาค่าการต้านทานแรงดึงยืด การวัดหาค่าความแข็งแบบรอคเวล และปิดท้ายด้วยการวัดหาค่าการต้านทานต่อการขีดข่วน สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้สถิติร้อยละ, ค่าเฉลี่ย และเทคนิคการวิเคราะห์ค่าแปรปรวน แบบจำแนกทางเดียว (One-Way-ANOVA) ที่นัยสำคัญ 0.05 ซึ่งพบว่าเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนที่เหลือจากกระบวนการผลิตถุงปุ๋ยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เมื่อผ่านกระบวนการหลอมตัดเม็ดหนึ่งครั้งผสมด้วยสารหล่อลื่นร้อยละ 0.05 นำมาทำเป็นคอมเปานด์จะมีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกใหม่ที่ใช้ผลิตสายรัดกล่องสินค้า และเมื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แล้วพบว่ามีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับสายรัดกล่องสินค้าพอลิพรอพิลีนมาตรฐานที่มีจำหน่ายอยู่ทั่วไปทั้งในและต่างประเทศ

คำสำคัญ : การนำพีพีกลับมาใช้ใหม่, สายรัดกล่องสินค้า

Abstract

This research aims to study and develop a compound formulation for producing the strapping band using the scraps and waste materials from plastic extrusion processes. This work was carried out by measuring the properties of the materials such as Melt Flow Index (MFI) ; Thermal properties using the Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique ; the chemical compound using the Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectrometer ; Tensile strength using universal testing machine ; Hardness using Rockwell hardness test and Scratch test using the scratch resistant tester. For the analysis of results, it was carried out by using the percentage , mean value and differentiated by using the one-way ANOVA. The results obtained from the MFI, DSC and FT-IR tests showed that the first round recycle of the polypropylene scraps from the Textile Factory (Woven sack) mixed with 0.05% of lubricant was a suitable formula for producing the strapping band and it had similar properties to the new one. Moreover, the results from the mechanical tests showed that the strapping band produced from this formula was similar to the strapping band that sold in the world market.

Keywords : PP recycling, strapping band

[1] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

[2] สาขาอุตสาหกรรม สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง กระทรวงการคลัง

[3] บริษัท วรกุลชัย แพ็คเกจซีล จำกัด

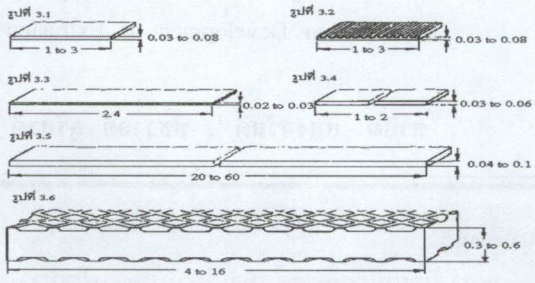
1. บทนำ

พอลิพรอพิลีน(พีพี) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพลาสติกทั่วไปที่มีการผลิตได้เองภายในประเทศ นับว่าเป็นความต้องการใช้งานในการผลิตสินค้าจำนวนมาก ทั้งงานฉีด งานเป่าภาชนะกลวง และงานเป่าถุง ยังผลให้เศษพลาสติกจากกระบวนการผลิตและจากเศษพลาสติกในรูปสินค้าภาชนะใช้แล้วมีจำนวนมากมาย พอลิพรอพิลีนมีปัญหาด้านเสถียรภาพขณะที่ผ่านกระบวนการผลิตแต่ละครั้ง และยังมีปัญหาด้านเสื่อมสภาพจากการใช้งานและสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ จนมีการพยายามต่อต้านจากสังคมในประเทศ ซึ่งทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจผิดเกินเหตุกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกไทย อนึ่งในการนำเศษพอลิพรอพิลีนกลับมาใช้ใหม่ต้องอาศัยเทคนิคเฉพาะพิเศษในการหลอมตัดเม็ดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทสอง คณะทำงานได้เลือกเรื่องดังกล่าวทำการวิจัยและพัฒนาบนพื้นฐานของคุณค่าทางเศรษฐกิจและให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด จะได้ดำเนินงานเป็นระบบวิเคราะห์ปัญหาด้านการสร้างสูตรคอมเปานด์ เทคนิคการใช้เครื่องมือในกระบวนการนำเศษพอลิพรอพิลีนกลับมาใช้ใหม่จนให้ได้สูตรคอมเปานด์ต้นแบบนำร่อง และสนับสนุนเอกชนที่เข้าร่วมโครงการโดยผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สายรัดกล่องสินค้าเป็นตัวอย่างต่อไป

2. สมบัติของพีพี[12]

พีพีเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ฝ้ามัว และมีสภาพกึ่งผลึกมีความหนาแน่น 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดอ่อนตัวไวแคทประมาณ 150°C และมีอุณหภูมิบิดตัวเมื่อร้อน (เอชดีที) ประมาณ 90°C เมื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์พีพีจะต้านทานน้ำร้อน ไอน้ำเดือด และทนต่อความเค้นที่มาจากสภาวะแวดล้อม (อีเอสซี) อุณหภูมิการใช้งานสูงสุดอยู่สูงกว่า 100°C พีพีมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความมันเงาสูง ผิวหน้าต้านทานการขูดขีด นอกจากนี้พีพียังสามารถปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้อีกหลายวิธี เช่น ผสมผงแร่ หรือยาง เพื่อให้มีความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น

3. ลักษณะของเทปฟิล์ม [5]



รูปที่ 1 หน้าตัดของเทปฟิล์ม (หน่วยเป็น มิลลิเมตร) (3.1) เทปที่ใช้ทอ, (3.2) เทปที่ใช้ทอมีลอน, (3.3) เทปที่ใช้ถัก, (3.4)เทปที่ใช้ทำพรม, (3.5) เทปที่ใช้ทำเชือก และ (3.6) สายรัดกล่องสินค้า

จากรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นหน้าตัดชนิดต่าง ๆ ของเทปฟิล์ม ในการพัฒนาเทปฟิล์มจะสนใจในการหาหน้าตัดที่ดีที่สุดในการใช้งาน เช่นในกรณีของเทปฟิล์มที่ใช้ในการทอ (รูปที่ 3.1และ 3.2) สัดส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาต้องพอเหมาะที่จะทำให้เทปฟิล์มเรียบตลอดกระบวนการผลิต และได้อัตราการทอที่รวดเร็วโดยใช้วัสดุจำนวนน้อย สำหรับเทปที่ใช้สำหรับการถัก (รูปที่ 3.3 และ 3.4) จะมีความหนาน้อยกว่าเทปที่ใช้ในการทอ ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์พิเศษในกระบวนการถัก ซึ่งความหนาและความกว้างของเทปที่ใช้ทำเชือก (รูปที่ 3.5) ทั้งใหญ่และเล็กจะต้องพอเหมาะที่จะทำให้เทปมีความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักต่อความยาวใกล้เคียงกับเส้นใยธรรมชาติที่ผลิตกันมาแต่เดิม นั่นก็หมายความว่าสายเคเบิลก็สามารถผลิตได้ด้วยวิธีนี้ สมบัติของเส้นใยจะได้รับอิทธิพลมาจากรูปแบบตามยาวและการผ่าซอยออกของแผ่นฟิล์ม ขนาดหน้าตัดของเทปที่ใช้ทำสายรัดกล่องสินค้า(รูปที่ 3.6) จะขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน นั่นคือ ความเหนียว การป้องกันสินค้าขณะทำการขนถ่าย การยืด และหดตัวได้ ทำให้เทปชนิดนี้มาแทนผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติหลาย ๆ ชนิดในท้องตลาด

4. การนำเศษพลาสติกกลับมาใช้ใหม่

4.1 การเลือกชนิดของพอลิพรอพิลีนจะพิจารณาจากแคตตาล็อกให้ได้เกรดที่มีค่าดัชนีการไหลเริ่มต้นใกล้เคียงกับค่าดัชนีการไหลของสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ (Dong Seo Inc.) แต่ไม่ใช่เกรดชนิดใช้ผลิตสายรัดกล่องสินค้าโดยตรง ซึ่งโดยการตั้งสมมติฐานแล้วจะใช้เศษพลาสติกที่มาจากเกรดชนิดใช้ผลิตถุงปุ๋ย ทั้งนี้จะยืนยันความถูกต้องของการเลือกใช้โดยพิจารณาจากค่าดัชนีการไหลของเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนประกอบการตัดสินใจ

4.2 การหลอมตัดเม็ดซ้ำพลาสติกพอลิพรอพิลีน กระทำโดยการนำเศษถุงปุ๋ยที่ผลิตจากเม็ดพอลิพรอพิลีนเกรด 1102 K ที่ผลิตจากบริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทยจำกัด, TPI มาเข้ากระบวนการทำความสะอาด คัดแยก ย่อยให้เป็นเศษเล็ก ๆ แล้วนำเข้าสู่เครื่องหลอมตัดเม็ด การปฏิบัติการหลอมตัดเม็ดนี้จะกระทำวนซ้ำ ๆ กัน 6 รอบเพื่อนำตัวอย่างเม็ดไปตรวจวัดหาค่าดัชนีการไหลเทียบกับเม็ดใหม่ที่ใช้ผลิตสายรัดกล่องสินค้า(TPE เกรด P400S)และรวมไปถึงเทียบกับค่าดัชนีการไหลของสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ

5. สารเติมแต่ง

เมื่อพอลิพรอพิลีนถูกความร้อนจะเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้ความเสถียร(Stability) ลดลง วิธีแก้ไขปัญหาคือ การใส่สารแอนติออกซิแดนท์ลงไปในขั้นตอนการผลิตหรือขั้นตอนการทำเป็นเม็ด โดยทั่วไปจะใช้สารแอนติออกซิแดนท์ประมาณ 0.05 - 0.25 % และสารหล่อลื่นประมาณ 0.05 % โดยน้ำหนัก [10] ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้สารแอนติออกซิแดนท์ยี่ห้อ IRGANOX B 900 ของบริษัท CIBA และสารหล่อลื่นชนิด Vicker Ben ของบริษัท วิคเกอร์ปิคเมนท์ จำกัด

6. วิธีการทดสอบ

6.1 การทดสอบดัชนีการไหล

ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดสอบ A ของมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1238-98 อุณหภูมิที่กำหนดคือ 230^{o}C น้ำหนักที่ใช้กด 2.16 กิโลกรัม และเวลาที่ใช้เป็นมาตรฐานเท่ากับ 10 นาที การวัดค่าดัชนีการไหลในครั้งนี้จะวัดผ่านเครื่องทดสอบของบริษัท Ceast จากประเทศอิตาลีเพื่อให้ทราบถึงค่าดัชนีการไหลของคอมเปานด์จากเศษพลิพรอพิลีนสูตรใดจะเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับเนื้อสายรัดกล่องสินค้าที่มีจำหน่ายอยู่ในตลาด (ดูตารางที่ 1 ประกอบ)

6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3417-83 ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดหาปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว พลังงานความร้อนที่ใช้จะถูกป้อนด้วยอัตราคงที่ เข้าไปในระบบเพื่อวัดหาอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ พร้อมกันนี้ยังทำให้สามารถพิสูจน์ทราบถึงการผสมกันของพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปอีกด้วย การทดสอบครั้งนี้ใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า "Differential Scanning Calorimeter" หรือ DSC ของบริษัท Perkin - Elmer จากประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 10^{o}C ต่อนาที

6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

เป็นการพิสูจน์ทราบชนิดของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-TR) Spectrometer หลักการอาศัยความสามารถดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดไว้ได้ไม่เท่ากันในพอลิเมอร์แต่ละชนิด สเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรดจะแสดงให้เห็นถึงยอดคลื่นการดูดกลืนแสงเนื่องจากความถี่ของการสั่นสะเทือนระหว่างพันธะของอะตอมของวัสดุคล้ายกับลายนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พอลิเมอร์สองชนิดไม่มีโอกาสมีสเปกตรัมเหมือนกันได้ [11] และโดยการตรวจสอบผลสเปกตรัมเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานจากห้องปฏิบัติการ(Library) จะทำให้สามารถพิสูจน์ทราบชนิดของพอลิเมอร์นั้นได้ การทดสอบเทคนิค FT-IR ในครั้งนี้จะใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Nicolet Instrument รุ่น Omnic 670 Nexus FT-IR จากประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงเลขคลื่น(Wave number) เท่ากับ 4,000-400 cm^{-1}

6.4 การทดสอบสมบัติทางกล

6.4.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง

ใช้มาตรฐาน ASTM D 3950 - 01 Type II สำหรับทดสอบสายรัดกล่องสินค้าพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน 5 ชนิดคือ (1) Dong Seo Inc. (2) P400S (3) สูตร 1 (4) สูตร 2 และ (5) สูตร 3 โดยตัวอย่างทดสอบ กว้าง 12 *n* 0.76 มิลลิเมตร หนา 0.64 *n* 0.08 มิลลิเมตร เครื่องทดสอบ Universal testing machine ใช้ของบริษัท Testometric จากประเทศอังกฤษ รุ่น Testometric Micro 500 AX ใช้แรงในการดึง 10 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ดึง 200 มิลลิเมตรต่อนาที ความยาวเกจ 200 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 23°C

6.4.2 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 785-86 ชนิด Scale R ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้ง 5 ชนิดคือ (1) Dong Seo Inc. (2) P400S (3) สูตร 1 (4) สูตร 2 และ (5) สูตร 3 โดยเตรียมตัวอย่างให้มีขนาด 100 × 100 × 6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแผ่นพลาสติกของบริษัท Lab Tech Engineering Co., Ltd. จากประเทศไทย ความดัน 150 บาร์ ตั้งอุณหภูมิแม่แบบที่ 230°C ทำการอุ่นแม่แบบก่อน 6 นาที คายก๊าซออก 5 วินาที เวลาที่ใช้ในการอัด 3 นาที และหล่อเย็นใช้เวลา 10 นาที การทดสอบครั้งนี้จะใช้เครื่องทดสอบความแข็งชนิดรอคเวลของบริษัท MATSUZAWA SEIKI Co.,Ltd. จากประเทศญี่ปุ่น รุ่น DXT-1 โดยเริ่มจากการเซ็ตค่ามาตรฐานเครื่องมือซึ่งใช้หัวเพชรรูปกรวยเบอร์ 42343 กดไปบนแผ่นมาตรฐาน ความแข็งเท่ากับ 61.2 *n* 0.8 ด้วยน้ำหนักกด 150 กิโลกรัม เ ป็ น เวลา 5 วินาที หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบตัวอย่างด้วย Scale R ซึ่งใช้น้ำหนักกด 60 กิโลกรัม ลักษณะหัวกดเป็นแบบหัวลูกเหล็กทรงกลมขนาด 1/2 นิ้ว, เวลาที่ใช้กด 15 วินาทีแล้วอ่านค่า โดยหนึ่งตัวอย่างวัด 5 จุดแต่ละจุดมีระยะห่างกันประมาณ 2 เซนติเมตร หาค่าเฉลี่ยแล้ว บันทึกผล

6.4.3 การทดสอบการต้านทานต่อการขีดข่วน

วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบเช่นเดียวกับตัวอย่างการทดสอบความแข็ง การทดสอบครั้งนี้จะใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ Teledyne Taber จากประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น 502 นำตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดมาสัมผัสกับหัวกดที่มีลักษณะเป็นใบมีดเล็บพร้อมกับใช้น้ำหนักกด 200 กรัม ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของตัวอย่างเท่ากับ 1 นาทีตามเส้นรอบวง และเมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่ไปก็จะทำการกดสร้างรอยขีดข่วนขึ้นมา 10 ตำแหน่ง จากนั้นนำไปส่องดูรอยขีดข่วนด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยายภาพที่มีสเกลเพื่อวัดความกว้างของรอยขีดข่วนแล้วหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการต้านทานต่อรอยขีดข่วนดังสมการที่ (1) นี้

$$\text{Scratch resistance} = W / A \quad (1)$$

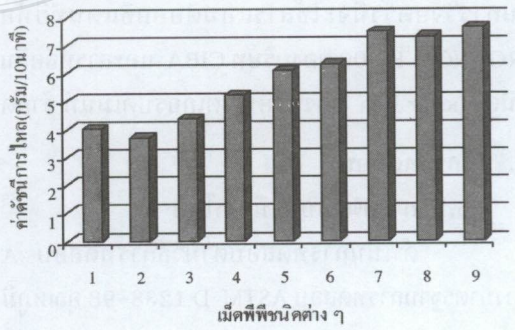
โดย W = น้ำหนักกด (กิโลกรัม)

A = พื้นที่ที่เกิดรอย (ตารางมิลลิเมตร)

7. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

7.1 ผลการหาค่าดัชนีการไหล

จากรูปที่ 2 พบว่าสายรัดกล่องสินค้าของ Dong Seo Inc. เม็ดใหม่ P400S และเม็ดใหม่ 1102 K มีดัชนีการไหลใกล้เคียงกัน แต่ถ้านำเศษถุงปุ๋ยมาผ่านกระบวนการหลอมตัดเม็ดซ้ำทั้งหมดหกครั้ง โดยไม่ผสมกับสารแอนติออกซิแดนท์ พบว่าค่าดัชนีการไหลของเม็ดหลอมเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนืดลดลง โดยยืนยันได้จาก One-Way-ANOVA ที่ α = 0.05 พบว่ามีความเชื่อมั่นได้ 95%



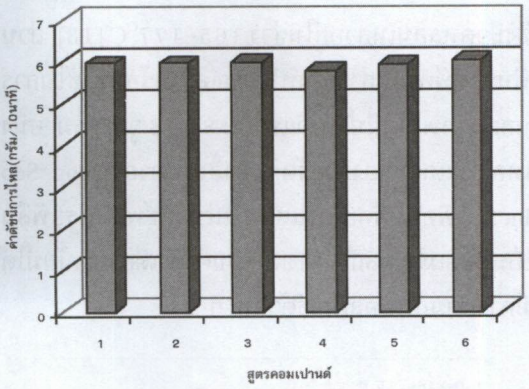
รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหลของเม็ดพีพีที่ยังไม่มีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์ (1) Dong Seo Inc. (2) P400S, (3) 1102K, (4) Re-bag ครั้งที่ 1, (5) Re-bag ครั้งที่ 2, (6) Re-bag ครั้งที่ 3, (7) Re-bag ครั้งที่ 4, (8) Re-bag ครั้งที่ 5, (9) Re-bag ครั้งที่ 6

หมายเหตุ Re bag หมายถึงเศษถุงปุ๋ยที่ผลิตจากเม็ดพอลิพรอพิลีนเกรด 1102 K แล้วนำมาเข้ากระบวนการหลอมตัดเม็ดใหม่ เช่น Re bag - 3 หมายความว่าหลอมตัดเม็ดถุงปุ๋ยจากเกรด 1102 K เป็นครั้งที่ 3

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในขณะที่พลาสติกพอลิพรอพิลีนถูกหลอมเหลวนั้นจะเกิดการแตกสลายทางโครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนเองในแต่ละรอบทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบลงด้วย[9] ดังนั้นข้อมูลเบื้องต้นของการนำเศษถุงปุ๋ยมาทำสายรัดกล่องสินค้าคือ ควรพิจารณาเลือกทำการหลอมตัดเม็ดหนึ่งครั้ง ส่วนครั้งที่สองถึงหกไม่เหมาะสมทั้งนี้เนื่องจากไม่เป็นการประหยัดต้นทุน และยังทำให้เกิดการแตกสลายทางโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามครั้งที่ครั้งที่สองถึงหกก็ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ของการใช้ผลิตสายรัดกล่องสินค้าชนิดทนต่อแรงยึดตัวต่ำได้อยู่ดี ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปแล้วการผลิตสายรัดกล่องสินค้าคุณภาพธรรมดาจะใช้พอลิพรอพิลีนที่มีดัชนีการไหลอยู่ที่ 0.4 - 8[12]

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีการไหลของคอมเปานด์สูตรต่าง ๆ

ชนิดตัวอย่าง	สารแอนติออกซิแดนท์ (%)	สารหล่อลื่น (%)	ดัชนีการไหลเฉลี่ย (กรัม/ 10นาที)
สูตร 1	0.00	0.05	5.94
สูตร 2	0.05	0.05	5.95
สูตร 3	0.10	0.05	5.97
สูตร 4	0.15	0.05	5.77
สูตร 5	0.20	0.05	5.92
สูตร 6	0.25	0.05	6.09



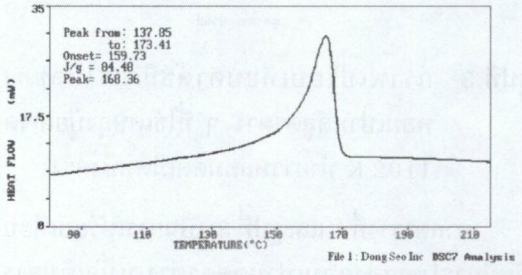
รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหลของคอมเปานด์สูตรต่าง ๆ ที่ใช้เศษถุงปุ๋ยเกรด 1102 K ทำการหลอมตัดเม็ดหนึ่งครั้ง

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบดัชนีการไหลของคอมเปานด์สูตรต่าง ๆเมื่อเติมสารแอนติออกซิแดนท์ปริมาณไม่เท่ากัน พบว่าค่าดัชนีการไหลเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักซึ่งสัมพันธ์กับ One-Way-ANOVA ที่ α = 0.05 มีความเชื่อมั่น 95% อนึ่งปริมาณการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ที่พอเหมาะควรอยู่ที่ 0.05 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่าแม้จะใช้ปริมาณสารแอนติออกซิแดนท์มากไปกว่านี้ก็ไม่ทำให้พอลิพรอพิลีนมีความเสถียรต่อความร้อนมากขึ้น แต่กลับเป็นการทำให้ต้นทุนของการหลอมตัดเม็ดมากขึ้นโดยใช่เหตุ

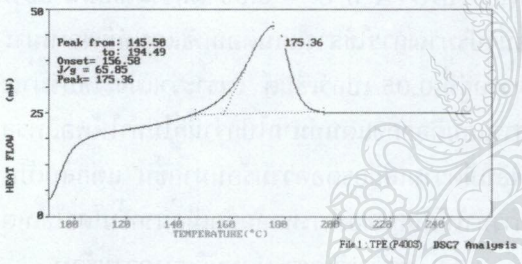
7.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

การบันทึกผลเทอร์โมแกรมครั้งนี้จะให้แกน X เป็นอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส และแกน Y เป็นพลังงานหรือความร้อนที่ไหล (Heat flow) เข้า-ออกจากระบบมีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ ดังนั้นจากรูปที่ 4 พบว่าตัวอย่างสายรัดกล่องสินค้าจาก Dong Seo Inc. เมื่อได้รับพลังงานความร้อนต่อเนื่องไป จนถึงอุณหภูมิประมาณ 137.85^{o}C จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพคือ มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว เนื่องจากโครงสร้างผลึกถูกทำลายและได้พีคของการดูดความร้อน[2] จุดยอดของพีคซึ่งเป็นอุณหภูมิหลอมตัวผลึก(T_m) ของสายรัดกล่องสินค้าจาก Dong Seo Inc. สามารถวัดได้เท่ากับ 168.36^{o}C อันเป็นการยืนยันได้ว่าสายรัดกล่องสินค้านี้น่าจะเป็นพอลิพรอพิลีน

ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 165-177°C [13] ส่วนพื้นที่ใต้พีคเป็นการบอกปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมตัวพบว่ามีปริมาณเท่ากับ 84.48 จูล/กรัม อนึ่ง เทอร์โมแกรมของสายรัดกล่องสินค้าจาก Dong Seo Inc. มีพีคอยู่พีคเดียวแสดงว่าน่าจะใช้พอลิพรอพิลีนเป็นพอลิเมอร์หลักในการผลิตสินค้าตัวเดียวเท่านั้นมิได้มีการผสมกับพอลิเมอร์ตัวอื่น ๆ

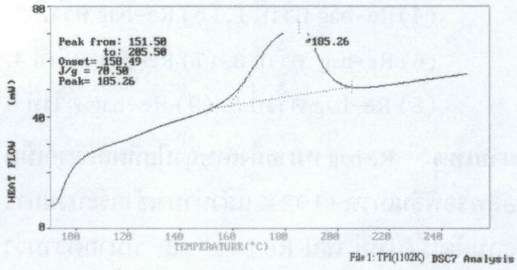


รูปที่ 4 เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมตัวของสายรัดกล่องสินค้าจากบริษัท Dong Seo Inc



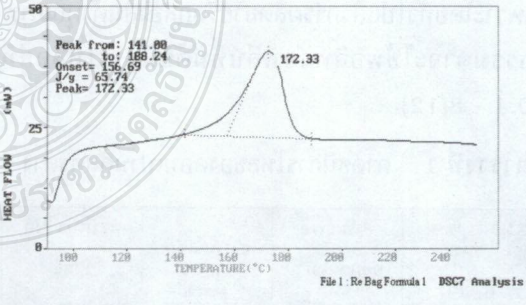
รูปที่ 5 เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมตัวของเม็ดพอลิพรอพิลีนใหม่จากบริษัท ค้าเคมีภัณฑ์สยาม จำกัด, TPE เกรด P400S

จากรูปที่ 5 พบว่าพีคเทอร์โมแกรมของเม็ดพอลิพรอพิลีนใหม่ TPE (เกรด P400S) จะเริ่มต้นจาก 145.50°C ไป จนถึง 194.50°C จะกว้างกว่าพีคเทอร์โมแกรมสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ แสดงว่าเม็ด TPE (เกรด P400S)จะมีการจัดเรียงชั้นผลึกหนากว่า[2] แต่อย่างไรก็ตามค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมตัวจะน้อยกว่าคือ 65.85 จูล/กรัม เนื่องจากปริมาณของผลึกน้อยกว่าซึ่งจะส่งผลทำให้สายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากเกรด P400S จะมีสมบัติทางกลต่ำกว่าสายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากต่างประเทศเล็กน้อย [2] ส่วนอุณหภูมิหลอมตัวของเม็ดTPE (เกรด P400S) จะเท่ากับ 175.36°C ซึ่งมากกว่าของต่างประเทศประมาณ 7°C



รูปที่ 6 เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมตัวของเม็ดพอลิพรอพิลีนใหม่จากบริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด, TPI เกรด 1102 K

จากรูปที่ 6 พบว่าพีคการหลอมตัวของเม็ดพอลิพรอพิลีนที่ใช้ในการผลิตถุงปุ๋ยจะใช้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 70.50 จูล/กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับสายรัดกล่องสินค้าจาก Dong Seo Inc. ซึ่งอาจจะประเมินได้ว่าสมบัติทางกลของเม็ดTPI (เกรด1102K) น่าจะเข้าใกล้กับสายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากต่างประเทศ แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิหลอมตัวของจุดยอดพีคของเม็ดพอลิพรอพิลีนที่ใช้ผลิตถุงปุ๋ยจะสูงมากขึ้นถึงระดับ 185.26°C ซึ่งจะต้องส่งผลยุ่งยากต่อการปรับตั้งอุณหภูมิการผลิตรวมทั้งการหล่อเย็นได้



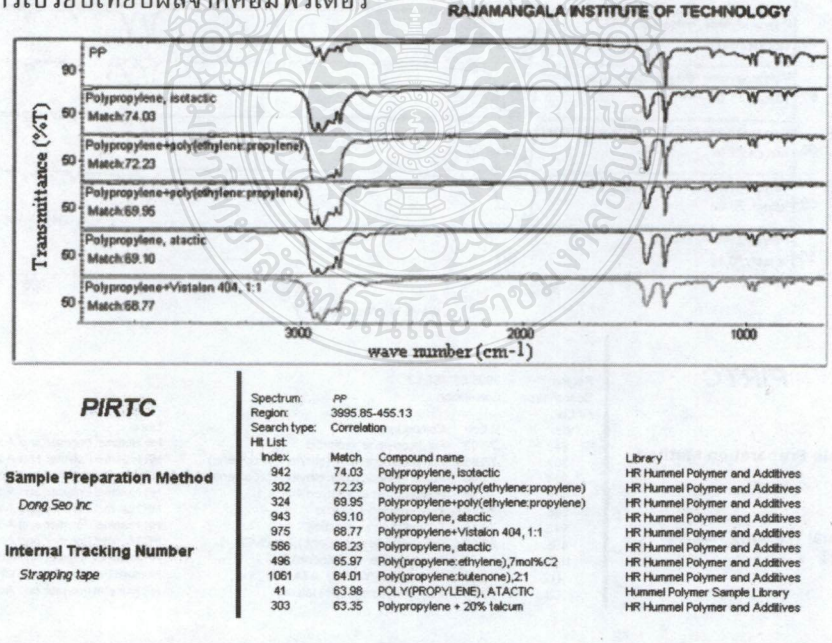
รูปที่ 7 เทอร์โมแกรมแสดงพีคการหลอมตัวของคอมเปานด์เศษพอลิพรอพิลีนสูตร 1

จากรูปที่ 7 เทอร์โมแกรมแสดงให้เห็นว่าจุดหลอมตัวผลึก(T_m) ของเศษพอลิพรอพิลีนจากถุงปุ๋ย(เกรด 1102K) ลดลงเหลือ 172.33°C และปริมาณความร้อนในการหลอมตัวลดลงเหลือ 65.74 จูล/กรัม เกือบ

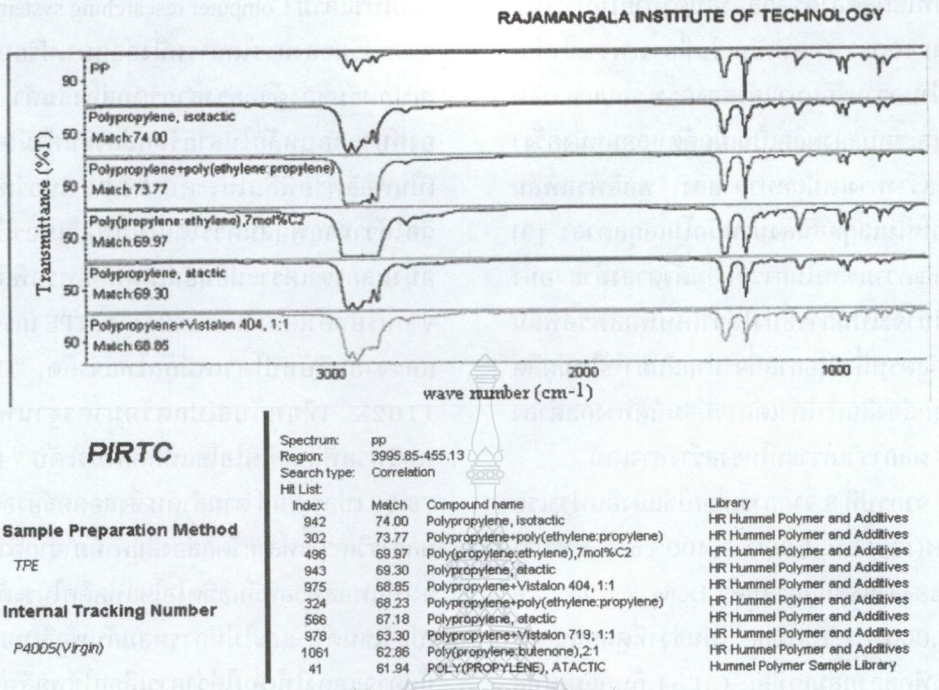
เท่ากับเม็ดที่ใช้ผลิตสายรัดกล่องสินค้าภายในประเทศ (TPEเกรดP400S) เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่าเม็ดตัดหลอมผ่านความร้อนมาแล้วสองครั้ง(รอบแรกผลิตเป็นถุงปุ๋ยและรอบสองผลิตเป็นเม็ดตัดหลอมหนึ่งครั้ง) ทำให้โครงสร้างทางเคมีถูกทำลายลง พอลิพรอพิลีนน่าจะมีสายโซ่โมเลกุลสั้นลงน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง [9] ทำให้ปริมาณความร้อนในการหลอมตัวต่ำลงด้วย อนึ่งข้อมูลชุดนี้น่าจะเป็นการชี้บ่งได้ว่าเศษพอลิพรอพิลีนคอมเปานด์สูตรหนึ่งมีโอกาสที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ผลิตเป็นสายรัดกล่องสินค้าได้ แต่อาจมีสมบัติทางกลต่ำลง

7.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

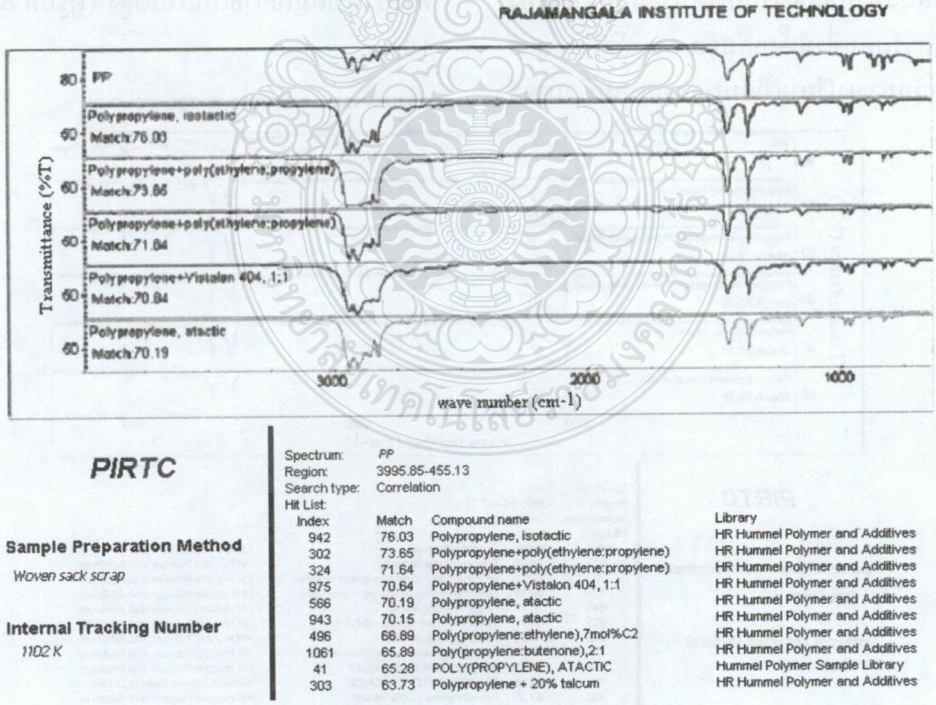
จากรูปที่ 8 จากการเลือกใช้แสงอินฟราเรดในช่วงกลาง(เลขคลื่น 4,000 - 400 cm^{-1}) พบว่าสเปกตรัมของสายรัดกล่องสินค้า Dong Seo Inc. ที่เลขคลื่น 3,000 - 2,750 cm^{-1} เป็นช่วงที่ดูดกลืนแสงมากจะเห็นพีคของกลุ่มเอทิล($-CH_2-$) กับกลุ่มเมทิล($-CH_3-$) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลัก[3] ในตัวผลิตภัณฑ์ ส่วนพีคที่เห็นอยู่ในช่วง 1,500 - 1,000 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงที่ดูดกลืนแสงน้อยจะเป็นองค์ประกอบย่อยของสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีทั้งกลุ่มอัลเคน อัลคีน และอัลไคน์ ส่วนการเปรียบเทียบผลจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Computer researching system จะเรียกสเปกตรัมของสารใดสารหนึ่งออกมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของตัวอย่างสายรัดกล่องสินค้า พบว่าองค์ประกอบหลักในสายรัดกล่องสินค้ามีโอกาสที่จะเป็นพอลิพรอพิลีนในระดับ 74.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือได้ว่ามากพอสมควรโดยไม่มีพอลิเมอร์อื่นเจือปน อนึ่งผลการวิเคราะห์ยืนยันเม็ดพอลิพรอพิลีนใหม่ทั้งจากบริษัทค้าเคมีภัณฑ์สยามจำกัด, TPE เกรด P400S และจากบริษัทปิโตรเคมีกัลไทยจำกัด, TPI เกรด 1102K เทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานพบว่าเป็นพอลิพรอพิลีนชนิดไอโซแทคติกในระดับ 74.00 และ 76.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องอย่างยิ่งกับผลการวิเคราะห์สายรัดกล่องสินค้าที่มาจากต่างประเทศซึ่งเป็นพอลิพรอพิลีนชนิดไอโซแทคติคในระดับ 74.03 เปอร์เซนต์ และไม่มีการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น นั่นอาจแสดงให้เห็นได้ว่าการเลือกใช้พอลิพรอพิลีนที่ผลิตในประเทศไทยทั้งสองเกรดผลิตเป็นสายรัดกล่องสินค้าให้ได้คุณภาพใกล้เคียงกับสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศมีโอกาสเป็นไปได้สูง (ดูรูปที่ 8 , 9 และ 10)



รูปที่ 8 สเปกตรัมเปรียบเทียบหมู่อนุมูลเคมีของสายรัดกล่องสินค้า จาก บริษัท Dong Seo Inc. กับ สเปกตรัมมาตรฐาน

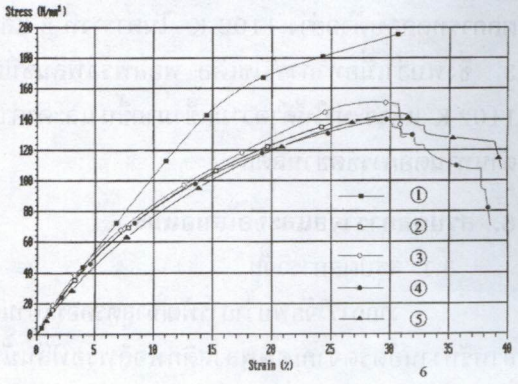


รูปที่ 9 สเปกตรัมเปรียบเทียบหมู่อนุมูลเคมีของเม็ดพีพีใหม่จากบริษัทค้าเคมีภัณฑ์สยามจำกัด, TPE (P400S) กับสเปกตรัมมาตรฐาน



รูปที่ 10 สเปกตรัมเปรียบเทียบหมู่อนุมูลเคมีของเม็ดพีพีใหม่จากบริษัทปิโตรเคมีกัลไทยจำกัด, TPI (1102 K) กับสเปกตรัมมาตรฐาน

7.4 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึง



รูปที่ 11 กราฟความเค้น- ความเครียด ของสายรัดกล่องสินค้าชนิดต่าง ๆ (1) Dong Seo Inc, (2) P400S, (3) สูตร 1, (4) สูตร 2 และ (5) สูตร 3

โดยระบบการค้าสากลแล้วจะพิจารณาคุณภาพของสายรัดกล่องสินค้าได้จากสมบัติทางกลโดยเฉพาะความเค้นและการยืดตัวที่จุดแตกหัก[7] ในกรณีศึกษาครั้งนี้(ดูจากรูปที่ 11) พบว่าสายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากต่างประเทศมีค่าความเค้นที่จุดแตกหักมากที่สุด ติดตามด้วยสายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากเม็ด P400S และเม็ดสูตรที่ 1 ตามลำดับ ส่วนสูตรที่ 2 และ 3 มีค่าความเค้นต่ำกว่าสายรัดกล่องสินค้าสูตรที่ 1 เกือบ 45 % และต่ำกว่าสายรัดกล่องสินค้า Dong Seo Inc. ถึง 123 % จึงไม่สมควรที่จะเลือกใช้สูตรที่ 2 และ 3 แต่ควรเลือกใช้สูตรที่ 1 เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจแสดงให้เห็นว่าการใส่สารแอนติออกซิแดนท์ลงไปในการหลอมตัดเม็ดพอลิพรอพิลีนถึงแม้จะช่วยป้องกันการเกิดเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ก็ตาม แต่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพลาสติกพอลิพรอพิลีนลดลง ถึงจะไม่มากนักแต่ก็ทำให้สมบัติทางกล (ความเค้นที่จุดแตกหัก) ลดลงต่ำกว่าคุณภาพมาตรฐานมาก สำหรับการยืดตัว(%Strain) ก็จะพบว่าสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศมีค่าการยืดตัวไม่มากนัก (30.68%) เหมาะที่จะใช้กับเครื่องรัดกล่องสินค้าโดยอัตโนมัติ เพราะว่าจะไม่ยืดตัวออกไปเกินควรจนบังคับสายรัดกล่องสินค้าให้วิ่งอยู่ในรางเครื่องรัดกล่องสินค้าไม่ได้ ซึ่งค่าการยืดตัวนี้จะใกล้เคียงมากกับสายรัดกล่องสินค้าสูตรที่ 1 (31.25 %) เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่าสายโซ่โมเลกุลของเม็ดหลอมพอลิพรอพิลีนได้ถูกดึงจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบยิ่งขึ้น เนื่องจากค่าการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุล(MWD) ที่แคบเข้ามา รวมทั้งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ลดลงด้วย[9] อนึ่งพบว่ากราฟความเค้น-ความเครียดของสายรัดกล่องสินค้าตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีแนวโน้มไปในลักษณะใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เพราะว่ากระบวนการผลิตสายรัดกล่องสินค้าจะใช้การอัดรีดและดึงทำให้พอลิพรอพิลีนมีสมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามทิศทางที่กระทำ (Anisotropic Material)[4] ตัวอย่างเช่นการทนต่อแรงดึงมีค่ามากขึ้น ซึ่งโดยตามปกติของกระบวนการแล้วจะใช้อัตราดึง (Draw down ratio) ประมาณ 5.5 - 8.5 เท่า[12]

7.5 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแบบรอคเวลของตัวอย่างทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	Rockwell Scale R
Dong Seo Inc.	104.48
P400S	103.75
1102K	102.55
สูตร 1	103.65
สูตร 2	103.32
สูตร 3	104.69

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งรอคเวลของสายรัดกล่องสินค้าที่ผลิตจากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนทั้งสามสูตรคอมเปานด์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งรอคเวลของสายรัดกล่องสินค้าทั้งสองชนิดจากเม็ดใหม่และนำเข้ามาจากต่างประเทศ จากผลทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าการรีไซเคิลพลาสติกพอลิพรอพิลีนจากเศษถุงปุ๋ยเพียงครั้งเดียว ทำให้ค่าความแข็งของคอมเปานด์ทั้งสามสูตรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจากเดิมที่ใช้เม็ดใหม่ (1102 K) เข้าไปใกล้ค่าความแข็งของ Dong Seo Inc.

เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าตามปกติพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงเมื่อถูกผสมด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่ำตัวอย่าง เช่น เศษพลาสติกจะทำให้เกิดการแข็งขึ้นแต่เปราะ และค่าความแข็งแรงทางแรงดึงลดลงกว่าปกติ[8] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางแรงดึงที่ผ่านมา และจากการทดสอบ One-way-ANOVA ที่ $\alpha = 0.05$ พบว่ามีความเชื่อมั่น 95%

7.6 ผลการทดสอบการต้านทานต่อการขีดข่วน

ตารางที่ 3 ค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนของตัวอย่างทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	Scratch resistance
Dong Seo Inc.	0.0232
P400S	0.0218
1102K	0.0250
สูตร 1	0.0237
สูตร 2	0.0240
สูตร 3	0.0240

ค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนของตัวอย่างทดสอบจากตารางที่ 3 ใกล้เคียงกันมาก แต่อย่างไรก็ตามโดยปกติค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนจะมีค่าไม่ถึงหนึ่งและจะแตกต่างกันเมื่อพิจารณาที่จุดทศนิยมสามตำแหน่งขึ้นไป จากตารางถ้าค่าใดมีค่ามากแสดงว่าจะมีค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนมาก จึงพบว่าทั้งสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 มีค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนมากกว่าสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศเล็กน้อย ทั้ง ๆ ที่เมื่อดูจากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าความแข็งแล้วสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 มีค่าความแข็งน้อยกว่า ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าถึงแม้ทั้งสามสูตรจะมีค่าความแข็งน้อยกว่า(นิ่มกว่า) แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนจะน้อยกว่า กรณีนี้รวมไปถึงค่าการต้านทานต่อการขัดถูด้วย(Abrasion)ซึ่งจะต้องมีเนื้อพลาสติกหลุดหายไป ดังนั้นอาจให้เหตุผลของค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนของสูตร 1 ถึงสูตร 3 ที่มีมากกว่า Dong Seo Inc. ว่าน่าจะมาจากการที่ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของสูตร 1 ถึงสูตร 3 มีค่าต่ำกว่าจึงมีค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนสูงกว่า[8] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบตัวอย่าง 1102 K ในตารางที่ 2 และ 3 ซึ่งพบว่าเมื่อทำการรีไซเคิล พอลิพรอพิลีนชนิด 1102 K แล้วจะทำให้ค่าความแข็งมากขึ้น และค่าการต้านทานต่อการขีดข่วนลดลง

8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าการพัฒนาสูตรคอมเปานด์สำหรับงานอัดรีดจากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนนั้นต้องให้ความสำคัญไปที่การเลือกเกรดเศษพลาสติกให้สอดคล้องกับผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่ต้องการเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เทคนิคที่เหมาะสมและสะดวกก็คือการวัดหาค่าดัชนีการไหล สำหรับการวิจัยในครั้งนี้พบว่าค่าดัชนีการไหลของเม็ดหลอมเศษพอลิพรอพิลีนจากกระบวนการผลิตถุงปุ๋ยมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ สำหรับการใช้เทคนิค DSC พบว่าสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศผลิตจากพอลิพรอพิลีนอย่างเดียวไม่มีการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นลงไป และสำหรับการยืนยันชนิดของพอลิเมอร์รวมทั้งพิสูจน์ทราบหมู่อนุมูลเคมีของสายรัดกล่องสินค้าโดยใช้เทคนิค FT-IR เข้าทำการศึกษาสเปกตรัมของตัวอย่างทดสอบพบว่าสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศผลิตจากพอลิพรอพิลีนเกรดใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีนของบริษัท ปิโตรเคมีกัลไทยจำกัดคือ เกรด 1102 K ซึ่งใช้เป็นเม็ดใหม่ในการผลิตถุงปุ๋ยและโดยการวัดค่าดัชนีการไหลของเม็ดตัดหลอมจากเศษถุงปุ๋ยหกครั้งพบว่าค่าดัชนีการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการทำสูตรคอมเปานด์ของการศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ครั้งที่หนึ่ง ซึ่งอยู่ในระดับใกล้เคียงกับสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ สุดท้ายสามารถสรุปได้ว่า คอมเปานด์สูตรที่ 1 จากเศษถุงปุ๋ยเหมาะสมที่สุดในการผลิตสายรัดกล่องสินค้าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารแอนติออกซิแดนท์แต่ใช้สารหล่อลื่นเพียง 0.05 % ก็มีสมบัติทางกลไม่ว่าการทนต่อแรงดึง การยืดตัว ความแข็ง และการต้านทานต่อการขีดข่วนใกล้เคียงยอมรับได้เมื่อเทียบกับสายรัดกล่องสินค้าจากต่างประเทศ

8.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นการขยายผลความมั่นใจในการผลิตสายรัดกล่องสินค้าจากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน ควรเพิ่มการทดลองเกี่ยวกับ อายุการใช้งาน ขีดจำกัดด้านอุณหภูมิใช้งานทั้งร้อนและเย็น และสำหรับการพัฒนาสูตรคอมเปานด์จากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนในอนาคตควรทดลองผสม (Blend) กับเศษพลาสติกที่เหลือมาก ๆ ในตลาดและสายงานการผลิตตัวอย่างเช่น ฟิล์ม และถุงพลาสติกที่ผลิตจากพอลิพรอพิลีน

9. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการพัฒนาสูตรคอมเปานด์สำหรับงานอัดรีดจากเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีนได้รับการจัดสรรเงินอุดหนุนโครงการวิจัยความร่วมมือภาครัฐและเอกชน ประจำปี 2545 เป็นเงิน 200,000 บาท จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลผ่านความเห็นสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

การวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลงได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานต่าง ๆ ต่อไปนี้คือ บริษัท วรกุลชัย แพ็คเกจ ซีล จำกัด บริษัท วิกเกอร์ปิคเมนท์ จำกัด สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ตลอดจนผู้ให้คำปรึกษาการวิจัยคือ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล รวมทั้งผู้ที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้อีกหลายท่าน คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

10. เอกสารอ้างอิง

[1] ชวลิต แสงสวัสดิ์ "กระบวนการทางวิศวกรรมพลาสติก" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, พ.ศ. 2540.

[2] ปิยวรรณ สุรัญชนาจิรสกุล, " การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของโพลิเมอร์ของวัสดุด้วย DSC ", เทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 9, ประจำเดือนตุลาคม-ธันวาคม 2540, หน้าที่ 78-81.

[3] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, "หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ ", ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, ประเทศไทย, 2534, หน้า 139,182.

[4] "Designing With Plastic,The Fundamentals", Engineering Plastics Division, Hoechst Celanese Corporation, USA, 1989, pp.2-3.

[5] F. Hensen, G. Stausberg, "Plastics Extrusion Technology 2nd ed.", Hanser Publishers, New York, 1997, pp. 320-323,325,625.

[6] J. Brandrup, M. Bittner, G. menges, W. Michaeli, "Recycling and Recovery of Plastics", Hanser Publishers, Germany, 1996, pp. 20-31, 599- 600.

[7] JIS Z 1527,"Polypropylene Band", Japanese Standards Association Handbook(Plastics), Japan, 1989, pp. 2211-2212.

[8] L.E.Nielsen, R.F. Landel "Mechanical Properties of Polymers and Composites", 2nd ed., Marcel Dekker Inc., USA, 1994, pp. 6, 90, 253, 255, 285, 286, 310, 315, 361-362.

[9] L. Incarnato, P. Scarfato, and D. Acierno, "Rheological and Mechanical Properties of Recycled Polypropylene", Polymer Engineering and Science, Vol. 39 No. 4, April 1999, pp. 749 - 755.

[10] R. Gachter and H. Muller, "Plastics Additives Handbook", Hanser Publishers, Germany, 1985, pp. 21-22.

[11] S.R. Sandler, W. Karo, J. Bonesteel, E.M. Pearce,"Polymer Synthesis and Characterization, A Laboratory Manual", Academic Press Limited, USA, 1996, pp. 98-107.

[12] T. Whelan and D. Dunning, "The Dynisco Extrusion Processors Hand Book", Dynisco Inc., England, 1988, pp. 153-154,157.

[13] W.F. Smith, "Principles of Materials Science and Engineering", 3 rd ed., McGraw-Hill Inc., USA, 1996, pp. 351, 365-366.

ประวัติผู้เขียนบทความ

Name : Mr.Chavalit Sangswasd

Position : Assistant Professor

Education Background :

B. Eng (Textile Chemistry), RIT, 1985.

MSc. (Polymer Science & Engineering), London, 1991.

Cert. (Plastics Processing Technology), Victoria, 1992.

Cert. (C-mold Introductory & Advanced), Taipei, 1997.

Address : Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology (Klong 6), Thunyaburi, Pathumtani, 12110, Thailand.

Tel : (662) 0-2549-3480-85

Fax : (662) 0-2549-3483

E-mail : sangswad@rit.ac.th

ประวัติผู้เขียนบทความ

Name : Mr. Weerasak Moocharoen

Position : Lecturer

Education Background :

B. Eng (Plastics Technology), RIT, 1990.

M.Eng (Mechanical Engineering), KMITL 2004.

Cert. (The Application of Computer Aided Design, Inventor 8), ACTC, 2004.

Address : Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology (Klong 6), Thunyaburi, Pathumtani, 12110, Thailand.

Tel : (662) 0-2549-3480-85

Fax : (662) 0-2549-3483

E-mail : mweera@rit.ac.th