



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลกระทบของสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำในกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ที่มี ต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล

Effect of Crosslinking Agents and Sauna Periods in Crosslinking Process on Mechanical and Physical Properties of Recycled Polyoxymethylene

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร¹ อนูชิต คงฤทธิ์^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jittiwat Nithikarnjanatharn¹ Anuchit Khongrit^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Industrial Management (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

*Corresponding author.

E-mail: anuchit.kh@nrru.ac.th; Telephone: 08 5860 3339.

วันที่รับบทความ 11 กันยายน 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 3 ตุลาคม 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 18 พฤศจิกายน 2561; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 3 13 มกราคม 2562; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 4 5 กุมภาพันธ์ 2562; วันที่ตอบรับบทความ 11 มีนาคม 2562

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลโดยใช้เทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยสารเชื่อมโยงโซ่ โดยทำการศึกษา 2 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมโยง (1 3 และ 5 ส่วนเทียบกับร้อยละ) และระยะเวลาการอบไอน้ำ (0 24 72 และ 120 ชั่วโมง) ขั้นตอนการกราฟท์กระทำโดยเครื่องอัดรีดสกรู จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการกดอัดร้อน และขั้นตอนการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่โดยใช้อุณหภูมิ การทดสอบสมบัติทางกลได้แก่ สมบัติแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทกการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพได้แก่ การทดสอบดัชนีการหลอมไหล และสัณฐานวิทยา จากนั้นทำศึกษาอิทธิพลของทั้งสองปัจจัยด้วยกระบวนการทางสถิติ ผลการวิจัยพบว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้น แต่ทำให้อัตราการหลอมไหลลดลง การเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลลดลง การวิเคราะห์รอยแตกหักแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสัณฐานที่สัมพันธ์กับสมบัติทางกล ท้ายที่สุดพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 5 ส่วนเทียบกับร้อยละ และใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมงมีค่าสมบัติทางกลเทียบเคียงกับพอลิออกซีเมทิลีนเม็ดใหม่ แต่ยังมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ

พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล สารเชื่อมโยง การเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลน สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ

Abstract

This research was aimed to improve the mechanical properties of recycled polyoxymethylene using chain crosslinking technique with silane crosslinking agents. Two factors were investigated, namely the number of crosslinking agents (1, 3 and 5 parts per hundred part of resin) and the duration of steaming (0, 24, 72 and 120 hours). The grafting process was performed using a twin-screw extruder machine, followed by molding the test specimens with hot compressor molding process. The crosslinking formation was completed with a steamer. The testing of mechanical properties included tensile strength, hardness, and impact resistance. The analysis of physical properties was performed via Melt Flow Index and morphology measurements. Subsequently, the influences of both factors were investigated via statistical analysis. Results showed that both factors significantly affected the mechanical properties of recycled polyoxymethylene. The increased amount of crosslinking resulted in an increase in tensile strength, elongation percentage, and impact resistance of recycled polyoxymethylene. However, it was found that the Melt Flow Index decreased. Similarly, the increased steaming time resulted in a decreased tensile strength, elongation percentage, and impact resistance of recycled polyoxymethylene. Analysis of the fracture demonstrated correlation between morphological changes and mechanical properties. Finally, recycled polyoxymethylene with crosslinking agents at five parts per hundred and 24-hour steaming period showed mechanical values comparable to new polyoxymethylene granules. However, the impact resistance remained lower.

Keywords

recycled polyoxymethylene; crosslinking agent; silane crosslinking; mechanical properties; physical properties

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ โดยเฉพาะกระบวนการฉีดขึ้นรูปเกิดของเสียที่เป็นเศษซาก (scrap) จำนวนมาก เช่น เศษครีป (flashing) เศษทางวิ่ง (runner) เป็นต้น ซึ่งวิธีการจัดการของเสียเหล่านี้ได้แก่ การส่งขายให้กับธุรกิจรีไซเคิลเพื่อดำเนินการแปรรูปนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการแปรสภาพทางกลหรือทางเคมี [1] หรือนำเศษซากที่มีคุณภาพดีมาผสมในกระบวนการฉีดเพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งวิธีการนี้ต้องทำการศึกษารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดให้เหมาะสมโดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสำคัญ [2,3] เพราะพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีสมบัติที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นเม็ดใหม่เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพในการผลิต และการใช้งาน

พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลเป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูงเนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในระบบวัสดุรีไซเคิลได้ ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมพลาสติกจำนวนมากมีการใช้วัสดุที่รีไซเคิลที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของตนเองเพื่อลดขยะของเสียในอุตสาหกรรม ขยะของพอลิออกซีเมทิลีนจะผ่านกระบวนการคอมพิวเตอร์ออกมาในรูปแบบของเม็ดรีไซเคิล (regranulate) แต่โดยทั่วไป เม็ดเหล่านี้จะมีคุณภาพที่ต่ำกว่าเม็ดใหม่ เช่นเดียวกันกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ [4] ที่ผ่านมาผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีไซเลน (silane technology) มาใช้เพื่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์รีไซเคิลโดยศึกษาการนำพอลิพรพิลีนรีไซเคิลมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและเติมสารคู่ควบปฏิกิริยาชนิดไซเลน (silane coupling agent) โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้ และ



รูปที่ 1 พอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิลจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ต้องการให้มีสมบัติทางกลที่สูงขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษานี้พบว่าการเติมสารคู่ควบทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ความทนต่อแรงกระแทกลดลง และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมในการศึกษานี้ยังไม่เทียบเท่ากับพอลิเมอร์ที่เป็นเม็ดใหม่ [5] นอกจากนี้ยังได้ใช้เทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลน (silane crosslinking technique) เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยการเชื่อมโยงสายโซ่ให้มีโครงสร้างเป็นร่างแห ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการนี้คือปริมาณการเติมสารเชื่อมโยง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่ [6,7] โดยผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึง และค่าความต้านทานแรงกระแทกเทียบเท่ากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเม็ดใหม่ แต่ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าร้อยละการยืดตัวยังต่ำกว่า [8] ต่อมาจึงได้นำเทคนิคเดียวกันนี้ไปปรับปรุงสมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล โดยผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมได้เล็กน้อย แต่ยังไม่เทียบเคียงกับพอลิโพรพิลีนเม็ดใหม่ได้ [9] การศึกษาล่าสุดได้ใช้เทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลนเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิออกซิเมทิลีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ทางวิศวกรรม เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสารเชื่อมโยงสายโซ่ และระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ผลการศึกษาปรากฏว่าสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึง และร้อยละการยืดตัวที่สูงกว่าเดิม อีกทั้งสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ด้วยกระบวนการฉีด [10]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของพอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิล (r-POM) ในงานวิจัยนี้

สมบัติ	ค่าเฉลี่ย และช่วงความคลาดเคลื่อน	หน่วย
ดัชนีการหลอมไหล	12.58 ± 0.01	g/10min
ความต้านทานแรงดึง	54.07 ± 0.70	MPa
มอดูลัสความยืดหยุ่น	933.12 ± 34.96	MPa
ร้อยละการยืดตัว	73.58 ± 3.25	%
ความแข็ง	74.10 ± 0.43	shore D
ความต้านทานแรงกระแทก	3.30 ± 0.27	kJ/m ²

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยเห็นว่าการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลนสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิลได้ ซึ่งพอลิเมอร์วิศวกรรมชนิดนี้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น จึงเกิดเศษซากที่เป็นขยะพลาสติกมากขึ้นเช่นกัน การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของระดับปัจจัยในกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่โดยใช้วิธีการทางสถิติ และหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติทางกลของพอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้นเทียบเคียงหรือสูงกว่าพอลิออกซิเมทิลีนเม็ดใหม่ โดยมีความมุ่งหวังว่าผลการวิจัยนี้จะเป็นทางเลือกเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกรีไซเคิล ตลอดจนเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

พลาสติกพอลิออกซิเมทิลีนเกรดสำหรับงานฉีดขึ้นรูป ซึ่งรีไซเคิลจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (recycle polyoxymethylene) ดังรูปที่ 1 โดยสมบัติของพอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิลในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 สารเคมี

ตารางที่ 2 ตัวแบบทดลองในการวิจัยนี้

ชื่อตัวแบบทดลอง	ปริมาณสารเชื่อมโยง (phr) (A)	ระยะเวลาการอบไอน้ำ (hour) (B)
r-POM/1/0	1	0
r-POM/1/24	1	24
r-POM/1/72	1	72
r-POM/1/120	1	120
r-POM/3/0	3	0
r-POM/3/24	3	24
r-POM/3/72	3	72
r-POM/3/120	3	120
r-POM/5/0	5	0
r-POM/5/24	5	24
r-POM/5/72	5	72
r-POM/5/120	5	120

อื่น ๆ ได้แก่ สารเชื่อมโยงไวโนลไตรเมทอซซิลเลน (vinyltrimethoxysilane, VTMS) silquest a-171 สารริเริ่มปฏิกิริยา ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) เกรดอุตสาหกรรม สารต้านการเสื่อมสภาพจากความร้อน anox pp18p และ alkanox 240 ของบริษัท ออฟติมอลเทค จำกัด

2.2 การออกแบบการทดลอง และการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติ

การออกแบบการทดลอง และการดำเนินงานวิจัยนี้ ดำเนินการเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10] การวิเคราะห์ผลทางสถิติในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป minitab ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (factorial design) สำหรับการวิจัยนี้สามารถแสดงในตารางที่ 2 ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมโยง (A) 3 ระดับ คือ 1 3 และ 5 phr และระยะเวลาในการอบไอน้ำ (B) ที่อุณหภูมิ 70°C ทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ 0 24 72 และ 120 ชั่วโมง ตัวแบบทดลองทั้งสิ้น 12 ชุด โดยแต่ละตัวแบบการทดลองทำ 5 ซ้ำ

ตารางที่ 3 อุณหภูมิการผสมในแต่ละส่วนของเครื่องอัดรีดสกรูคู่ในงานวิจัยนี้

ส่วนการผสม	อุณหภูมิ (°C)
ส่วนป้อน (feeding section)	170 ± 2
ส่วนอัด 1 (compression section 1)	170 ± 2
ส่วนอัด 2 (compression section 2)	180 ± 2
ส่วนส่งรีด 1 (metering section 1)	180 ± 2
ส่วนส่งรีด 2 (metering section 2)	200 ± 2
ส่วนแม่พิมพ์ปลายเปิด (die section)	200 ± 2

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเริ่มต้นจากนำเม็ดพอลิออกซิเมทิลีนรีไซเคิล (r-POM) ผสมกับสารริเริ่มปฏิกิริยาไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ในปริมาณ 0.1 phr (part per hundred of resin) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้ DCP ละลายเคลือบผิวเม็ดพลาสติก จากนั้นเติมสารเพิ่มเสถียรภาพในสัดส่วน 0.1 phr และทำการผสมด้วยเครื่องผสมทางกล (mechanical mixer) ให้เข้ากันประมาณ 10 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมโยงไวโนลไตรเมทอซซิลเลน (VTMS) ในปริมาณต่าง ๆ ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ ผสมด้วยเครื่องผสมทางกลอีกครั้งประมาณ 10 นาที เสร็จแล้วอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder mixture) ที่มี L/D ratio เท่ากับ 40 อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 3 เมื่อพอลิเมอร์ผสมไหลออกจากแม่พิมพ์แล้วทำการหล่อเย็นด้วยน้ำจากนั้นใช้เครื่องตัดให้เป็นพลาสติกเม็ดเล็ก ๆ เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติด้วยวิธีกดอัดร้อน (hot compression molding) อุณหภูมิ 180°C ที่ความดัน 1,500 psi จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เข้าตู้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลาต่าง ๆ ตามที่ได้มีการออกแบบการทดลองไว้ ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ความเร็วการดึงเคลื่อนที่ 50 มิลลิเมตร/นาที บันทึกผลค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และ ร้อยละการยืดตัว (% elongation) การทดสอบความแข็งแบบชอร์ ดี (shore D) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 น้ำหนักกด 10 แร่งปอนด์ การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยพลังงานกระแทก 2.7 จูล

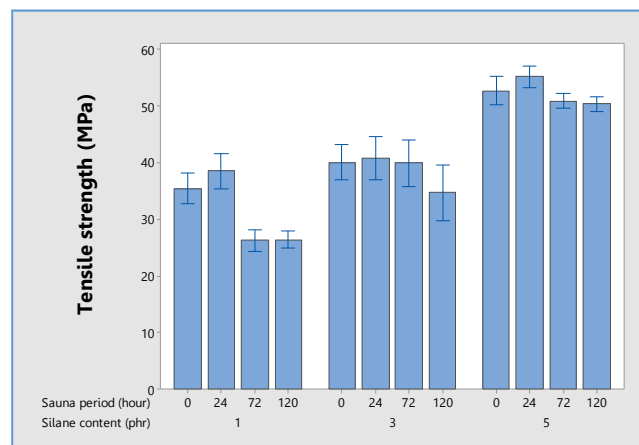
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D 1238 ที่อุณหภูมิ 190°C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

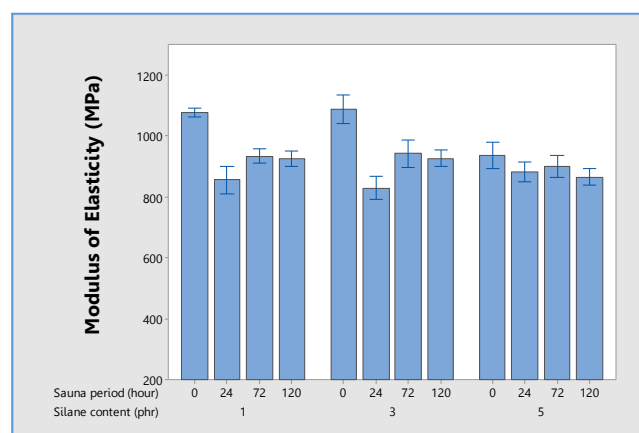
เมื่อทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพแต่ละตัวแบบทดลองแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลทางสถิติและแสดงผลในรูปแบบของกราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ย (mean) และช่วงความคลาดเคลื่อน (error bar) จากนั้นทำการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (two way ANOVA) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) และสร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนเกรดรีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ ตลอดจนนำผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพประกอบการอภิปรายผล

3. ผลการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงพบว่า กลุ่มตัวแบบทดลองที่เติมสารเชื่อมโยง 5 phr มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด

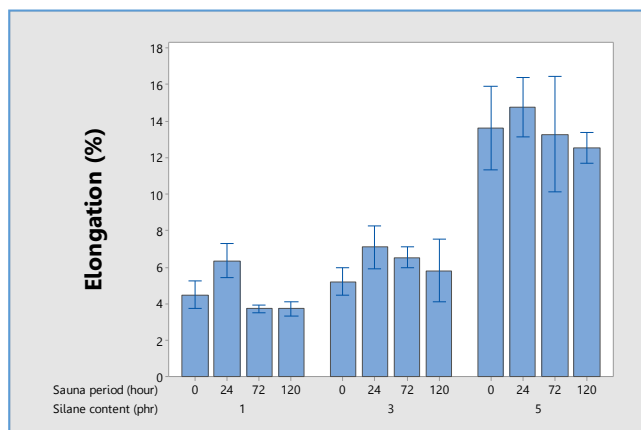


รูปที่ 2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

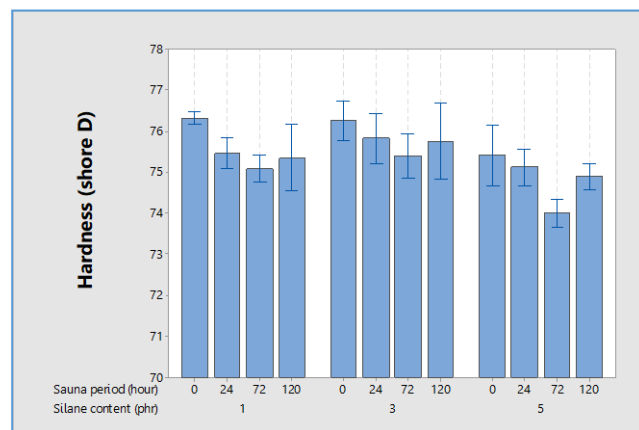
รองลงมาคือกลุ่มตัวแบบทดลองที่เติมสารเชื่อมโยง 3 และ 1 phr ตามลำดับ เช่น พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/5/0 มีค่าความต้านทานแรงดึง 52.66 MPa ตัวแบบทดลอง r-POM/3/0 มีค่าเฉลี่ย 40.08 MPa และตัวแบบทดลอง r-POM/1/0 มีค่าเฉลี่ย 35.48 MPa การอบไอน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาอบไอน้ำมากขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลลดลง เช่น พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 5 phr และอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง (r-POM/5/24) มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 55.18 MPa และลดลงเหลือ 50.91 MPa และ 50.40 MPa เมื่อเพิ่มเวลาการอบไอน้ำเป็น 72 และ 120 ชั่วโมงตามลำดับรูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล



รูปที่ 4 ผลการทดสอบความคร่ำยละการยืดตัว

ไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 1 phr (r-POM/1/0) มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 1077.10 MPa เมื่อเติมสารเชื่อมโยง 3 phr (r-POM/3/0) มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 1089.39 MPa เมื่อเติมสารเชื่อมโยง 5 phr (r-POM/5/0) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเป็น 937.81 MPa และเมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำแล้วค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง โดยตัวแบบทดลอง r-POM/1/24, r-POM/3/24 และ r-POM/5/24 มีค่าเป็น 857.37, 830.68 และ 884.60 MPa ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำเป็น 72 ชั่วโมง ทำให้พอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยงทั้ง 1, 3 และ 5 phr (r-POM/1/72, r-POM/3/72 และ r-POM/5/72) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงต่ำกว่าพอลิออกซี-เมทิลีนที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำ และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดต่ำลงอีกครั้งเมื่อเพิ่มเวลาการอบไอน้ำเป็น 120 ชั่วโมง

รูปที่ 4 แสดงค่าร้อยละการยืดตัวในงานวิจัยนี้ พบว่าเมื่อเติมสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวของพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้นตามลำดับ โดยตัวแบบทดลอง r-POM/1/0, r-POM/3/0 และ r-POM/5/0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.48 5.21 และ 13.62 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาการอบไอน้ำทำให้พอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงขึ้น โดยโดยตัวแบบทดลอง r-POM/1/24 มีค่าเป็นร้อยละ 6.37 ตัวแบบทดลอง r-POM/3/24 มีค่าเป็นร้อยละ 7.10 และตัวแบบทดลอง r-POM/5/24 มีค่าเป็นร้อยละ 14.77 แต่เมื่อ

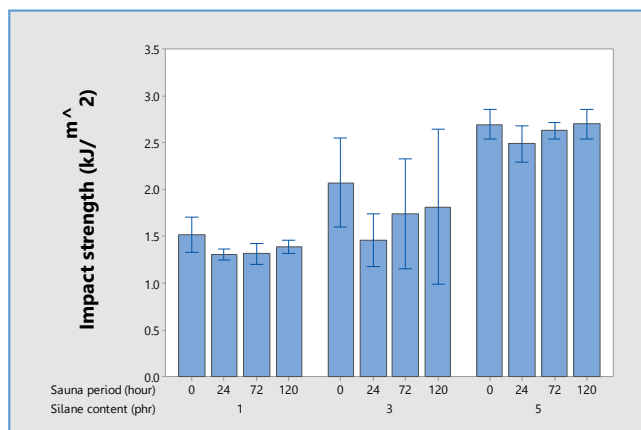


รูปที่ 5 ผลการทดสอบความค่าความแข็ง

เพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำเป็น 72 และ 120 ชั่วโมง ทำให้ร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง เช่น พอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 3 phr อบไอน้ำที่ 72 ชั่วโมง (r-POM/3/72) มีค่าร้อยละการยืดตัว 6.55 เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำเป็น 120 ชั่วโมง (r-POM/3/120) มีค่าลดลงเหลือร้อยละ 5.82

ผลการทดสอบค่าความแข็งของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5 โดยทุกตัวแบบการทดลองจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 74 shore D ถึง 76.33 shore D พอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 1 phr (r-POM/1/0) มีค่าความแข็ง 76.33 shore D เมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำที่ 24 (r-POM/1/24), 72 (r-POM/1/72) และ 120 ชั่วโมง (r-POM/1/120) จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยลดลงเหลือ 75.47 75.10 และ 75.37 shore D ตามลำดับ สำหรับพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 3 phr และ 5 phr มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยตัวแบบทดลอง r-POM/3/0 มีค่า 76.27 shore D และลดลงเหลือ 75.83 เมื่อผ่านการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง เมื่ออบไอน้ำถึง 120 ชั่วโมงจะมีค่าความแข็ง 75.77 shore D และตัวแบบทดลอง r-POM/5/0 มีค่า 75.43 shore D เมื่อผ่านการอบไอน้ำ 120 ชั่วโมงจะมีค่าความแข็งเฉลี่ย 74.90 shore D

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 1 phr (r-POM/1/0) มีค่าเฉลี่ย 1.52 kJ/m² จากนั้นเพิ่มเป็น 2.07 kJ/m² เมื่อเติมสารเชื่อมโยง 3 phr (r-POM/3/0) และหากเติม

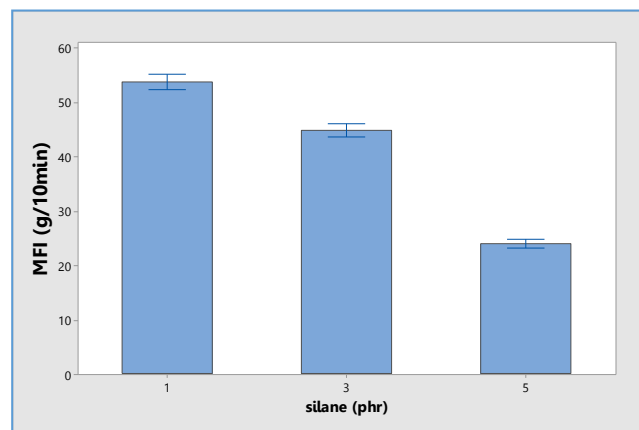


รูปที่ 6 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

สารเชื่อมโยง 5 phr (r-POM/5/0) ทำให้มีค่าสูงขึ้นเป็น 2.69 kJ/m² ตัวแบบทดลอง r-POM/1/24 r-POM/3/24 และ r-POM/5/24 ที่ผ่านการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง พบว่าทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงโดยมีค่าเฉลี่ย 1.31 1.47 และ 2.49 kJ/m² ตามลำดับ แต่ตัวแบบทดลองที่ใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำเป็น 72 และ 120 ชั่วโมง ค่าความต้านทานแรงกระแทกพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาการอบไอน้ำ เช่น ตัวแบบทดลอง r-POM/5/72 มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 2.63 kJ/m² และเพิ่มเป็น 2.70 kJ/m² เมื่อใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำ 120 ชั่วโมง (r-POM/5/120)

การทดสอบ และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลของการวิจัยนี้ พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 1 phr (r-POM/1/0) มีค่าเฉลี่ย 53.82 กรัม/10 นาที เมื่อเพิ่มสารเชื่อมโยงเป็น 3 phr (r-POM/3/0) ทำให้ดัชนีการหลอมไหลลดลงเป็น 44.88 กรัม/10 นาที และลดลงเหลือ 24.06 กรัม/10 นาทีเมื่อเติมสารเชื่อมโยง 5 phr (r-POM/5/0)

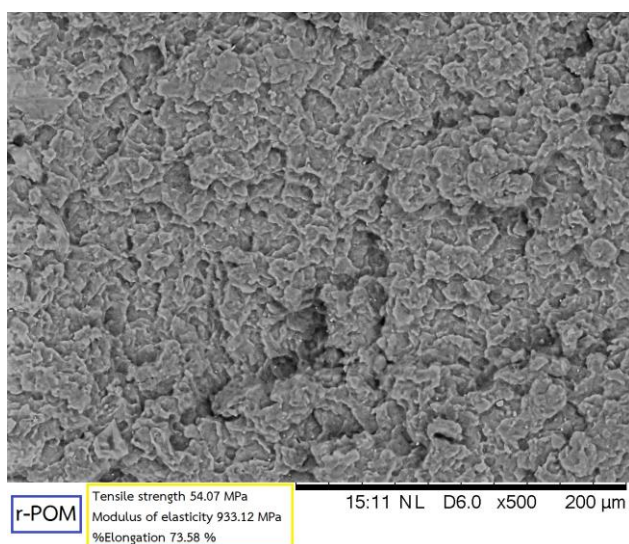
หลังจากการทดสอบสมบัติแรงดึงของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลองต่าง ๆ แล้ว ได้นำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 8 แสดงผิวรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล (r-POM) รอยแตกหักที่



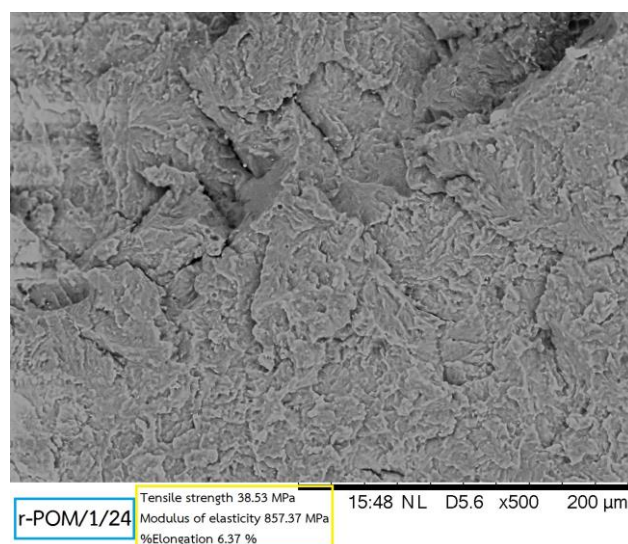
รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

พบมีความขรุขระอย่างเห็นได้ชัด แต่มีลักษณะของเฟสที่เป็นเนื้อเดียวกัน

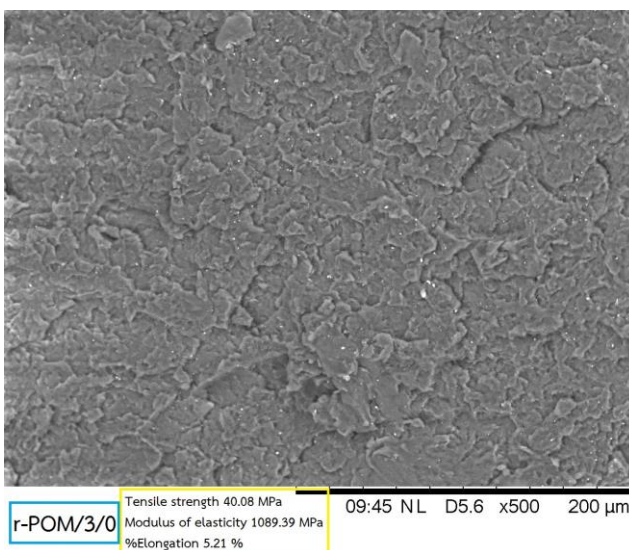
รูปที่ 9 แสดงผิวรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/1/24 พบเห็นรอยหักอย่างชัดเจนสภาพรอยแตกหักโดยรวมมีความราบเรียบมากกว่าพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่ไม่เติมสารเชื่อมโยง สำหรับรูปที่ 10 คือภาพรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมโยง 3 phr (r-POM/3/0) พบว่าสภาพผิวมีความราบเรียบ และมีเฟสเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวแบบทดลองอื่น ๆ ที่นำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยา รูปที่ 11 คือผิวรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/5/24 พบรอยแตกหักที่มีลักษณะการเสียรูปแบบฉีกขาด (crazing) ซึ่งเป็นลักษณะฉีกขาดของวัสดุพอลิเมอร์จากการเกิดช่องว่างระดับไมโคร (microvoids) [11] ในงานวิจัยนี้พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 5 phr และผ่านการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง (r-POM/5/24) มีค่าความต้านทานแรงดึง และร้อยละการยืดตัวสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับภาพรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/1/24 ที่ใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำเท่ากัน พบว่าลักษณะของรอยแตกหักแตกต่างกันอย่างชัดเจน r-POM/5/24 แสดงลักษณะของวัสดุที่มีความสามารถในการรับความเค้นดึง และสามารถยืดตัวได้สูงกว่าสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติแรงดึง แต่หากเทียบกับ รอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/3/0 ที่



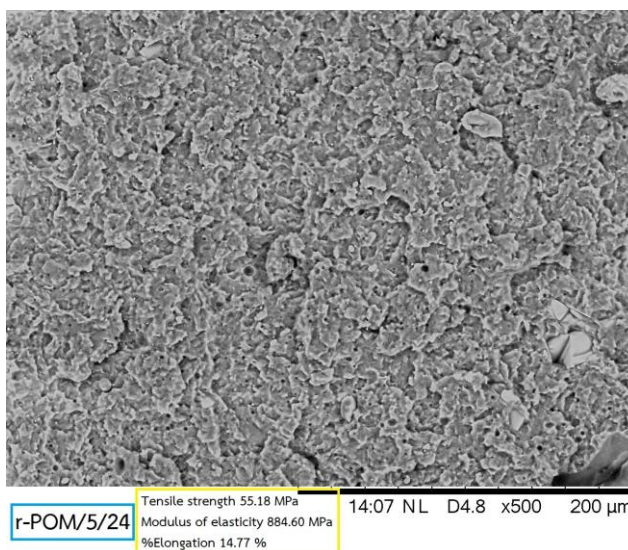
รูปที่ 8 พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล



รูปที่ 9 พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/1/24



รูปที่ 10 พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/3/0



รูปที่ 11 พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลอง r-POM/3/0

เติมสารเชื่อมโยง 3 phr พบว่ามีลักษณะผิวมีความราบเรียบ เช่นเดียวกัน แต่มีความเป็นเฟสเนื้อเดียวกันสูงกว่า สื่อให้เห็นถึงความแกร่ง สอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่าตัวแบบทดลอง r-POM/3/0 มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุดในการวิจัยนี้แต่ในทางตรงกันข้ามพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลองนี้มีค่าร้อยละการยืดตัวที่ต่ำกว่าตัวแบบทดลอง r-POM/1/24 แต่หากเปรียบเทียบผลผิวรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่ไม่เติมสารเชื่อมโยงจะเห็นได้ชัดว่ามีรอยแตกหักที่มีความหยาบที่มากกว่าชิ้นงานอื่น ๆ สื่อถึง

ความสามารถยึดตัวที่สูง สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นว่ามีร้อยละการยืดตัวประมาณ 73 ซึ่งมากกว่าตัวแบบการทดลองทั้งหมด

4. ผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมโยง (A) และระยะเวลาในการอบไอน้ำ (B) ว่าส่งผลต่อสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ จึงใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (one way ANOVA) สำหรับการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล และวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิจัยนี้

สมบัติ	ปริมาณสาร เชื่อมโยง	ระยะเวลา การอบไอน้ำ	อิทธิพลรวม
ดัชนีการหลอมไหล	0.000	-	-
ความต้านทานแรงดึง	0.000	0.000	0.000
มอดูลัสความยืดหยุ่น	0.000	0.000	0.000
ร้อยละการยืดตัว	0.000	0.000	0.329
ความแข็ง	0.000	0.000	0.384
ความต้านทานแรงกระแทก	0.000	0.016	0.690

ตารางที่ 5 สมการถดถอยของสมบัติกายภาพและสมบัติทางกลในการวิจัยนี้

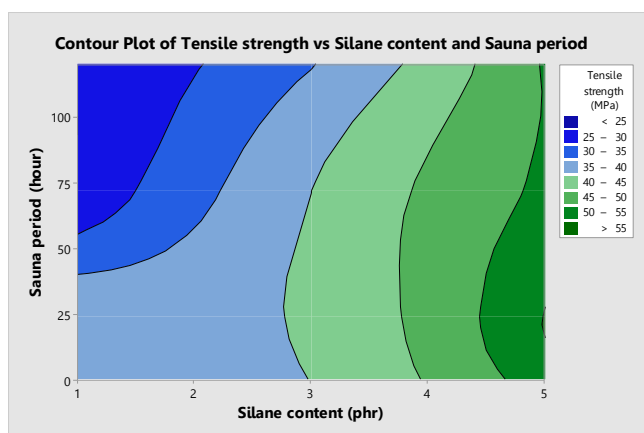
สมบัติ	สมการถดถอย	r-sq/ r-sq(adj)
ดัชนี การหลอมไหล	63.23-7.444(A)	95.50%, 94.08%
ความต้านทาน แรงดึง	31.51+4.201(A)-0.1113(B) +0.01761(AB)	88.42%, 87.80%
มอดูลัสความ ยืดหยุ่น	1012.5-16.26(A)-0.782(B) +0.062(AB)	18.99%, 14.66%
ร้อยละการ ยืดตัว	1.883+2.230(A)-0.0095(B) +0.00025(AB)	79.16%, 78.05%
ความแข็ง	76.294-0.1888(A)-0.00651(B) +0.00025(AB)	29.57%, 25.79%
ความต้านทาน แรงกระแทก	1.057+0.2945(A)-0.00117(B) +0.000325(AB)	73.08%, 71.63%

(two way ANOVA) สำหรับสมบัติทางกลที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยดูจากค่า p-value ($\alpha = 0.05$) เป็นสำคัญ

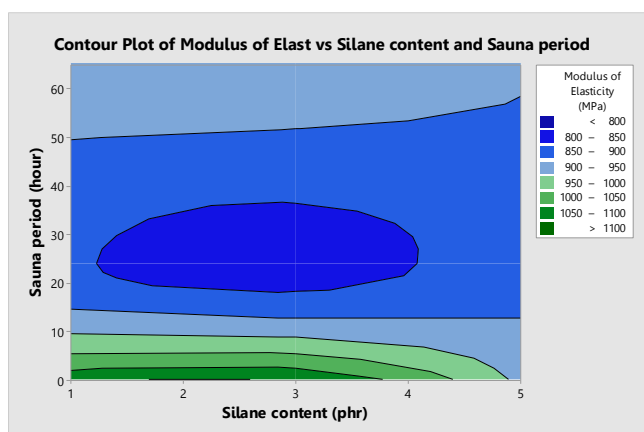
โดยผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม minitab สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4 พบว่าปริมาณสารเชื่อมโยงส่งผลต่อทุกสมบัติที่ทำการศึกษาย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า p-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด สำหรับปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำมีผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกันคือ

มีค่า p-value ที่น้อยกว่า 0.05 แต่สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยร่วม (interaction) พบว่ามีเพียงสมบัติความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ปัจจัยทั้งสองส่งผลร่วมกัน สำหรับค่าร้อยละการยืดตัว ค่าความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทกมีค่า p-value เป็น 0.329 0.384 และ 0.690 ตามลำดับ จึงอธิบายได้ว่าสองปัจจัยที่นำมาศึกษาไม่ได้มีอิทธิพลร่วมกันต่อสมบัติดังกล่าว

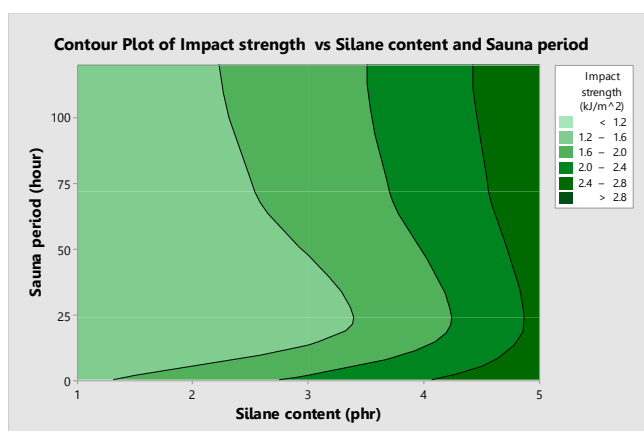
ตารางที่ 5 คือการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองกับสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ จากค่าสหสัมพันธ์ (r-sq and r-sq (adj)) ทำให้ทราบว่าปริมาณสารเชื่อมโยง และระยะเวลาการอบไอน้ำไม่ได้ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งในเชิงเส้นตรงเนื่องจากมีสหสัมพันธ์ต่ำ แต่สำหรับสมบัติทางกลอื่น ๆ รวมไปถึงค่าดัชนีการหลอมไหลมีค่าสหสัมพันธ์ที่สูงกว่าร้อยละ 70 จึงชี้ให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และความต้านทานแรงกระแทกในเชิงเส้นตรง อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมโยงแสดงอิทธิพลในเชิงบวก (positive effect) ต่อค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และความต้านทานแรงกระแทกแสดงอิทธิพลในเชิงลบ (negative effect) ต่อค่าดัชนีการหลอมไหล นั่นหมายความว่าหากเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าร้อยละการยืดตัว และความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้น แต่ทำให้ดัชนีการหลอมไหลลดลง สำหรับปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำแสดงอิทธิพลในเชิงลบต่อทุกสมบัติ หมายความว่าหากเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำให้นานขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งลดลง โดยอิทธิพลของทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสามารถแสดงด้วยกราฟสูงต่ำดังรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก

5. การอภิปรายผลการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลตัวแบบทดลองต่าง ๆ และสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลดังตารางที่ 1 พบว่า ดัชนีหลอมไหลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เติมสารเชื่อมโยง 1, 3 และ 5 phr มีค่าสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่ไม่เติมสารเชื่อมโยง (12.58 กรัม/10นาทีก) เพราะการเสื่อมสภาพจากความร้อน (thermal degradation) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในกระบวนการกราฟท์สารเชื่อมโยงเข้ากับสายโซ่ของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลที่เกิดในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ แต่เมื่อเพิ่มสารเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้ดัชนีการหลอมไหลมีแนวโน้มลดลง เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการกราฟท์ที่สูงขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yeong-Tarn [7] A. Ditta [12] และ Shun Z [13] การทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ทางสถิติทำให้ทราบว่าอิทธิพลของทั้งปัจจัยส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 แต่สำหรับค่าร้อยละการยึดตัว ค่าความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทก ปริมาณสารเชื่อมโยง และปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำไม่ได้แสดงอิทธิพลร่วมต่อสมบัติดังกล่าว อีกทั้งค่าสหสัมพันธ์ (r -sq and r -sq (adj)) จากการวิเคราะห์การถดถอยทำให้ทราบว่าไม่มีเพียงสมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งของพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งสองปัจจัยในลักษณะเส้นตรง หากวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างพอลิออกซี-เมทิลีนรีไซเคิลกราฟท์ไวนิลไตรเมทพอกซีไซเลน และสมบัติทางกลโดยการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงทำให้เกิดการกราฟท์สูงขึ้น ดัชนีการหลอมไหลลดลง ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้น แต่ทำให้ค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงในลักษณะเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์ที่กล่าวมานี้มาแสดงได้ดังตารางที่ 6

จากการทดสอบสมบัติประกอบกรวดการวิเคราะห์การถดถอย ทำให้ทราบว่าอิทธิพลของระยะเวลาการอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลในเชิงลบต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล หากเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [8] และงานวิจัยของ Morshedian [14] ที่อธิบายถึงอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ของพอลิเอทิลีนว่าส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น ความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น ซึ่งต่างจากการวิจัยนี้ที่เมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำ ณ ระยะเวลาต่าง ๆ มีแนวโน้มของสมบัติทางกลที่ลดลง แต่สอดคล้องกับการวิจัยของ Fayolle [15] Zahran [16] และ Abdel-Hady [17] ที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนด้วยการฉายรังสีเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยผลการศึกษาพบว่า การฉายรังสีในระดับต่าง ๆ ไม่มีการเชื่อมโยงสายโซ่แต่อย่างใด ในทางตรงกันข้ามทำให้เกิดการแตกสลายของสายโซ่ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10] ที่ได้ใช้กระบวนการเดียวกันนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนที่เป็นเม็ดใหม่ พบว่าปฏิกิริยาการกรวดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซี-เมทิลีนเด่นชัดกว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่ เช่นเดียวกับการวิจัยนี้ การวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทกในลักษณะเส้นตรง แต่สมบัติแรงดึงได้รับอิทธิพลของทั้งสองปัจจัยในลักษณะเส้นตรงสำหรับงานวิจัยนี้ส่วนที่ต่างกันคือมีเพียงค่าความแข็งเท่านั้นที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากทั้งสองปัจจัยในลักษณะเส้นตรง

จากการทดสอบสมบัติทางกล และการวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถหาคำตอบของระดับปัจจัยที่เหมาะสม (response optimization) ได้จากโปรแกรม minitab โดยตั้งค่าเป้าหมายคือสมบัติทางกลที่สูงที่สุด (maximum) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15 คำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสม 5 ลำดับแสดงให้เห็นว่าปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ 5 phr สำหรับระยะเวลาการอบไอน้ำสามารถ

ตารางที่ 6 สมการถดถอยของสมบัติทางกลที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีการหลอมไหลในการวิจัยนี้

สมบัติ	สมการถดถอย	r-sq/ r-sq(adj)
ความต้านทานแรงดึง	61.79 - 0.4793 MFI	96.49%, 94.73%
มอดูลัสความยืดหยุ่น	865.1 + 4.26 MFI	86.65%, 82.97%
ร้อยละการยืดตัว	73.3 - 1.450 MFI	68.13%, 52.19%
ความแข็ง	73.772 + 0.0520 MFI	89.16%, 83.74%
ความต้านทานแรง กระแทก	3.767 - 0.04051 MFI	98.22%, 97.33%

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนในงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่ผ่านมา

สมบัติ	POM [10]	r-POM	r-POM/5/0	r-POM/5/24
ดัชนีการหลอมไหล (g/10min)	10.02	12.58	24.06	-
ความต้านทานแรง ดึง (MPa)	55.74	54.07	52.66	55.18
มอดูลัสความ ยืดหยุ่น (MPa)	886.4	933.12	937.81	884.6
ร้อยละการยืดตัว (%)	13.8	73.58	13.62	14.17
ความแข็ง (shore D)	74.17	74.10	75.43	75.13
ความต้านทานแรง กระแทก (kJ/m ²)	4.61	3.30	2.7	2.49

เลือกใช้ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 120 ชั่วโมง เช่น หากต้องการนำพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลไปใช้ในงานที่ต้องการสมบัติความแข็งและความแกร่ง (มอดูลัสความยืดหยุ่น) ต้องเติมสารเชื่อมโยง 3 phr โดยไม่ต้องเข้าสู่กระบวนการอบไอน้ำ แต่หากต้องการนำไปใช้งานที่ต้องการมีความเหนียวสูง (ร้อยละการยืดตัว) รับ

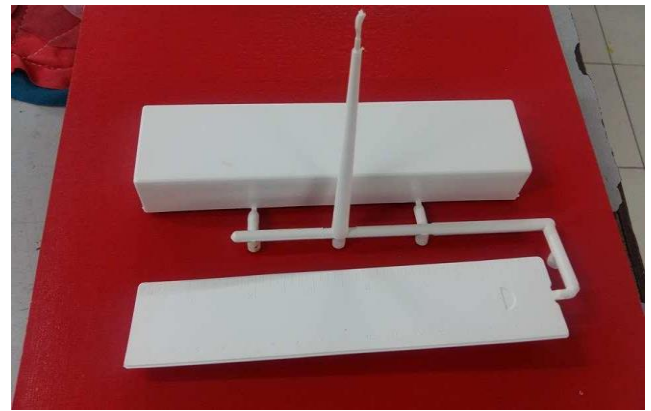
Solutions							
Solution	Silane content (phr)	Sauna period (hour)	Impact strength (kJ/m ²) Fit	Hardness (shore D) Fit	Elongation (%) Fit	Modulus of Elasticity (MPa) Fit	Tensile strength (MPa) Fit
1	5	0	2.696	75.426	13.622	937.81	52.662
2	5	24	2.492	75.132	14.774	884.60	55.180
3	5	120	2.702	74.902	12.556	866.50	50.402
4	3	0	2.074	76.266	5.210	1089.39	40.082
5	5	72	2.634	74.000	13.272	901.50	50.914
Solution	Composite Desirability						
1	0.666292						
2	0.593913						
3	0.524852						
4	0.467874						
5	0.438635						

รูปที่ 15 การหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยโปรแกรม minitab

แรงดึงและทนกระแทกได้ดี ต้องเติมสารเชื่อมโยง 5 phr และใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง เป็นต้น ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนที่เป็นเม็ดใหม่ เม็ดรีไซเคิล ตัวแบบทดลองที่ r-POM/5/0 และ r-POM/5/24 พบว่าทั้งสองตัวแบบทดลองในการวิจัยนี้มีค่าสมบัติทางกลเทียบเคียงกับพอลิออกซีเมทิลีนเม็ดใหม่ มีเพียงค่าความต้านทานแรงกระแทกที่มีค่าต่ำกว่าพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนเม็ดใหม่ แต่มีค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำกว่า ทั้งนี้เม็ดรีไซเคิลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการรีไซเคิลจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเม็ดที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตทั่วไป จะผ่านการคอมพาวนด์โดยสารเติมแต่งเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จึงมีสมบัติที่แตกต่างจากเม็ดใหม่ที่นำมาเปรียบเทียบ จากนั้นทางผู้วิจัยได้นำเม็ดตัวแบบทดลอง r-POM/5/0 ไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างด้วยกระบวนการฉีด โดยผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่เลือกนี้คือกล่องดินสอด่รูปที่ 16 เป็นชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีด พบว่าสามารถฉีดขึ้นรูปได้ดีชิ้นงานมีความเต็มสมบูรณ์ไม่เกิดข้อบกพร่อง หรือรอยยุบ ส่วนรูปที่ 17 เป็นชิ้นงานที่ผ่านการตัดก้านทางวิ่ง (runner) และครีบอก พบว่าชิ้นงานมีผิวที่สวยงาม

6. สรุปผลการวิจัย

จากจุดประสงค์ของการวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของปริมาณสารเชื่อมโยง และระยะเวลาการ



รูปที่ 16 ตัวอย่างชิ้นงานจากพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูตร r-POM/5/0



รูปที่ 17 กล่องดินสอด่ที่ผลิตจากพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูตร r-POM/5/0

อบไอน้ำที่ทำให้สมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลสูงขึ้นเทียบเคียงหรือสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนเม็ดใหม่ ซึ่งผลการวิจัยพบว่าการเติมสารเชื่อมโยง 5 phr และใช้ระยะเวลาอบไอน้ำระหว่าง 0 ถึง 24 ชั่วโมง ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลมีสมบัติการรับแรงดึง และค่าความแข็งเทียบเคียงกับพอลิออกซีเมทิลีนเม็ดใหม่ และสามารถนำไปขึ้นรูปชิ้นงานได้ด้วยกระบวนการฉีด สรุปผลการวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าเทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นทางเลือกเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกรีไซเคิลได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและการดำเนินการต่าง ๆ ภายใต้งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
และสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมาที่ให้การสนับสนุนด้าน
เครื่องมือวิเคราะห์จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. ธุรกิจรีไซเคิล. เข้าถึงได้จาก: www.dbd.go.th/download/document_file/.../T2_6_201805.pdf [เข้าถึงเมื่อ 2561].
- [2] เฉลิมชัย แขกระโทก, สุทธิรักษ์ งามสรรพ, อนุชิต คงฤทธิ์ การลดของเสียประเภทฉีดไม่เต็มในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกประเภท PET โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง. ใน: *รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2559, 7-8 กรกฎาคม 2559. จังหวัดขอนแก่น; 2559. หน้า 223-227.*
- [3] พชิตยา พรหมอยู่, พิมพ์ชนก บุญกลาง, อนุชิต คงฤทธิ์ การลดของเสียในกระบวนการฉีดขึ้นรูปในชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์โดยการออกแบบการทดลองกรณีศึกษาโรงงานผู้ผลิตชิ้นส่วนพลาสติก. ใน: *รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรม อุตสาหกรรม ประจำปี 2559, 7-8 กรกฎาคม 2559. ขอนแก่น; 2559. หน้า 844-847.*
- [4] ULLMANN'S editorial team. *Ullmann's Polymers and Plastics, 4 Volume Set: Products and Processes*, Wiley-VCH. 2016; 1: 923 pages.
- [5] อนุชิต คงฤทธิ์, กนกวรรณ แซ่มพุดชา, รัชกร เป้นโพธิ์กลาง, พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. อิทธิพลของสารคู่ควบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2559; 11(2): 57-66.
- [6] Hamed A, Jalil M, Mehdi B. Silane Grafting and Moisture Crosslinking of Polyethylene: The Effect of Molecular Structure. *Journal of Vinyl & Additive Technology*. 2009; 15(3): 184-190.
- [7] Yeong-Tarng S, Chih-Ming L. Silane Grafting Reactions of LDPE, HDPE, and LLDPE. *Journal of Applied Polymer Science*. 1999; 74: 3404-3411.
- [8] อนุชิต คงฤทธิ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. การศึกษาสมบัติเชิงกล ของพอลิเอทิลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีโครงสร้างร่างแหโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ. *รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558, 6-7 สิงหาคม 2558. กรุงเทพฯ; 2558. หน้า 667-672.*
- [9] ไส้จิตตา พูนโตนด, ภัทรกร พิมเสนครบุรี, ศักรินทร์ ช่วยประสิทธิ์, อนุชิต คงฤทธิ์, ณรงค์ดี ธรรมโชติ, มาโนช ริทินโย, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. อิทธิพลของการผสมพอลิโพรพิลีนและไซเลนกับการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล. ใน: *รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2560, 12-15 กรกฎาคม. เชียงใหม่; 2560. หน้า 346-350.*
- [10] อนุชิต คงฤทธิ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. ผลกระทบของสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำในกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีน. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2562; 12(1).
- [11] William DC, David GR. materials science and engineering an introduction 9^{ed}. *John Wiley and Sons*. 2014; 589 pages.
- [12] Alexis D, Hervé L, François B, Arnaud T, Loïc LP. Effect of organoclays on the degradation of polyoxymethylene homopolymer during melt processing. *Polymer Degradation and Stability*. 2016; 131: 122-131.
- [13] Shun Z, Zhengzhou W, Yuan H. Melt grafting of vinyltrimethoxysilane and water crosslinking of polypropylene/ethylene-propylene diene

- terpolymer blends. *Journal of Polymer Research*. 2009;16: 173–181.
- [14] Jalil M, Pegah MH. Polyethylene Cross-linking by Two-step Silane Method: A Review. *Iranian Polymer Journal*. 2009; 18(2): 103–128.
- [15] Fayolle B and Verdu J Radiation aging and chemi-crystallization processes in polyoxymethylene. *European Polymer Journal*. 2011; 47: 2145–2151.
- [16] Zahran RR. Effect of g-irradiation on the ultrasonic and structural properties of polyoxymethylene. *Materials Letters*. 1998; 37: 83–89
- [17] Abdel-Hady EE, El-Sharkawy MRM. Effect of Gamma Irradiation on Polyoxymethylene Copolymer Studied by Positron Annihilation Lifetime Technique. In: *Proceedings of the 7th Conference on Nuclear and Particle Physics, Sharm El-Sheikh, Egypt, Nov. 11–15, 2009*: 662.