



วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลกระทบของสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำในกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีน

Effect of Crosslink Agents and Sauna Period in Crosslink Process on Mechanical Properties of Polyoxymethylene

อนุชิต คงฤทธิ์¹ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร^{2*}

¹ สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Anuchit Khongrit¹ Jittiwat Nithikarnjanatharn^{2*}

¹ Industrial Management (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

*Corresponding author.

E-mail: jittiwat.ni@rmuti.ac.th; Telephone: 08 1547 0993.

วันที่รับบทความ 13 มีนาคม 2561; วันที่แก้ไขบทความ 5 พฤษภาคม 2561; วันที่ตอบรับบทความ 5 กรกฎาคม 2561

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลนเพื่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิออกซีเมทิลีน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมโยง (1 3 และ 5 ส่วนเทียบกับร้อยละ) และระยะเวลาการอบไอน้ำ (0 24 72 และ 120 ชั่วโมง) ในกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนด้วยกระบวนการทางสถิติ ผลการทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการกราฟท์จากปัจจัยสารเชื่อมโยงส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงส่งผลให้สมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น และสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ดัชนีการหลอมไหลลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาการกราฟท์สายโซ่ที่สูงขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำที่มากขึ้นสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึง สมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น และความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนแต่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง การศึกษาสัณฐานวิทยาของรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นอิทธิพลของทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีน ท้ายที่สุดพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมโยงปริมาณ 1 ส่วนเทียบกับร้อยละ และใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง ส่งผลให้มีสมบัติความแข็งแรง และสมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่นเทียบเท่ากับพอลิออกซีเมทิลีน แต่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่า

คำสำคัญ

พอลิออกซีเมทิลีน สารเชื่อมโยง การเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยไซเลน สมบัติทางกล

Abstract

This study investigated the feasibility of using silane crosslinking technology to improve mechanical properties of polyoxymethylene (POM). The study determined effects of the amount of crosslink agent (1, 3, and 5) parts per 100 and Sauna incubation Period (0, 24, 72, and 120 hours) in the crosslink process which affected the mechanical properties of polyoxymethylene using statistics process. Results from mechanical property tests and statistical analysis showed that the grafting reactions from the factor of crosslink agent had significantly higher influence on the mechanic properties of polyoxymethylene than had the factor of Sauna Period. Increasing the amount of crosslink agent resulted in higher modulus of elasticity and hardness. However, the melting index was lower due to the higher chain grafting reaction. Increasing the Sauna Period increased the tensile and modulus elasticity properties of the polyoxymethylene, but reduced the percent elongation. The investigation of morphology of cracks using scanning electron microscope revealed the effects of both factors on the mechanical properties of polyoxymethylene. Finally, polyoxymethylene which was added with one percent crosslink agent and the 24-hour Sauna Period had similar hardness and modulus elasticity properties, but with higher tensile and percent elongation properties.

Keywords

polyoxymethylene; crosslink agent; silane crosslink; mechanical properties

1. บทนำ

พอลิออกซีเมทิลีน (polyoxymethylene, POM) เป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิเมอร์ทางวิศวกรรมที่มีการใช้งานสำหรับผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูง (precision part) เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล เช่น เฟือง สปริง โช้ดลบลูกปืน เป็นต้น และมีการพัฒนาเพื่อการใช้งานแทนที่อะลูมิเนียม ทองเหลือง และสังกะสี เนื่องจากพอลิออกซีเมทิลีนมีค่าความแข็งตึง (stiffness) ความสามารถในการคงรูปขณะใช้งานดี ทนทานต่อการขีดสี และการกัดกร่อน แต่พอลิออกซีเมทิลีนมีจุดอ่อนคือ มีค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ต่ำ และทนต่อความร้อนต่ำทำให้การใช้งานของพอลิออกซีเมทิลีนมีข้อจำกัด [1,2]

จากกรศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีผู้สนใจทำการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนโดยการเติมสารเสริมแรงได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ [3] และ ท่อนาโนคาร์บอน [4] โดยผลที่ได้คือสามารถเพิ่มความแกร่งและความต้านทาน

แรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนได้ แต่ทำให้ความต้านทานแรงดึงด้อยลง นอกจากนั้นมีการสร้างเป็นพอลิเมอร์ผสม โดยมีการนำพอลิออกซีเมทิลีนมาผสมกับเมทิลเมทาคริเลต-สไตรีน-บิวทาไดอีน (methyl methacrylate–styrene–butadiene copolymer) [5] และพอลิโพรพิลีน (polypropylene) [6] ซึ่งวิธีการนี้ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก และความเหนียว (เปอร์เซ็นต์การยืดตัว) สูงขึ้น แต่มีข้อด้อยคือทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง

สำหรับวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ทางวิศวกรรมคือการเชื่อมโยงสายโซ่ (crosslinking) เป็นการเปลี่ยนแปลงกายภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลต่อความแข็งแรงทางกลของพอลิเมอร์ ระดับการเชื่อมโยง (degree of crosslink) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยวิธีการเชื่อมโยงสายโซ่นี้สามารถกระทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การเชื่อมโยงโดยใช้รังสีเหินยวนำ (radiation crosslinking) เป็นการฉายรังสีที่สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน

เช่น รังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระและทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งนิยมใช้กับพอลิเมอร์ประเภท พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) และพอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูง (UHMWPE) และวิธีที่ 2 คือการเชื่อมโยงโดยไซเลน (silane crosslinking) โดยการกราฟท์ (graft) สารเชื่อมโยงไซเลนกับสายโซ่พอลิเมอร์และทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่ของพอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดร-ไลซิสด้วยไอน้ำ วิธีการนี้นิยมใช้กับพอลิโอเลฟินส์ (polyolefin) เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [7–10] จากการศึกษาที่ผ่านมาของผู้ทวิวิจัยได้มีการใช้เทคโนโลยีไซเลน (Silane technology) เพื่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ได้แก่ การปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรดรีไซเคิลโดยเทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่ ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทกให้เทียบเท่ากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เป็นเม็ดใหม่ได้ [11] และการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยเทคนิคการกราฟท์ ผลการวิจัยพบว่าค่าความต้านทานแรงดึง และความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น แต่ทำให้ความต้านทานแรงกระแทกลดลง [12]

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะประยุกต์เทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่โดยไซเลนมาปรับปรุงสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการนี้คือปริมาณการเติมสารเชื่อมโยง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่ [13–15] การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของระดับปัจจัยที่นำมาศึกษาที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิออกซีเมทิลีน โดยใช้วิธีการทางสถิติควบคู่กับการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าเดิม

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบ และสารเคมี

พลาสติกพอลิออกซีเมทิลีน (polyoxymethylene) เกรด N2320 003 สำหรับงานฉีดขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ จากบริษัท BASF สารเชื่อมขวาง ไวนิลไตรเมทอซซิลเลน (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 และการวิเคราะห์ผลทางสถิติในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB โดยตัวแบบการทดลองในการวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (factorial design) ซึ่งผู้ทวิวิจัยได้มีการใช้วิธีการนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา [11,12,16] สำหรับการศึกษาอิทธิพลของ 2 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมขวาง (A) ที่ 1 3 และ 5 phr และระยะเวลาในการอบไอน้ำ (B) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 0 12 24 และ 120 ชั่วโมง โดยมีตัวแบบทดลองทั้งสิ้น 12 ตัวแบบทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเริ่มต้นจากนำเม็ดพอลิออกซีเมทิลีน (POM) ผสมกับสารริเริ่มปฏิกิริยา ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (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

จากนั้นเติมสารเชื่อมขวางไวนิลไตรเมทอซซิลเลน (VTMS) ในปริมาณต่าง ๆ ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ ผสมด้วยเครื่องผสมทางกลอีกครั้งประมาณ 10 นาที เสร็จแล้วอบที่

ตารางที่ 1 ตัวแบบทดลองในการวิจัยนี้

Code	Silane content (phr) (A)	Sauna period (hour) (B)
POM	-	-
POM/1/0	1	0
POM/1/24	1	24
POM/1/72	1	72
POM/1/120	1	120
POM/3/0	3	0
POM/3/24	3	24
POM/3/72	3	72
POM/3/120	3	120
POM/5/0	5	0
POM/5/24	5	24
POM/5/72	5	72

อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder mixture) ที่มี L/D Ratio 40 อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมคือ 170–200 °C จากส่วนป้อน (feed zone) ไปจนถึงหัวตาย (die zone) ตามลำดับ (ดังตารางที่ 2) และนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ด ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีอัดร้อน (hot compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 °C ที่ความดัน 1,500 psi เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เข้าตู้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลาต่าง ๆ ตามที่ได้มีการออกแบบการทดลองไว้ ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ

ในการวิจัยนี้แบ่งการทดสอบสมบัติออกเป็นสองส่วนคือ สมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบชาร์ ดี (shore D) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 น้ำหนักกด 10 lbf การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยพลังงานกระแทก 2.7J การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) อ้างอิง

ตารางที่ 2 อุณหภูมิการผสมในแต่ละส่วนของเครื่องอัดรีดสกรูในการวิจัยนี้

Zone	Temp (°C)
Feed zone	170 ± 2
Compression zone 1	170 ± 2
Compression zone 2	180 ± 2
Metering zone 1	180 ± 2
Metering zone 2	200 ± 2
Die zone	200 ± 2

มาตรฐาน ASTM D638 (Type I) ความเร็วการดึงเคลื่อนที่ 50 มิลลิเมตร/นาที บันทึกผลค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่การทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D 1238 ที่อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

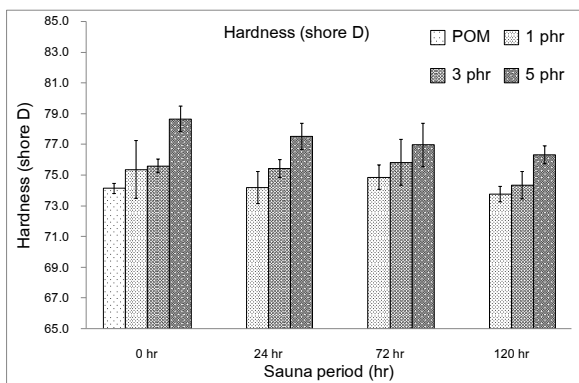
หลังจากทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพแล้วจะนำข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้มาประมวลผลทางสถิติ เริ่มจากการหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากแต่ละตัวแบบทดลองเพื่อนำไปแสดงผลในรูปแบบของกราฟ จากนั้นทำการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (two way ANOVA) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และสร้างแบบจำลองทางเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิออกซิเมทิลีนที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ตลอดจนนำภาพสัณฐานวิทยาของรอยแตกหัก มาประกอบการวิเคราะห์ผลการวิจัย

3. ผลการทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ

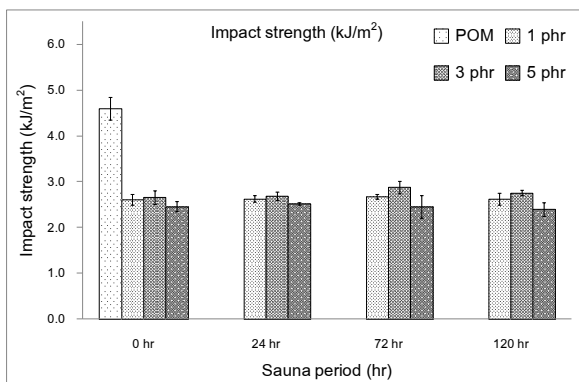
ผลการทดสอบความแข็ง (hardness test) ของการวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 พบว่าค่าความแข็งของพอลิออกซีเมทิลีนมีค่าเท่ากับ 74.17 shore D และความแข็งของพอลิออกซีเมทิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง 1 phr จะมีค่าความแข็งเท่ากับ 75.40 shore D เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางเป็น 5 phr ทำให้ความแข็งสูงขึ้นเป็น 78.70 shore D ซึ่งสูงที่สุดในการวิจัยนี้ แต่เมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำทำให้ค่าความแข็งของพอลิออกซีเมทิลีนต่ำลง เช่น พอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวางเป็น 5 phr อบไอน้ำเป็นระยะเวลา 24 72 และ 120 ชั่วโมง ทำให้มีค่าความแข็งลดลงเหลือ 77.57 77.00 และ 76.37 shore D ตามลำดับ

รูปที่ 2 แสดงสมบัติความต้านทานแรงกระแทกในการวิจัยนี้ ซึ่งผลที่เห็นได้ชัดคือพอลิออกซีเมทิลีนมีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง และผ่านกระบวนการอบไอน้ำ แต่หากดูผลของแต่ละตัวแบบทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางไซเลนจาก 1 เป็น 3 phr จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นเป็น 5 phr ค่าความต้านทานแรงกระแทกกลับลดต่ำลงและมีค่าน้อยกว่าแบบทดลองที่เติมสารเชื่อมขวางไซเลน 1 phr ส่วนผลระยะเวลาการอบไอน้ำที่มากขึ้นทำให้พอลิออกซีเมทิลีนมีค่าสมบัติความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นเล็กน้อย

รูปที่ 3 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง 1 phr (POM/1/0) มีค่าเท่ากับ 57.68 MPa และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางเป็น 3 (POM/3/0) ถึง 5 phr (POM/5/0) มีค่าการรับแรงดึงที่ 45.03 และ 35.25 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการอบไอน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าการรับแรงดึงของพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวางทั้ง 1 3 และ 5 phr สูงขึ้นโดยเฉลี่ย 4.57% แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำให้



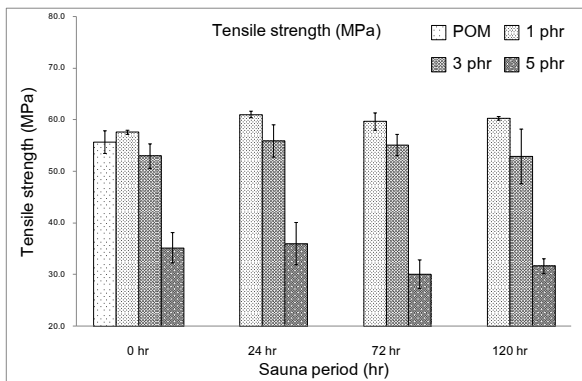
รูปที่ 1 ผลการทดสอบความแข็ง



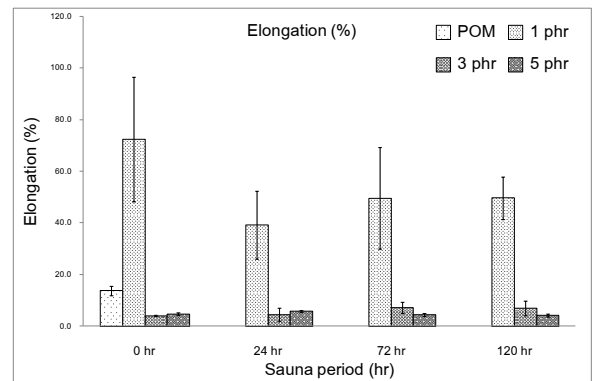
รูปที่ 2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

สูงขึ้นเป็น 72 และ 120 ชั่วโมง ค่าความต้านทานแรงดึงนั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย

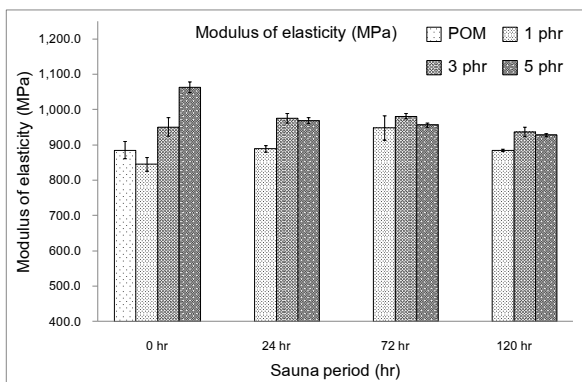
รูปที่ 4 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ในงานวิจัยนี้ เมื่อเติมสารเชื่อมขวางไซเลน 1 3 และ 5 phr ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 846.25 952.19 และ 1064.66 MPa ตามลำดับ เมื่อทำปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสายโซ่ด้วยการอบไอน้ำที่ 24 ชั่วโมง ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง 1 phr มีค่าเป็น 890.07 MPa และมีค่าเป็น 949.54 MPa เมื่ออบไอน้ำ 72 ชั่วโมง แต่จะลดลงเป็น 886.19 MPa เมื่ออบไอน้ำ 120 ชั่วโมง ส่วนพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง 3 phr มีแนวโน้มคล้ายกัน นั่นคือเมื่อผ่านการอบไอน้ำ 24 ชั่วโมง มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 976.19 MPa และเพิ่มเป็น 982.39 MPa เมื่ออบไอน้ำ 72 ชั่วโมง แต่พอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง



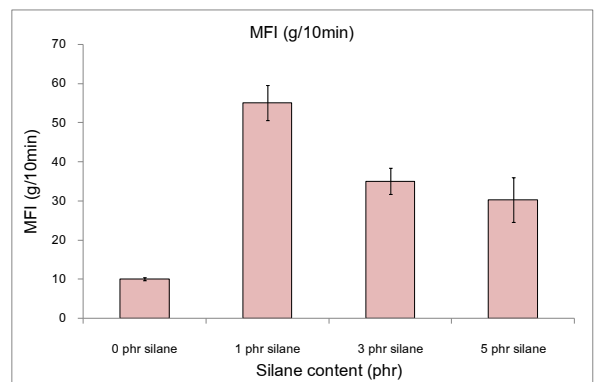
รูปที่ 3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 5 ผลการทดสอบความค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



รูปที่ 4 ผลการทดสอบความค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



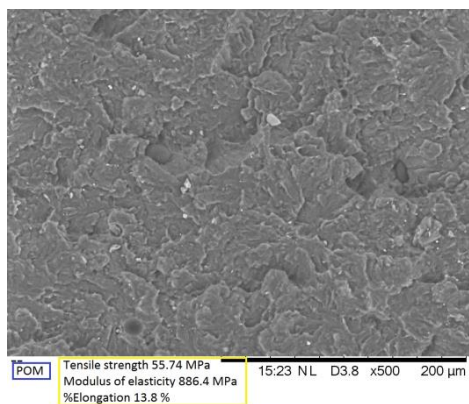
รูปที่ 6 ผลการทดสอบความค่าดัชนีการหลอมไหล

5 phr จะมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเป็น 969.7 957.87 และ 928.75 MPa เมื่อใช้เวลารอบไอน้ำ 24 72 และ 120 ชั่วโมงต่ำลำดับ

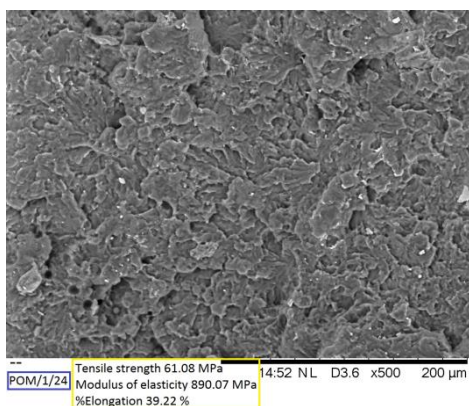
รูปที่ 5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) พบว่าพอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง 1 phr และไม่ผ่านการอบไอน้ำ (POM/1/0) มีความสามารถในการยืดตัวสูงขึ้นจากร้อยละ 13.8 (POM) เป็นร้อยละ 72.44 ซึ่งสูงที่สุดในการวิจัยนี้ แต่เมื่ออบไอน้ำที่เวลา 24 ถึง 120 ชั่วโมงทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง โดยมีค่าเป็นร้อยละ 39.22 และ 49.7 สำหรับพอลิออกซีเมทิลีนที่สารเชื่อมขวางไซเลน 3 phr (POM/3/0) และ 5 phr (POM/5/0) มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวร้อยละ 4.08 และ 4.79 ตามลำดับ และเมื่อผ่านการอบไอน้ำทุกช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวประมาณร้อยละ 2 เท่านั้น

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) ในงานวิจัยนี้ พอลิออกซีเมทิลีนมีค่าดัชนีการหลอมไหล 10.02 g/10 min เมื่อเติมสารเชื่อมขวาง 1 phr (POM/1/0) ทำให้ดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้นเป็น 55.14 g/10 min เมื่อเพิ่มสารเชื่อมขวางไปเป็น 3 และ 5 phr ทำให้ดัชนีการหลอมไหลลดลงโดยมีค่า 35.04 และ 30.30 g/10 min ตามลำดับ

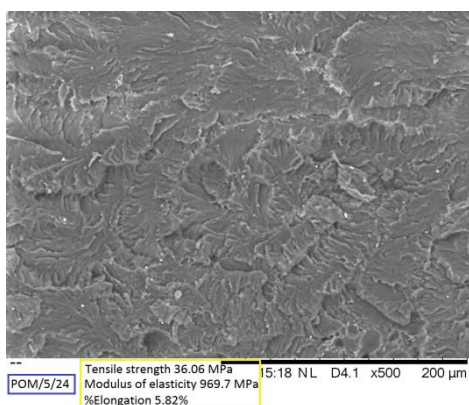
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักที่ได้จากการทดสอบแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 7 แสดงผิวรอยแตกหักของพอลิออกซีเมทิลีนที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง (POM) รูปที่ 8 คือพอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/1/24 และรูปที่ 9 คือพอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/5/24 ซึ่งผิวรอยแตกหักที่พบมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยพอลิออกซีเมทิลีน



รูปที่ 7 พอลิออกซีเมทิลีน



รูปที่ 8 พอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/1/24



รูปที่ 9 พอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/5/24

(POM) มีลักษณะของเฟสที่เป็นเนื้อเดียวกัน สลับกับส่วนที่เป็น ริ้วของการฉีกขาด ส่วนพอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/1/24 มีลักษณะผิวรอยแตกมีความขรุขระที่มากกว่า อย่างเห็นได้ชัด ส่วนพอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง

POM/5/24 มีลักษณะผิวรอยแตกหักที่มีความราบเรียบกว่าพอลิออกซีเมทิลีน (POM) และ POM/1/24 ซึ่งลักษณะผิวรอยแตกของ POM/1/24 นั้นเป็นแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากแสดงให้เห็นถึงร่องรอยของความสามารถในการรับความเค้นได้สูง ก่อนที่วัสดุจะแตกหัก ส่วนพอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/5/24 มีรอยแตกหักที่มีความราบเรียบเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งแรง สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางกลนั่นคือพอลิออกซี (POM) มีค่าความต้านทานแรงดึง 55.74 MPa ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 886.4 MPa และค่าร้อยละของการยืดตัว 13.8 พอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/1/24 ที่มีสมบัติแรงดึงที่สูงกว่า นั่นคือมีค่าความต้านทานแรงดึง 61.08 MPa ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 890.07 MPa และค่าร้อยละของการยืดตัว 39.22 พอลิออกซีเมทิลีนตัวแบบทดลอง POM/5/24 ซึ่งมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนทั้งสองตัวแบบทดลองที่กล่าวไปข้างต้น รอยแตกหักที่มีความราบเรียบกว่า POM และ POM/1/24 เป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งแรง จึงทำให้ความเหนียวลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ลดลง แต่มีสมบัติความแข็งแรงสูงขึ้น

4. ผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

หลังจากทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (two way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) เพื่อดูว่าทั้งสองปัจจัยนั้น (ปริมาณการเติมสารเชื่อมขวาง และระยะเวลาการอบไอน้ำ) ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

ตารางที่ 3 แสดงค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง โดยพบว่าปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางส่งผลต่อทุกสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 สำหรับปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำมี

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิจัยนี้

Properties	Silane content	Sauna period	Interaction
Hardness	0.000	0.000	0.233
Impact strength	0.000	0.593	0.944
Tensile strength	0.000	0.019	0.162
Modulus of elasticity	0.000	0.000	0.000
%Elongation	0.000	0.049	0.007

เพียงค่าความต้านทานแรงกระแทกเท่านั้นที่มี P-Value มากกว่า 0.05 สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction) มีผลที่แตกต่างออกไป โดยปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางและระยะเวลาการอบไอน้ำส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิออกซีเมทิลีนอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 และ 0.007 ตามลำดับ แต่ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมทั้งสองต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งแรง 0.162 0.944 และ 0.233 ตามลำดับ จึงมิได้ส่งผลต่อสมบัติดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 แสดงสมการถดถอย (regression model) เพื่อให้เข้าใจว่าปัจจัยทั้งสองที่นำมาศึกษาในทิศทางใดต่อสมบัติทางกล ซึ่งจากสมการถดถอยแสดงให้เห็นว่าปริมาณการเติมสารเชื่อมขวาง (A) ส่งผลในเชิงลบ (negative effect) ต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และส่งผลในเชิงบวก (positive effect) ต่อสมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งแรง สำหรับปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำ (B) ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง มอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทกในเชิงบวก สำหรับปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำ (B) ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง มอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทกในเชิงบวกและส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็งแรงในเชิงลบ นั่นหมายความว่าหากเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากขึ้น จะส่งผลให้สมบัติความต้านทานแรงดึงและ

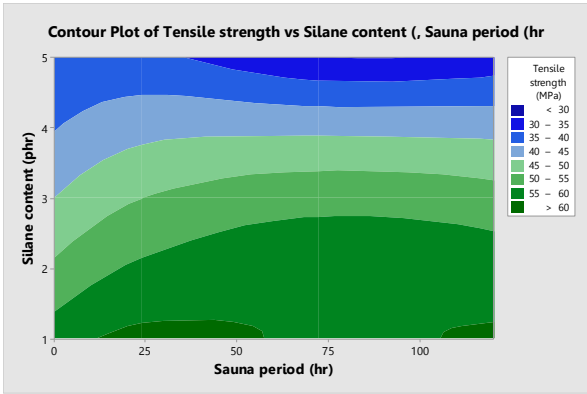
ตารางที่ 4 สมการถดถอยของสมบัติทางกลในการวิจัยนี้

Properties	Regression model	R-sq/ R-sq(adj)
Hardness	$75.930 + 0.243(A) - 0.01779(B) + 0.00200(AB)$	31.17%, 27.48%
Impact strength	$2.6911 - 0.0181(A) + 0.000241(B) - 0.000192(AB)$	13.40%, 8.76%
Tensile strength	$67.29 - 5.871(A) + 0.0254(B) - 0.01360(AB)$	85.34%, 84.56%
Modulus of elasticity	$838.9 + 39.64(A) + 0.757(B) - 0.3303(AB)$	65.66%, 63.82%
%Elongation	$62.64 - 13.32(A) - 0.1035(B) + 0.024(AB)$	61.34%, 59.27%

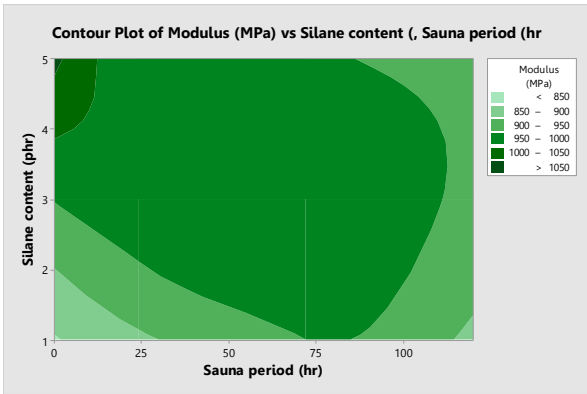
เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดต่ำลง แต่จะทำให้สมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทก ความแข็งแรง และระดับการเชื่อมขวางสายโซ่ของพอลิออกซีเมทิลีนสูงขึ้น หากเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำให้สูงขึ้นจะทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึง มอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนสูงมากขึ้นตามระยะเวลาการอบไอน้ำ แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็งแรงจะลดลง ทั้งนี้จากค่าสหสัมพันธ์ (R-sq and R-sq (adj)) ของสมการถดถอยที่ได้จากสมบัติความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งแรงมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8.76 ถึง 31.17 ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ ทำให้สมการถดถอยที่ได้นี้ไม่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก และความแข็งแรงได้ เพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งสองให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบของกราฟสูงต่ำ (contour plot) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 12

5. การอภิปรายผลการวิจัย

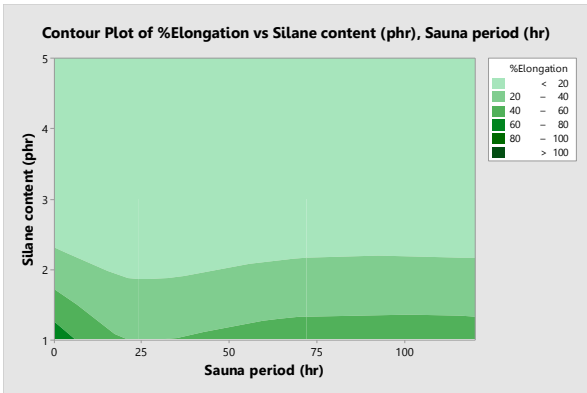
จากผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิออกซีเมทิลีนที่สูงขึ้นเมื่อมีการเติมสารเชื่อมขวางเป็นผลมาจากในขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ พอลิเมอร์ได้รับผลกระทบ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางและระยะเวลาการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

จากแรงเหวี่ยง และความร้อน อีกทั้งการทำปฏิกิริยาของไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ในกระบวนการกราฟท์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมสลายจึงเป็นผลทำให้มีค่าดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 5 สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีน

Properties	Regression model	R-sq/ R-sq(adj)
Hardness	$74.10 + 0.8250 \text{ silane content (phr)}$	80.2%, 60.4%
Impact strength	$2.689 - 0.03750 \text{ silane content (phr)}$	51.9%, 3.8%%
Tensile strength	$65.48 - 5.607 \text{ silane content (phr)}$	89.8%, 79.5%
Modulus of elasticity	$790.6 + 54.60 \text{ silane content (phr)}$	99.9%, 99.8%
%Elongation	$77.84 - 16.91 \text{ silane content (phr)}$	74.2%, 48.4%
Melt flow index	$58.79 - 6.210 \text{ silane content (phr)}$	88.7%, 77.4%

สูงขึ้นมาก [17,18] และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง ทำให้เกิดการกราฟท์ของพอลิออกซีเมทิลีนกับสารเชื่อมขวางไวนิลไตรเมทอกลอซีไฮเลนจึงทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลลดต่ำลง [19]

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนเด่นชัดกว่าอิทธิพลของการทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางสายโซ่โดยกระบวนการอบไอน้ำ จากสมการถดถอยดังตารางที่ 5 สามารถเห็นแนวโน้มสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนที่เป็นผลมาจากเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางได้ชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางจาก 1 ไปเป็น 5 phr ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหล ค่าความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง แต่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรง

แต่เมื่อผ่านกระบวนการอบไอน้ำเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสายโซ่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปัจจัยนี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็ง มอดูลัสความยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่านั้น

Response Optimization: Parameters								
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance		
hardness (shore D)	Maximum	73.000	79.30		1	1		
impact strength (kJ/m^2)	Maximum	2.070	2.91		1	1		
%elongation	Maximum	3.128	103.19		1	1		
modulus of elasticity (MPa)	Maximum	823.017	1081.91		1	1		
tensile strength (MPa)	Maximum	27.058	62.04		1	1		
Solutions								
	silane content (phr)	Sauna period (hr)	hardness (shore D)	impact strength (kJ/m^2)	%elongation	modulus of elasticity (MPa)	tensile strength (MPa)	Composite Desirability
Solution			Fit	Fit	Fit	Fit	Fit	
1	1	72	76.134	2.626	49.6532	949.541	59.7200	0.587288
2	1	0	77.140	2.636	72.4351	846.252	57.6826	0.474673
3	1	24	75.368	2.632	39.2178	890.065	61.0776	0.469633
4	1	120	74.232	2.632	49.7108	886.193	60.3687	0.426754
5	3	72	75.866	2.702	7.2113	982.395	53.1875	0.364376

รูปที่ 13 การหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยโปรแกรม minitab

เนื่องจากมีค่า P-value สูงกว่า 0.05 เมื่อใช้กราฟผลการทดสอบสมบัติ และกราฟความสูงต่ำมาประกอบการพิจารณาพบว่าระยะเวลาการอบไอน้ำส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีนน้อยมาก และมีลักษณะแนวโน้มของสมบัติทางกลที่ลดต่ำลงเมื่อใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำเกินกว่า 24 ชั่วโมง

เมื่อเทียบกับผลการวิจัยอื่นที่มีการใช้กระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาการอบไอน้ำส่งผลต่อสมบัติทางกลที่เด่นชัดกว่างานวิจัยนี้ นั่นคือเมื่อเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางสายโซ่ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ดังกล่าวสูงขึ้น แตกต่างจากงานวิจัยนี้ซึ่งปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างชัดเจนนักเมื่อเทียบกับปัจจัยปริมาณสารเชื่อมขวาง โดยปฏิกิริยาการกราฟท์เป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ระหว่างพอลิออกซีเมทิลีน และสารเชื่อมขวางไซเลนมีลักษณะสายโซ่แบบหลวม (loose network) และยังสามารถในการเคลื่อนไหวได้ [10,19,20] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล โดยพอลิออกซีเมทิลีน (POM) มีค่าเป็น 10.02 กรัม/10นาทีก แต่เมื่อทำการกราฟท์ด้วยสารเชื่อมขวางในปริมาณ 1 phr ทำให้มีค่าสูงขึ้นเป็น 55.14 กรัม/10นาทีก และการใช้ระยะเวลาการอบไอน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อย

สลายสายโซ่ของพอลิออกซีเมทิลีนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิออกซีเมทิลีนลดลง [21,22] ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องงานวิจัยที่มีการนำพอลิออกซีเมทิลีนมาปรับปรุงสมบัติโดยใช้รังสีแกมมาให้เกิดโครงสร้างร่างแห การทำปฏิกิริยาของรังสีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง และการเชื่อมขวาง โดยพบว่าหากใช้ปริมาณรังสีในระดับต่ำจะช่วยลดการเสื่อมสภาพ และมีแนวโน้มการเสื่อมสลายมากขึ้นหากเพิ่มปริมาณรังสีในกระบวนการนี้ [7,23] พอลิออกซีเมทิลีนจึงมีความแข็งแรงทางกลต่ำ และแตกหักง่าย เพราะชิ้นงานเปลี่ยนรูปได้น้อย และเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดความเค้นดึง สอดคล้องกับผลในการวิจัยนี้คือค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ต่ำลงพร้อมกับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ลดลง

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบสมบัติทางกล และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากขึ้น จะส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง แต่พอลิออกซีเมทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวาง 1 phr ทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าพอลิออกซีเมทิลีนที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางถึง 5 เท่า สำหรับค่าความต้านทาน



รูปที่ 14 ตัวอย่างชิ้นงานจากพอลิออกซีเมทิลีนสูตร POM/1/24

แรงกระแทก และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสามารถสูงขึ้นได้เมื่อเพิ่มสารเชื่อมขวางจาก 1 phr เป็น 3 phr แต่หากเพิ่มเป็น 5 phr จะทำให้สมบัติดังกล่าวลดต่ำลง ส่วนปัจจัยระยะเวลาการอบไอน้ำที่ 24 ชั่วโมงทำให้สมบัติความต้านทานแรงกระแทก ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 4 โดยเฉลี่ย) และจะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำ

จากผลการทดลองที่ได้ดำเนินการข้างต้นสามารถหาคำตอบของระดับปัจจัยที่เหมาะสม (response optimization) ได้จากโปรแกรม minitab โดยตั้งค่าเป้าหมายคือสมบัติทางกลที่สูงที่สุด (maximum) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 โดยผลการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม 5 คำตอบพบว่าลำดับแรก ปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมคือ 1 phr ส่วนระยะเวลาการอบไอน้ำเป็นได้ตั้งแต่ 0 ถึง 120 ชั่วโมง ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มสมบัติของพอลิออกซีเมทิลีนด้านความเหนียวสามารถยืดตัวได้สูง รับแรงดึงได้ดี จะต้องเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณน้อย และปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้พอลิออกซีเมทิลีนมีความแข็งแรงทางกลเหมาะสมในการศึกษานี้คือ การเติมสารเชื่อมขวางที่ 1 phr และระยะเวลาการอบไอน้ำที่ 24 ชั่วโมง (POM1/24) ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงและมอดูลัสความยืดหยุ่นเทียบเคียงกับพอลิออกซีเมทิลีน แต่มีความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่า ผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลทำให้ทราบว่าพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการกราฟท์



ด้วยสารเชื่อมขวางไวโนลไตรเมทโทกซีไฮเลน มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการฉีดเข้าแบบ (injection molding) เนื่องจากมีค่าดัชนีการหลอมไหลสูง เพื่อให้เห็นถึงการนำไปใช้เป็นรูปธรรมทางผู้วิจัยจึงนำพอลิออกซีเมทิลีนสูตร POM/1/24 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด และกดอัดร้อนเป็นชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 14

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่สนับสนุนทุนวิจัยและการดำเนินการต่าง ๆ ภายใต้งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2560 ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมาที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พอลิอะซีทัล (Polyacetal) เป็นพอลิเมอร์ประเภทใด ใช้ทำอะไรได้. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1485>. [2017.]
- [2] Sánchez M, Illescas S, Milliman H, Schiraldi, Arostegui A. Morphology and thermo-mechanical properties of melt mixed polyoxy-

- methylene/polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2010; 295: 143–154.
- [3] Sirirat W, Supakanok T, Akaraphol P, Chaturong E. Effect of particle sizes of zinc oxide on mechanical, thermal and morphological properties of polyoxymethylene/zinc oxide nanocomposites. *Polymer Testing*. 2008; 27: 971–976.
- [4] Xiaowen Z, Lin Y. Structure and mechanical properties of polyoxymethylene/ multi-walled carbon nanotube composites. *Composites: Part B*. 2011; 42: 926–933.
- [5] Xiaodong W, Xiuguo C. Effect of ionomers on mechanical properties, morphology, and rheology of polyoxymethylene and its blends with methyl methacrylate–styrene–butadiene copolymer. *European Polymer Journal*. 2005.; 41: 871–880.
- [6] Sirirat W, Tanakorn S. Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene/Polyoxymethylene Blends. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2013; 3: 202–205.
- [7] Keizo M, Song C. *Radiation Processing of Polymer Materials and Its Industrial Applications*. John Wiley & Sons; 2012. p. 376–377.
- [8] Jaya M, Vivek KS. Cross-linking in Hydrogels - A Review. *American Journal of Polymer Science*. 2014; 4(2): 25–31.
- [9] Tseng-Sin W. Silane crosslink able polyethylene compounds: applications and manufacturing methods. *Plastics, Additives and Compounding*. 2007; 9(6): 40–43.
- [10] กัลยาณี สิริสิงห. การเตรียม สมบัติและการใช้งานของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีโครงสร้างร่างแหโซลลอกเซน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2013.
- [11] อนุชิต คงฤทธิ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. การศึกษาสมบัติเชิงกล ของพอลิเอทิลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีโครงสร้างร่างแหโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ. รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม การ ประจำปี 2558. กรุงเทพฯ; 2558: หน้า 667–672.
- [12] อนุชิต คงฤทธิ์, กนกวรรณ แซ่มพุดชา, รัชนก แป้นโพธิ์กลาง, พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. อิทธิพลของสารคู่ควบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2017; 11(2): 57–65.
- [13] Kalyanee S, Marnviga B. Improved silane grafting of high-density polyethylene in the melt by using a binary initiator and the properties of silane-crosslinked products. *Journal of Polymer Research*. 2013.; 20: 120.
- [14] 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.
- [15] Yeong-Tarng S, Chih-Ming L. Silane Grafting Reactions of LDPE, HDPE, and LLDPE. *Journal of Applied Polymer Science*. 1999; 74: 3404–3411.
- [16] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, มาโนชรัตนโย. การออกแบบและสร้างเครื่องตีเกลียวเส้นด้าย. *วารสาร วิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม. อบ.* 2015; 8(2): 116–123.
- [17] Zakir MOR. Graft Copolymers of Maleic Anhydride and Its Isostructural Analogues : High Performance Engineering Materials. *International*

- Review of Chemical Engineering*. 2011; 3(2): 153–215.
- [18] 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.
- [19] Amit B, James WR, Paramita R. *Polymer Grafting and Crosslinking*. John Wiley & Sons; 2008.
- [20] Kalyanee S, Marnviga B, Soontaree K. The effect of silane carriers on silane grafting of high-density polyethylene and properties of crosslinked products. *Polymer Testing*. 2010; 29: 958–965.
- [21] Momtahan R, Ismaeil G, Mohammad K, Hamed A, Mojgan Z, Marzieh R. Silane crosslinking of poly(lactic acid) The effect of simultaneous hydrolytic degradation. *eXPRESS Polymer Letters*. 2015; 9(12): 1133–1141.
- [22] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้. เข้าถึงได้จาก : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. [2017.]
- [23] Abdel-Hady EE, Sharkawy MRMEI. 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; 2009: 662.