

การศึกษาประสิทธิภาพการนำขยะขวดน้ำดื่มชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต กลับมาใช้ใหม่ด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซีเทต และโซเดียมคาร์บอเนต

ดิฐชาติ เกาะลอย^{1,*} เย็นหทัย แน่นหนา² ศิริชัย พัฒนาวานิชชัย³

¹สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพฯ

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพฯ

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author e-mail: tang-io@windowslive.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเป็นชนิดที่นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งขวดน้ำดื่ม ทำให้มีการสะสมของปริมาณขยะพลาสติกประเภทนี้ อย่างมหาศาล งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการนำขยะขวดน้ำดื่มชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตกลับมาใช้ใหม่ด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซีเทตและโซเดียมคาร์บอเนตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นตัวทำละลาย อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1 : 7.6 ที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาในพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.5 กระบวนการไกลโคไลซิสถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยเกลือของโลหะ 2 ชนิดคือ ซิงค์ (II) แอซีเทต และโซเดียมคาร์บอเนต ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือมอนอเมอร์บิส (2-ไฮดรอกซีเอทิล) เทรฟทาเลต ซึ่งศึกษาโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) โปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (H NMR) คาร์บอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (C-13 NMR) ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ และเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (DSC-TGA) ปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซีเทตและโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าผลผลิตร้อยละ 68.85 และ 65.90 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไกลโคไลซิส/ พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/ มอนอเมอร์บิส (2-ไฮดรอกซีเอทิล) เทรฟทาเลต

The study of effective recycling poly (ethylene terephthalate) soft drink bottle wastes with (CH₃COO)₂ Zn and Na₂CO₃ catalysts

Dittachat Kohloy^{1,*} Yenhatai Nanna² Sirichai Pattanawanidchai³

¹Industrial Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

²Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

³National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Pathum Thani Province

*Corresponding author e-mail: tang-io@windowslive.com

Abstract

The present consumption of plastic products has increased dramatically in response to consumer requirements. The favoured plastics, poly (ethylene terephthalate) (PET), are interested and consumed by the food-packaging sector, especially soft drink bottles. As a result, in the accumulation of an enormous quantity of plastic waste. This research study of effective recycling of poly (ethylene terephthalate) bottle wastes by glycolysis with ethylene glycol (EG) by using 1 : 7.6 molar ratio of poly (ethylene terephthalate) to EG, at 196°C temperature, for 8 hour in a nitrogen atmosphere and the percent of catalyst to poly (ethylene terephthalate) is 0.5%. The glycolysis process was catalyzed by two kind of metal salts, which were zinc acetate ((CH₃COO)₂Zn) and sodium carbamate (Na₂CO₃). The results show that the product is monomer bis (2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) was studied by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Proton nuclear magnetic resonance (H NMR), Carbon-13 nuclear magnetic resonance (C-13 NMR), Differential scanning calorimetry and Thermogravimetric analysis (TGA). Depolymerization of poly (ethylene terephthalate) was catalyzed by zinc acetate and sodium carbamate, the percentage yield is 68.85 and 65.90, respectively.

Keywords: BHET/ bis (2-hydroxyethyl terephthalate)/ glycolysis/ PET/
poly (ethylene terephthalate)

บทนำ

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly (ethylene terephthalate)) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าเพต (PET) จัดเป็นชนิดของพลาสติกในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ (Polyester) ซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เนื่องจากเพตนั้นมีสมบัติที่ดีเยี่ยมทั้งทางด้านความทนแรงดึง การทนแรงกระแทก และทนสารเคมี มีความใสสะอาด มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีความโปร่งใส มีเสถียรภาพทางความร้อน น้ำหนักเบา และราคาถูก อีกทั้งเป็นวัสดุที่มีปริมาณมหาศาลจึงมีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมวิดีโอ ออดิโอ เทป फिल्मเอกซเรย์ ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร และนำมาผลิตขวดน้ำดื่ม มีรายงานว่าเพตที่นำมาใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหาร จะไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อมนุษย์ ซึ่งได้รับการรับรองจากองค์การอาหารและยาจากประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. food and drug administration, 2015) เนื่องจากมีการใช้เพตอย่างแพร่หลายและมีจำนวนการใช้ที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลในยุคปัจจุบัน โดยในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ปริมาณการใช้เพตทั่วโลกมีมากกว่า 13 ล้านตัน ซึ่งประมาณ 1.5 ล้านตัน เป็นการนำไปใช้ในภาคบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะ (George *et al.*, 2014) ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการสะสมของปริมาณของเสียเพตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งนับวันการกำจัดของเสียเพตจะ

มีความซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าเพตจะเป็นพลาสติกชนิดที่ไม่มีปัญหาที่เกิดจากพิษของพลาสติกหรืออันตรายต่อสภาพแวดล้อมโดยตรง แต่มันก็ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานมาก อีกทั้งยังทำลายได้ยากเนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เตรียมมาจากสารที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมัน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจอย่างมาก ในการศึกษากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเสียเพตที่มีประสิทธิภาพเพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรและปกป้องสิ่งแวดล้อม

การกำจัดขยะพลาสติกแม้ว่าจะมีหลายวิธีก็ตาม แต่ละวิธีมีขอบเขตจำกัดและให้ผลในทางปฏิบัติที่ค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างเช่น วิธีกำจัดโดยการเผาพลาสติกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ แต่ต้องลงทุนสูงและอาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะเป็นพิษที่รุนแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เมื่อถูกเผาจะปล่อยแก๊สพิษออกมา ส่วนวิธีการทำลายโดยวิธีทางธรรมชาติ เช่น การนำไปฝังดินก็ไม่ได้ช่วยให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายได้ ดังนั้นวิธีการแก้ไขปัญหาวินัยหนึ่งก็คือ การนำพลาสติกที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ารีไซเคิล (Recycle) ซึ่งหมายถึงกระบวนการผลิตที่เกิดจากการนำเศษวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาผ่านกรรมวิธีผลิตเปลี่ยนสภาพให้เป็นวัตถุดิบเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ วิธีการนี้กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งเป็นวิธีการลด

ปริมาณของเสียพลาสติกและการใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่าอีกด้วย

ปัจจุบันการนำพลาสติกที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการนำไปหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้งนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพไม่ดี และวิธีการแบบนี้ใช้ได้เฉพาะพลาสติกชนิดเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) เท่านั้น ดังนั้นการย่อยสลายพลาสติกที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อทำให้โมเลกุล (Molecule) ของพอลิเมอร์ (Polymer) มีขนาดเล็กลงและสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตหรือสังเคราะห์สารอื่นๆ ได้ จึงเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และยังสามารถใช้ได้กับพลาสติกทั้งชนิดเทอร์มอพลาสติกและเทอร์โมเซต (Thermosetting plastic) (บัวแก้ว, 2543)

กระบวนการต่างๆ สำหรับการย่อยสลายเพต เช่น กระบวนการเมทาโนลิซิส (Methanolysis) ด้วยเอทานอล กระบวนการไกลโคลิซิส (Glycolysis) ด้วยเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) หรือเป็นไกลคอล (Glycol) ชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้มอนอเมอร์บิส (2-ไฮดรอกซีเอทิล) เทเรฟทาเลต (Bis(2-hydroxyethyl) terephthalate, BHET) ซึ่งมอนอเมอร์ BHET นี้จะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกต่อไป เช่น พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) พอลิยูรีเทนโฟม

ชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible polyurethane foam) หรือที่เรียกว่าแฟล็กซ์เบิลโฟม ที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เช่น เบาะรองนั่ง เก้าอี้ นวมที่นอน แผ่นรองใต้พรม หรือตัวดูดซับน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาแนวทางและวิธีในการนำขวดน้ำดื่มยี่ห้อคริสตัลที่ใช้แล้วประเภทเพตมาผ่านการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางเคมีแบบไกลโคลิซิส โดยเพตจะทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่มากเกินพอ และมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซิเตตและโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อให้ได้สารที่มีโมเลกุลเล็กลงซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือมอนอเมอร์บิส (2-ไฮดรอกซีเอทิล) เทเรฟทาเลต โดยที่สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพตจะนำมาทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางความร้อน เพื่อยืนยันว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นมอนอเมอร์บิส (2-ไฮดรอกซีเอทิล) เทเรฟทาเลต และสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

จะเห็นได้ว่าการย่อยสลายเพตให้เป็นมอนอเมอร์ BHET โดยผ่านกระบวนการไกลโคลิซิสจะมีประโยชน์มาก เนื่องจากสามารถนำเอามอนอเมอร์ BHET ไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ได้หลายชนิดดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เป็นการต่อยอดงานวิจัยของ George และคณะ ซึ่งย่อยสลายเพต

ด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส โดยใช้ เพต : เอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วนโดยโมล 1 : 7.6 (George *et al.*, 2014) ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเพตซึ่งให้ผลิตภัณฑ์สูงสุด แต่ งานวิจัยนี้จะลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลงครึ่งหนึ่งเหลือร้อยละ 0.5 เพื่อเป็นการลดต้นทุน และศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต และซิงค์ (II) แอซีเตต เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้หาง่ายและให้ผลผลิตร้อยละที่สูง (Wang *et al.*, 2014) และในการทดลองครั้งนี้ให้ความสำคัญกับสภาวะการทดลองเพียง 2 สภาวะ (ดังตารางที่ 1) เนื่องจากเป็นสภาวะและปัจจัยที่คาดว่าจะให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ (George *et al.*, 2014) และด้วยความเหมาะสมกับระยะเวลาการทดลอง ซึ่งในส่วนของสภาวะการทดลองและปัจจัยอื่นจะทำการทดลองต่อยอดในครั้งต่อไป

1. ขั้นตอนการย่อยสลายเพต

ใส่น้ำมันซิลิโคนลงในอ่างน้ำมัน และนำไปตั้งบนเตาให้ความร้อน กวนสารนำเพตที่ถูกตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กและเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมล (George *et al.*, 2014) และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักเพต (ดังแสดงในตารางที่ 1) ใส่ลงในขวดก้นกลม 3 คอ ที่มีแท่งแม่เหล็ก กวนสารรูปทรงรี นำขวดก้นกลม 3 คอ ที่เติมสารแล้วไปตั้งในอ่างน้ำมัน ต่ออุปกรณ์ได้แก่ เทอร์มอมิเตอร์ เครื่องควบแน่นแบบ

ไหลย้อนกลับและท่อนำแก๊สไนโตรเจนเข้ากับขวดก้นกลม 3 คอ ใส่อากาศออกจากระบบ โดยการเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าเบาๆ ปล่อยให้ใช้เวลา 4 นาที ปิดระบบด้วยการสวมลูกโป่งที่ปลายเครื่องควบแน่นแบบกลับไหลกลับ แล้วปิดถังแก๊สไนโตรเจน เปิดเตาให้ความร้อนโดยกวนของผสมในขวดก้นกลมตลอดเวลา ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อครบ 8 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่นร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียส ลงในขวดก้นกลมขณะที่สารยังร้อน เทสารใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร และกวนสารผสมอย่างแรงเป็นเวลา 1 นาที กรองสารผสมอย่างรวดเร็วในขณะที่ยังร้อน สารที่ได้จากการกรองประกอบด้วย 2 ส่วน คือของเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และของแข็งเป็นส่วนของสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาสำหรับของเหลวนำมาใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไประเหยน้ำออกด้วยเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ของเหลวเหลือประมาณ 500 มิลลิลิตร ปล่อยให้ของเหลวให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะเกิดผลึกของมอนอเมอร์ BHET กรองผลึกด้วยชุดกรองสารแบบลดความดัน ล้างผลึกด้วยน้ำกลั่นเย็นประมาณ 500 มิลลิลิตร นำผลึกไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ปล่อยให้

ผลึกให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 1 วัน นำผลึกที่ได้มาตกผลึกซ้ำ นำผลิต-

ภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่อง C-13 NMR, H NMR, FTIR และ TGA

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนของสารในการย่อยสลายเพต

สูตร	เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนโดยโมล PET : EG	น้ำหนัก (กรัม)			
				PET	EG	ตัวเร่งปฏิกิริยา	
1	8	196	1 : 7.6	38.40	94.34	(CH ₃ COO) ₂ Zn	0.1920
2	8	196	1 : 7.6	38.40	94.34	Na ₂ CO ₃	0.1920

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

2.1. พิสูจน์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์วิเคราะห์หาตำแหน่งโปรตอนด้วยเครื่อง H NMR ของ Bruker รุ่น ASCEND 400 ความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์

2.2. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันใช้เครื่อง FT-IR ของ Perkin Elmer รุ่น Frontier โดยนำสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งบดให้ละเอียดแล้วหยดน้ำมันมินเนอรัล (Mineral oil)

2.3. วิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสารด้วยเครื่อง TGA ของ Simultaneous DSC-TGA รุ่น SDT 2960 โดยตั้งค่าช่วงอุณหภูมิการทดสอบ 0-600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้ระบบแก๊สไนโตรเจน

ผลการวิจัย

1. ผลการย่อยสลายเพตทางเคมีด้วยวิธีไกลโคไลซิส

จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพตด้วยวิธีไกลโคไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซีเตตและโซเดียมคาร์บอเนต พบว่ามีประสิทธิภาพการย่อยสลายที่ต่างกันและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายมีปริมาณที่ต่างกัน ดังนี้

1.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละของเพต

จากการนำเพตมาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน 2 ชนิดคือ ซิงค์ (II) แอซีเตตและโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากการสังเกตพบว่าเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะเห็นว่าในสารผสมนั้นมีเพตบางส่วนที่ยังไม่ถูกย่อยสลาย จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดต่อการย่อยสลายเพต โดยการ

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละของ เพต (Conversion percentage of PET) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละของเพต

PET : EG (โมล)	เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (w/w of PET)	การเปลี่ยนแปลงของเพต (%)
1 : 7.6	8	196	0.5% (CH ₃ COO) ₂ Zn	83.83
1 : 7.6	8	196	0.5% Na ₂ CO ₃	81.20

1.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET

ผลของการย่อยสลายเพตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1 : 7.6 และใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือซิงค์ (II) แอซีเตต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นมอนอเมอร์ BHET มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว เมื่อเปรียบเทียบผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET (Yield percentage of BHET monomer) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

2. การตรวจพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของสารผลิตภัณฑ์

การตรวจพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพตด้วยเทคนิค H NMR และ C-13 NMR ของสารผลิตภัณฑ์ โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมอนอเมอร์ BHET เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นมอนอเมอร์ BHET จริง ผลจากการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค H NMR และ C-13 NMR ได้ผลสเปกตรัม ดังแสดงในภาพที่ 1, 2 และ 3

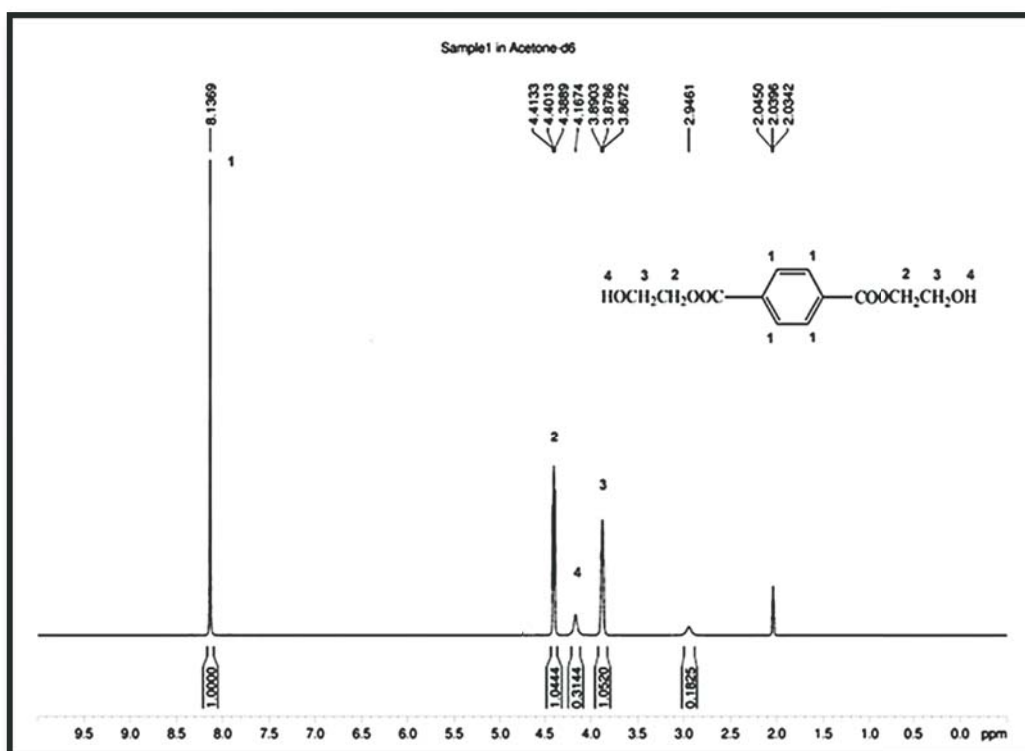
ตารางที่ 3 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET

PET : EG (โมล)	เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (w/w of PET)	ผลได้ของมอนอเมอร์ BHET (%)
1 : 7.6	8	196	0.5% (CH ₃ COO) ₂ Zn	68.85
1 : 7.6	8	196	0.5% Na ₂ CO ₃	65 .90

2.1 H NMR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต

H NMR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดจะ

ปรากฏสเปกตรัมที่คล้ายกันดังนี้ โปรตอนของ Benzene ring ที่ค่า 8.1 ppm โปรตอนของ COO-CH₂ ที่ค่า 4.4 ppm โปรตอนของ CH₂OH ที่ค่า 3.8 ppm โปรตอนของ Hydroxyl group (-OH) ที่ค่า 4.1 ppm ดังแสดงในภาพที่ 1

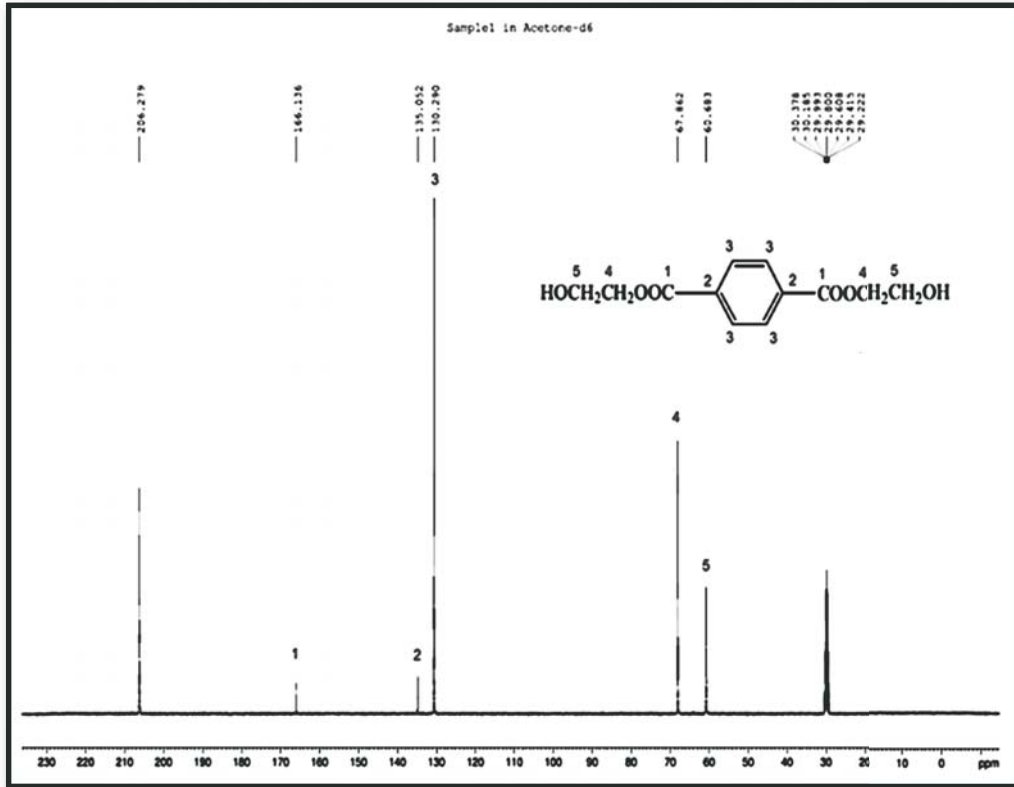


ภาพที่ 1 H NMR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2 C-13 NMR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต

C-13 NMR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดปรากฏสเปกตรัมที่คล้ายกัน ดังนี้

-COO- ที่ค่า 166.136 ppm aromatic ที่ค่า 135.052 ppm C-H aromatic ที่ค่า 130.290 ppm -COOCH₂- ที่ค่า 67.862 ppm -CH₂OH ที่ค่า 60.683 ppm ดังแสดงในภาพที่ 2

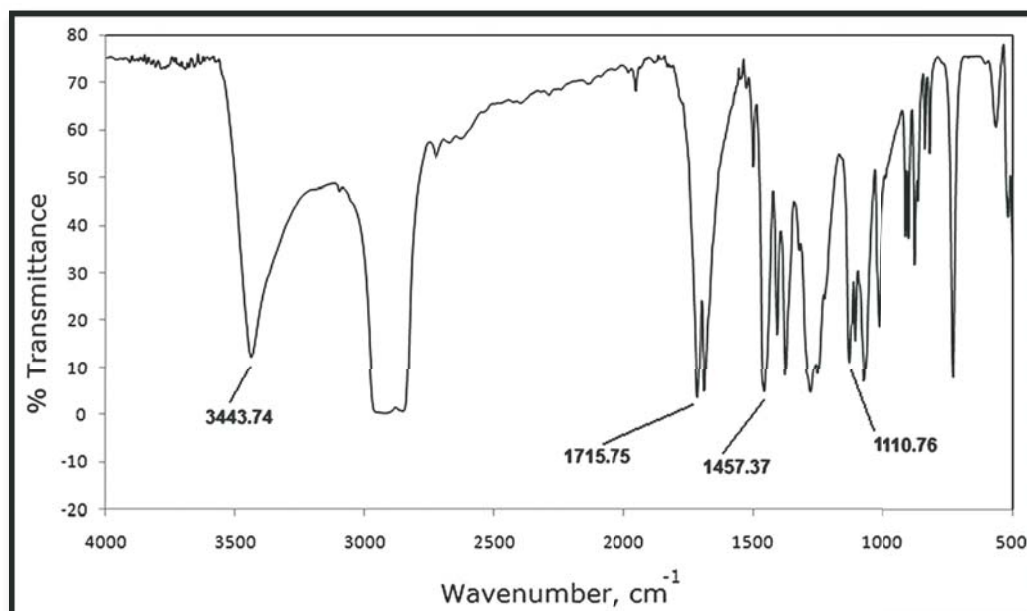


ภาพที่ 2 C-13 NMR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 FT-IR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต

FT-IR สเปกตรัมของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดปรากฏสเปกตรัมที่คล้ายกัน ดังนี้ O-H stretching

ที่ 3443 และ 1133 cm^{-1} C=O stretching ของหมู่ -COO- ที่ 1715 และ 1279 cm^{-1} C-H stretching ของ Aromatic ที่ 1411-1503 cm^{-1} C-H stretching ของหมู่ Alkyl ที่ 2855 cm^{-1} stretching ของหมู่ C-O-C ที่ 1110 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 3

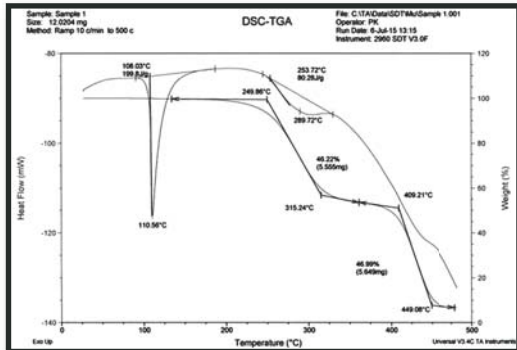


ภาพที่ 3 FT-IR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต โดยใช้ซิงค์ (II) แอซีเตตตัวเร่งปฏิกิริยา

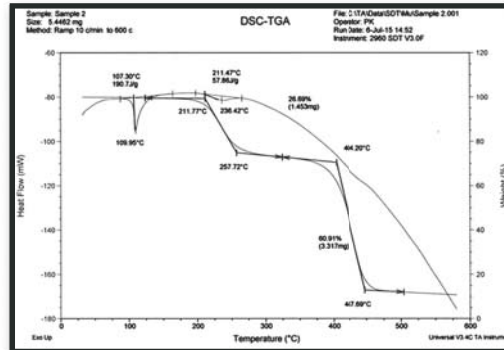
2.4 DSC-TGA เทอร์โมแกรมของ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต

DSC-TGA เทอร์โมแกรมของ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต ปรากฏสมบัติทางความร้อนของสาร ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญดังนี้ ปรากฏ ลักษณะเฉพาะทางความร้อนที่แสดงถึง อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, Tm) และอุณหภูมิที่ทำให้ เกิดการเสื่อมสลาย (Degradation temperature, Td) คล้ายกับมอนอเมอร์ BHET (Fonseca *et al.*, 2010) โดยสาร ผลิตภัณฑ์ทั้งสองปรากฏอุณหภูมิการ หลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเสื่อม สลาย (Degradation temperature, Td)

จะปรากฏสัญญาณการสูญเสียน้ำหนัก 2 ชั้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อย สลายเพตโดยใช้ซิงค์ (II) แอซีเตต ปรากฏ สัญญาณการสูญเสียน้ำหนักชั้นแรกที่เกิด จากการเสื่อมสลายตัวทางความร้อนของ มอนอเมอร์ BHET ประมาณร้อยละ 46.22 ที่อุณหภูมิ 249.86 องศาเซลเซียส และชั้น ที่ 2 เกิดจากการเสื่อมสลายตัวทางความ ร้อนของพอลิเมอร์เพต ประมาณร้อยละ 46.99 ที่อุณหภูมิ 409.21 องศาเซลเซียส ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพต โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา ปรากฏสัญญาณการสูญเสีย น้ำหนักชั้นแรกร้อยละ 26.69 ที่อุณหภูมิ 211.77 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2 ร้อยละ 60.91 ที่อุณหภูมิ 404.20 องศาเซลเซียส



(1)



(2)

ภาพที่ 4 DSC-TGA เทอร์มोगรามของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต
เร่งปฏิกิริยาด้วย (1) ซิงค์ (II) แอซีเทต (2) โซเดียมคาร์บอเนต

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของสารผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 นั้น พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sabagh และคณะ ได้รายงานว่าการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของมอนอเมอร์ BHET ด้วยเทคนิค TGA เทอร์มोगรามที่ได้จะมีลักษณะเฉพาะคือปรากฏสัญญาณการสูญเสียน้ำหนัก 2 ชั้น โดยชั้นแรกประมาณร้อยละ 32 ที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส เกิดจากการเสื่อมสลายตัวทางความร้อนของมอนอเมอร์ BHET โดยพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมไนโมเลกุลของมอนอเมอร์ BHET จะถูกทำลายและทำให้สารเกิดการระเหยไปบางส่วน จากนั้นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนของการวิเคราะห์ TGA มอนอเมอร์ BHET จะเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แล้วได้เป็นพอลิเมอร์เพต ที่อุณหภูมิ 270 - 285 องศาเซลเซียส จึงทำให้ปรากฏสัญญาณการ

สูญเสียน้ำหนักชั้นที่ 2 ประมาณร้อยละ 60 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เพต (Sabagh *et al.*, 2014) แต่จาก DSC เทอร์มोगรามของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพตโดยใช้ซิงค์ (II) แอซีเทต และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ปรากฏสัญญาณการดูดพลังงานความร้อนที่ประมาณ 289 และ 211 องศาเซลเซียส ซึ่งลักษณะของพีคจะไม่คมมาก แสดงให้เห็นว่าในสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ อาจมีสารโมเลกุลใหญ่ คือไดเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทดลองในขั้นตอนของการกรองสารที่ยังไม่ตึง ทำให้อาจไม่สามารถแยกไดเมอร์ หรือโอลิโกเมอร์ออกจากผลิตภัณฑ์ได้หมด และที่สำคัญยังมีผลมาจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีการรายงานจากทดลองของ Wang และ

คณะ ถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเกลือของโลหะ ซึ่งพบว่า Zn^{2+} มีประสิทธิภาพมากกว่า Na^+ และ K^+ (Wang *et al.*, 2015)

อภิปรายผล

จากผลการทดลองการย่อยสลายเพตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 : 7.6 อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต พบว่ามีค่าผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 65.90 ซึ่งต่างจากการวิจัยของ George *et al.* (2014) ที่ย่อยสลายเพตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1 : 7.6 ที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แต่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของเพต ซึ่งมีค่าผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 70 จะเห็นว่าการทดลองในครั้งนี้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณที่น้อยกว่า และมีค่าผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET ที่น้อยกว่าร้อยละ 4.1 ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Lopez *et al.* (2011) ที่ได้รายงานว่ามีค่าผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากขึ้น และในการ

วิจัยของ Yue และคณะ (2013) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $[Bmim]ZnCl_3$ ร้อยละ 0.16 โดยน้ำหนักของเพต มีผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 36.0 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $[Bmim]ZnCl_3$ เป็นร้อยละ 0.31 โดยน้ำหนักของเพต ผลได้ของมอนอเมอร์ BHET จะเพิ่มเป็นร้อยละ 79.5 จะเห็นว่าผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากถ้ามีตัวเร่งปฏิกิริยามาก เกลือของโลหะจะสามารถเข้าจับกับออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ได้มาก ทำให้คาร์บอนของหมู่คาร์บอนิลมีสภาพเป็นบวกมาก เอทิลีนไกลคอลจึงเข้าจับกับคาร์บอนของหมู่คาร์บอนิลได้ง่าย ปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็ว และให้ผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET ที่สูง

ในกรณีของการย่อยสลายเพตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 : 7.6 ที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ (II) แอซีเตตในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต พบว่ามีค่าผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 68.85 ซึ่งต่างจากการวิจัยของ George *et al.* (2014) ที่ย่อยสลายเพตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 : 6 ที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ซิงค์ (II) แอซีเตต

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต มีค่าผลได้ของมอนอเมอร์ร้อยละ 63 จะเห็นว่าผลการทดลองในครั้งนี้มีค่าผลได้ร้อยละของมอนอเมอร์ BHET ที่สูงกว่า เนื่องจากมีการใช้เอทิลีนไกลคอลในสัดส่วนโดยโมลที่มากกว่า การใช้เอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่มากขึ้น จะช่วยให้สารนั้นมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น และโมเลกุลของเอทิลีนไกลคอลมีโอกาที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของเพตได้มากขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Gheamy & Behzadi (2002) ซึ่งได้รายงานว่าในปฏิกิริยาการย่อยสลายเพตที่ใช้เอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 20 : 28.68 กรัม จะได้มอนอเมอร์ BHET ปริมาณ 1 กรัม แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอลเป็น 20 : 32.30 กรัม จะได้มอนอเมอร์ BHET ปริมาณ 4 กรัม จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอล จะส่งผลให้มีค่าผลได้ร้อยละมอนอเมอร์ BHET สูงขึ้น

สรุป

ผลการทดลองครั้งนี้พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพตทั้งสองปฏิกิริยานั้น ได้เป็นมอนอเมอร์ BHET ซึ่งได้รับการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR, ¹H NMR, ¹³C NMR และ DSC-TGA โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายเพต โดยใช้เอทิลีน

ไกลคอลในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1: 7.6 อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง และใช้ซิงค์ (II) แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต มีประสิทธิภาพการย่อยสลายเพตที่ดีกว่า โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงของเพตร้อยละ 83.83 และค่าผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 68.85 ซึ่งมากกว่าใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพต ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงของเพตร้อยละ 81.20 และค่าผลได้ของมอนอเมอร์ BHET ร้อยละ 65.90

จากผลการทดลองในแง่ของการลงทุนน่าจะเลือกใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายเพต เพราะโซเดียมคาร์บอเนต (700 บาท/500 กรัม) ถูกกว่าซิงค์ (II) แอซีเตต (1160 บาท/500 กรัม) (ร้านวิโรฒวิทยากันท์, 2559)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

- กิตติภูมิ กลับดี. (2547). การเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเศษผ้าพอลิเอสเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกศินี ปฐมวัฒน์ศักดิ์. (2548). การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์จากน้ำมันปาล์มและขวดPETที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บัวแก้ว เวสสบุตร. (2543). การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์สำหรับงานเคลือบผิวจากขวดPETที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เย็นหทัย แน่นหนา. (2549). สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วารุณี อริยวิริยนันท์ ฉัตรชัย กันยาจูน นที ศรีสวัสดิ์ และจินทนา สุดแดน. (2552). การพัฒนาวัสดุเหลือใช้จากขวดน้ำดื่มใสชนิดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตมาเตรียมเป็นเส้นใยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- วิโรฒวิทยานันท์. (2559). สารเคมี. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2559, จาก <http://www.vittayapun.com/category/สารเคมี/>
- วีรพงษ์ สัจจาล. Thermogravimetric Analysis (TGA). สืบค้นเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2558, จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/thermalanalysis/thermogravimetric-analysis-tga.html>
- สุภาพ ธาราศักดิ์. (2540). การศึกษาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล. (2540). การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดPETที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bartolome, L., Imran, M., Cho, B.G., Al-Masry, W.A., & Kim, D.H. (2012). Recent Developments in the chemical Recycling of PET. Material Recycling-Trends and Perspectives.

- Campanelli, J., Kamal, M., & Cooper, D. (1994). Kinetics of glycolysis of poly (ethylene terephthalate) melts. **J. Appl. Polym. Sci.**, 54(11), 1731-1740.
- Chen, J., & Chen, L. (1999). The Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate). **J. Appl. Polym. Sci.**, 73(1), 35-40.
- Chen, F., Wang, G., Li, W., & Yang, F. (2013). Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate) over Mg-Al Mixed Oxides Catalysts Derived from Hydrotalcites. **Ind. Eng. Chem Res.**, 52.
- George, N., & Kurian, T. (2014). Recent Developments in the Chemical Recycling of Post consumer Poly (ethylene terephthalate) Waste. **Ind. Eng. Chem.**, 53, 14185-14198.
- Ghaemy, M., & Mossaddegh, K. (2005). Depolymerization of poly (ethylene terephthalate) fibre waste using ethylene glycol. **Polymer Degradation and Stability**, 90(3), 570-576.
- Imran, M., Kim, B.K., Han, M., Cho, B.G., & Kim, D.H. (2010). Sub- and super critical glycolysis of polyethylene terephthalate (PET) into the monomer bis(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET). **Polymer Degradation and Stability**, 95, 1686-1693.
- Lee, Y.S., Kim, Y.J., Kim, G.W., Kim, J.H., & Lee, S.M. (2012). **Polyester thread for an air bag and preparation method thereof**. Retrieved September 29, 2011.
- Lopez, F.R., Duque, I.I., De, R.B., Arnaiz, S., & Gutierrez-Ortiz, J.I. (2010). Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts. **Polymer Degradation and Stability**, 95, 1022-1028.
- Lopez, F.R., Digue, I.I, Rivas, B.D., Flores, G.L., & Gutierrez, O.J. (2011). Kinetics of catalytic glycolysis of PET wastes with sodium carbonate. **Chemical Engineering Journal**, 168, 312-320.

- Sabagh, A.W., Yehia, F.C., Eissa, A.M.F., Moustafa, M.E., Eshaq, G.H., ElMetwally, A.E., & Rabie, A.M. Cu- and Zn-acetate-containing ionic liquids as catalysts for the glycolysis of poly (ethylene terephthalate). **Polymer Degradation and Stability**, 110, 364-377.
- Satuart, B. (2004). **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons, Ltd.
- U.S. food and drug administration. (2015). **Guidance for Industry: Use of Recycled Plastics in Food Packaging: Chemistry Considerations**.
- Wang, H., Lui, Y., Li, Z., Zhang, S., & Zhang, Y. (2009). Glycolysis of poly (ethylene terephthalate) catalyzed by ionic liquids. **European Polymer Journal**, 45, 1535–1544.
- Wang, H., Yan, R., Li, Z., Zhang, X., & Zhang, S. (2010). Fe-containing magnetic ionic liquid as an effective catalyst for the glycolysis of poly (ethylene terephthalate). **Catalysis Communications**, 11, 763–767.
- Wang, S., Wang, C., Wang, H., Chen, X., & Wang, S. (2015). Sodium titanium tris (glycolate) as a catalyst for the chemical recycling. **Polymer Degradation and Stability**, 114, 105-114.
- Xi, G., Lu, M., & Sun, C. (2005). Study on deploy merization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis (2-hydroxyethyl terephthalate). **Polymer Degradation and Stability**, 87, 117-120.
- Yue, Q.F., Xiao, L.F., Zhang, M.L., & Bai, X.F. (2013). The Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate) Waste: Lewis Acidic Ionic Liquids as High Efficient Catalysts. **Polymer**, 5, 1258-1271.
- Zhu, M., Li, Z., Wang, Q., Zhou, X., & Lu, X. (2012). Characterization of Solid Acid Catalysts and Their Reactivity in the Glycolysis of Poly (ethylene terephthalate). **Ind. Eng. Chem. Res**, 51, 11659-11666.