การศึกษาสมบัติทางมอดูลัสของพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา

The Study on Elastic Modulus of Recycled Polyoxymethylene by Adding Silane Coupling Agent

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร[1]* สำรวม จรจังหรีด[2] วรกานต์ ทึงทา[2] โสฐิดา พูนโตนด[1] และ อนุชิต คงฤทธิ์[3]
ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ[1] อมรศักดิ์ มาใหญ่[1] สุทัศน์ ยอดเพ็ชร[2]
[1]หน่วยวิจัยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และการอบชุบความร้อนโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[3]โปรแกรมวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
E-mail: jittiwat.ni@rmuti.ac.th*

Jittiwat Nithikarnjanatharn[1]* Samruam Jonjungreed[2] Worakan Tuengta[2] Sotida Poontanod[1]
Anuchit Khongrit[3] Narongsak Thammachot[1] Amornsak Mayai[1] and Suthad Yodpeth[2]
[1]Polymer Processing and Heat Treatment of Metals Reseasrch Units,
Rajamangala University of Technology Isan.
[2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan.
[3]Industrail management Program, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University.
E-mail: jittiwat.ni@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางมอดูลัสของพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ทำการขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงดึงด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป โดยนำพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน (VTMS) ที่ 0,1,3 และ 5 phr และนำไปอบไอน้ำ 0, 24, 72 และ 120 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางมอดูลัส จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ปริมาณการเติมไซเลน 3 phr และระยะเวลาอบไอน้ำที่ 0 ชั่วโมง ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าสูงสุดที่ 1,089.40 MPa ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ แสดงอิทธิพลของการอบไอน้ำและสัดส่วนการผสม ส่งผลต่อมอดูลัสความยืดหยุ่นตัว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
คำหลัก พอลิออกซีเมทิลีน, สารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน, การวิเคราะห์ทางสถิติ

Abstract

This research aims to study the elastic modulus of the recycled polyoxymethylene by adding silane coupling agent, blended and molded by twin screw extruder with injection molding process. By using the recycled polyoxymethylene add silane (VTMS) at 0, 1, 3 and 5 phr and add 0, 24, 72 and 120 hours of steam. The study used modulus analysis for research elastic property. These factors have the effect of decreasing modulus of elasticity. However, the 3 phr silane addition and the 0 phr of steam, the modulus of elasticity was

highest at 1,089.40 MPa. The statistical analysis (ANOVA) showed the influence of the steam and r-Pom fraction affecting to the Young's modulus at the confident level 95%

Keywords: Polyoxymethylene, Silane coupling agents, Statistical analysis

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์อย่างแพร่หลาย สาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้พอลิเมอร์เป็นที่นิยมเพราะมีคุณสมบัติคือ ราคาถูก น้ำหนักเบา แข็งแรงทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย ทนทานต่อสารเคมี ไม่เป็นสนิมและเป็นฉนวนไฟฟ้า [1] พอลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene; POM) ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น เพราะเป็นพลาสติกวิศวกรรมประเภทเทอร์โมพลาสติก มีน้ำหนักเบา มีค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งตึงสูง มีผิวลื่นเป็นมันทนต่อการเสียดสีได้ดี ทนต่อแรงกระแทกแม้อยู่ในอุณหภูมิต่ำ มีความแข็งแรงสูง มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี มีการดูดซับน้ำที่ค่อนข้างต่ำ ทนต่อสารเคมี นอกจากนี้ยังยืดหยุ่นได้ดีทั้งในที่อุณหภูมิสูงและต่ำจึงทำให้สามารถคงสภาพของรูปทรงที่ดีได้ ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายๆ ด้านทำให้ถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุที่ทำด้วยโลหะและวัสดุอื่นๆ อีกหลายชนิด

จากการศึกษางานวิจัยที่ใช้เทคนิคนี้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลเบื้องต้นพบว่า Xiaodong Wang และ Xiuguo Cui [2] ได้ทำการศึกษาการผสมระหว่างสารประกอบไอออนอเมอร์กับ POM ส่งผลให้ความแข็งแรงและสมบัติทางกลเพิ่มขึ้น ศิริรัตน์ วัชรชานันท์ [1] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิออกซีเมทิลีน โดยการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลง เมื่อเติมซิงค์ออก- ไซด์ลงในปริมาณมาก การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปจะให้ค่าสมบัติทางกลดีกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูปและเมื่อตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด กระจายตัวของอนุภาคซิงค์-ออกไซด์ค่อนข้างดี และเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ภายในเนื้อพอลิเมอร์มากขึ้นเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น กัลยาณี สิริสิงห [3] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมโยงสายโซ่ของพอลิเอทิลีนโดยการใช้สารตัวพาโคพอลิเมอร์และสารเปอร์ออกไซด์ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) ส่งผลให้มีสมบัติการทนแรงดึง การรับแรงกระแทก และทางความร้อนดีขึ้น เกศกนก แก้วกอ [4] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของพอลิ-โพรพิลีนโดยการเชื่อมโยงสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตด้วยการเติมสารไซเลนและไดคิวมิลเปอร์ ลงไปในพอลิโพรพิลีน แล้วทำอบไอน้ำ ส่งผลให้พอลิ-โพรพิลีนมีความสามารถในการทนแรงดึงสูงขึ้น การคงรูปสูงขึ้นโดยการใช้เทคนิคการปรับปรุงสมบัติโดยการใช้สารเสริมแรงและสารควบคู่ อนุชิต คงฤทธิ์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยใช้สารควบคู่ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น อนุชิต คงฤทธิ์ และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร [6] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอทีลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยเทคนิคการเชื่อมขวางสายโซ่ให้มีโครงสร้างร่างแหโดยนำพอลิเอทีลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่กับสารควบคู่ ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และมาอัดขึ้นรูปแล้วนำไปอบไอน้ำที่เวลาต่างกัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัส และเปอร์-เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ความต้านทานแรง-กระแทกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารควบคู่ แต่เมื่อเพิ่มเวลาการอบไอน้ำค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำลงเล็กน้อย อัตราการหลอมไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารควบคู่และเวลาการอบไอน้ำ ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าตัวแปรทั้งสองนี้ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเอทีลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นมีการศึกษาเกี่ยวกับพลาสติกรีไซเคิลกับการเติมสารอื่น จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอไมด์ 6 ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยการเติมสารควบคู่ไซเลน จากนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลและยังมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลระหว่างพอ

ลิโพรพิลีนผสมกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (PP:r-PP) [8] พอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลตผสมกับพอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (PET:r-PET) [9]

จะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยดังกล่าว มีการนำพอลิเมอร์มาทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลนและเวลาในการอบไอน้ำ ซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์นั้นสูงขึ้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาการนำพอลิออกซิเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (Recycled-Polyoxymethylene; r-POM) มาปรับปรุงคุณสมบัติ เพื่อทำให้ r-POM นั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะต่อการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยนำเอา r-POM ปรับปรุงโดยใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลนและระยะเวลาในการอบไอน้ำเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและเพื่อการใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

2. วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาสมบัติของ พอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ผสมกับสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ วิธีการดำเนินงาน วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การผสมและเตรียมชิ้นงานสำหรับการขึ้นรูป การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ ระยะเวลาในการอบไอน้ำ การศึกษาสมบัติทางกล

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) พอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว (r-POM)

2) สารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนชนิด (Vinyl-trimethoxy silane; VTMS)

3) สารตัวเริ่มปฏิกิริยา Dicumyl peroxide (DCP)

2.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เตาอบลมร้อน (Hot air oven)

2) เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

3) เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ (Injection Molding)

4) เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง

2.3 การเตรียมวัสดุ r-POM/VTMS สำหรับขึ้นรูป

การเตรียม r-POM ผสมสารริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) 0.1 phr หลังจากนั้นจึงนำไปทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน นำมาผสม VTMS ตามสัดส่วนการผสมดังนี้

- สัดส่วน r-POM/VTMS 0 phr
- สัดส่วน r-POM/VTMS 1 phr
- สัดส่วน r-POM/VTMS 3 phr
- สัดส่วน r-POM/VTMS 5 phr

จึงนำไปทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน

2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

1) นำส่วนผสมระหว่าง r-POM/VTMS ตามอัตราส่วนนำไปผสมลงในเครื่องอัดรีดเกลียวสกรูคู่ที่ L/D 40 โดยการทำงานของเครื่องอัดรีดเกลียวสกรูคู่จะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะการขึ้นรูประหว่าง r-POM/VTMS

ความเร็วรอบสกรู	อุณหภูมิในการผสม r-POM และ VTMS(°C)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
50 rpm.	170	170	180	180	200	200

2) นำพอลิเมอร์ผสมที่ออกจากแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องมาดึงผ่านอ่างน้ำเพื่อคายความร้อนที่สะสมอยู่ น้ำจะทำให้พอลิเมอร์ผสมแข็งตัว

3) นำพอลิเมอร์ผสมที่เย็นตัวไปตัดด้วยเครื่องตัดให้เป็นเม็ด

4) นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่าง r-POM กับ VTMS ไปฉีดด้วยเครื่อง Injection Molding Machines ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type V^C.D สำหรับใช้ในการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile test) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160-185°C

5) นำชิ้นงานอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระยะเวลาในการอบไอน้ำ

r-POM/VTMS (phr)	ระยะเวลาการอบไอน้ำ (ชั่วโมง)		
0	24	72	120
1	24	72	120
3	24	72	120
5	24	72	120

2.5 ทดสอบสมบัติทางมอดูลัสของ r-POM

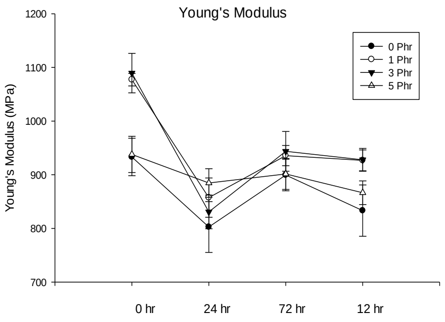
ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นชิ้นงานแบบดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type V ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดด้วยเครื่อง Injection Molding Machines ชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องแรงดึง Universal Testing Machine รุ่น LR 10K plus ของบริษัท LLOYD สภาวะในการทดสอบจะใช้ความเร็วดึง (Cross Head Speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยน้ำหนักกด 10 กิโลนิวตัน โดยผลทดสอบที่ต้องการในงานวิจัยนี้คือ ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus)

ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) คือค่าความชันของกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Stain Curve) ในช่วงบริเวณที่เป็นอิลาสติก (Elastic) ค่ามอดูลัสจะเป็นการวัดความแข็งแกร่งของวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสสูงจะมีความสามารถในการรักษารูปร่างจากการรับแรงได้ดี

3. ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกับการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 0, 1, 3 และ 5 phr ซึ่งผลการทดสอบจากตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้นำผลการทดสอบไปแสดงในรูปแบบของกราฟ เพื่อแสดงผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่เป็นผลมาจากอิทธิพลจากปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนและอิทธิพลของการอบไอน้ำ จากข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Release 17 มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งพิจารณาค่า P-Value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α=0.05) หาความแปรปรวน

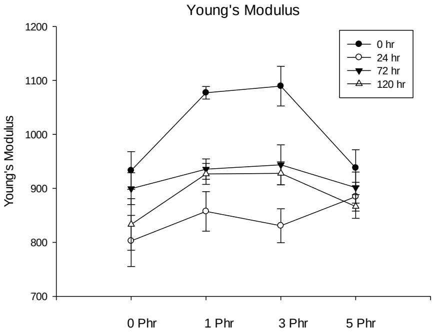
1) ผลของอิทธิพลปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 1 กราฟผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเมื่อเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ปริมาณต่าง ๆ

จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 0, 1, 3 และ 5 phr ทราบว่าปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยที่การเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 1 และ 3 phr ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ในช่วง 830.69-1089.39 MPa แต่เมื่อเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ 5 phr ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง เนื่องจากไซเลนเข้าไปทำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางสายโซ่เป็นพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้ความแกร่งสูงขึ้น แต่เมื่อเติมมากขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมขวางมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างแบบหลวม (loos network) ลักษณะวัสดุแสดงให้พบว่าเป็นพลาสติกแข็งแรง สอดคล้องกับงานวิจัยของ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ [7] กล่าวว่าปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน 1 phr ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเชื่อมขวางเป็นพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้ความแกร่งสูงขึ้น แต่ในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนมากขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ในลักษณะเดียวกัน PA/r-PA มีการเติมพลาสติกรีไซเคิลทำให้พลาสติกเปราะ

2) ผลของอิทธิพลการอบไอน้ำต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

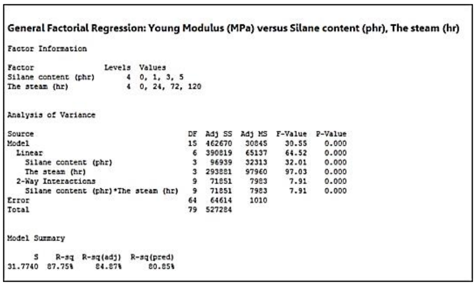


รูปที่ 2 กราฟผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น เมื่อมีการอบไอน้ำในเวลาต่าง ๆ

จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่เป็นผลมาจากการอบไอน้ำในเวลาต่าง ๆ ที่ระยะเวลาในการอบไอน้ำ 24, 72 และ 120 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดสอบที่แสดงโดยกราฟ เห็นได้ว่าที่ไม่มีการอบไอน้ำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด และเมื่อเพิ่มระยะ เวลาอบไอน้ำค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าอบไอน้ำที่ 72 และ 120 ชั่วโมง ให้ค่ามอดูลัสความยืนหยุ่นใกล้เคียงกันมาก แต่ที่การอบไอน้ำเป็น 120 ชั่วโมง กลับทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง เนื่องจากการที่มีระยะเวลาในการอบไอน้ำมากจะช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูงขึ้นแต่ความแกร่งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิมผกา มีสัจ และสมประสงค์ สังข์ด่าน [10] จากการผสม r-PA/PA สัดส่วน 0/100 เติมไซเลนที่ 1 phrและ อบไอน้ำที่ 24, 72 และ 120 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบไอน้ำ ดังนั้นลักษณะชิ้นงานจึงเกิดเป็นวัสดุแข็งเปราะเช่นเดียวกัน

3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลมอดูลัสความยืดหยุ่น

ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล (General Factorial Regression) โดยโปรแกรม Minitab Release 17 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลดังรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลมอดูลัสความยืดหยุ่น



General Factorial Regression: Young Modulus (MPa) versus Silane content (phr), The steam (hr)

Factor Information

Factor	Levels	Values
Silane content (phr)	4	0, 1, 3, 5
The steam (hr)	4	0, 24, 72, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	462670	30845	30.55	0.000
Linear	6	390819	65137	64.52	0.000
Silane content (phr)	3	96939	32313	32.01	0.000
The steam (hr)	3	293881	97960	97.03	0.000
2-Way Interactions	9	71851	7983	7.91	0.000
Silane content (phr)*The steam (hr)	9	71851	7983	7.91	0.000
Error	64	64614	1010		
Total	79	527284			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
31.7740	87.75%	84.87%	80.85%

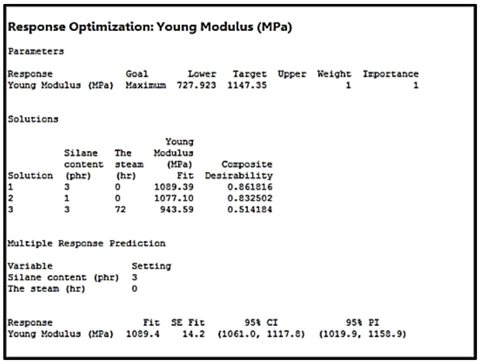
รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลมอดูลัสความยืดหยุ่น

จากการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนมีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และปัจจัยเวลาการอบไอน้ำส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนและเวลาการอบไอน้ำมีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกันและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนและการอบไอน้ำ กับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ดังรูปที่ 1และ 2 จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสามารถอธิบายอิทธิพลของปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนและการอบไอน้ำที่มีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นได้ว่า เมื่อปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนเพิ่มขึ้นที่ 1 และ 3 phr ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเป็น 5 phr ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง และการอบไอน้ำเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่มขึ้นที่ 24 และ 72 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นแต่ที่ 120 ชั่วโมง ทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง เมื่อพิจารณาค่าผลรวมกำลังสอง (SS) ของปัจจัยการอบไอน้ำมีค่ามากกว่าปริมาณสารควบคู่ปฏิกิริยาไซ-เลน แสดงให้เห็นว่าถ้าปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนคงที่แต่เปลี่ยนแปลงการอบไอน้ำจะส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า เมื่อให้การอบไอน้ำคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน

4) การวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมมอดูลัสความ

ยืดหยุ่น

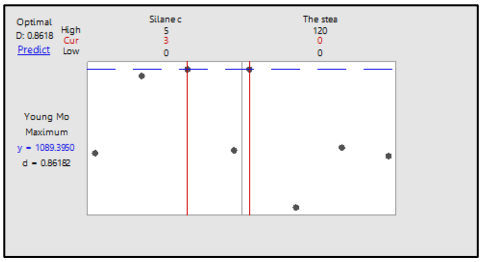
ผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม (Response Optimization) ที่ระดับความสนใจสูงสุด 3 ค่า ได้ผลดังรูปที่ 4 ที่สุดของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



Response Optimization: Young Modulus (MPa)

```
Parameters

Response             Goal     Lower   Target  Upper  Weight  Importance
Young Modulus (MPa)  Maximum  727.923 1147.35             1           1


Solutions

                               Young
           Silane   The      Modulus
           content  steam      (MPa)    Composite
Solution   (phr)    (hr)         Fit  Desirability
1          3        0        1089.39      0.861816
2          1        0        1077.10      0.832502
3          3        72        943.59      0.514184


Multiple Response Prediction

Variable              Setting
Silane content (phr)  3
The steam (hr)        0


Response              Fit  SE Fit       95% CI               95% PI
Young Modulus (MPa)  1089.4    14.2  (1061.0, 1117.8)   (1019.9, 1158.9)
```

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

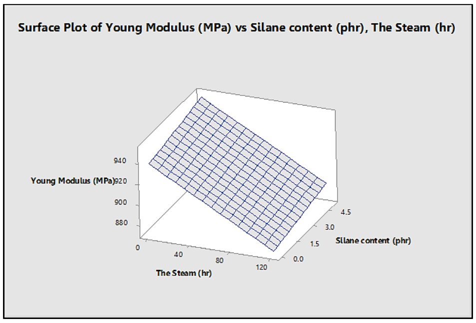


รูปที่ 5 กราฟการวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

จากรูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นโดยเลือกวิเคราะห์ที่ปัจจัยให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดมา 3 ลำดับ แล้วเลือกค่าที่สูงที่สุดซึ่งสูตรที่ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดของการทดลองนี้คือ การเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซ-เลนที่ 3 phr และไม่อบไอน้ำที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดอยู่ที่ 1089.395 MPa โดยมีช่วงความเชื่อมั่นที่ (Ci) อยู่ที่ช่วง (1061.0,1117.8) MPa และมีช่วงของการทำนาย (Pi) อยู่ในช่วง (1019.9,1158.9) MPa ให้ค่าระดับความเหมาะสมหรือความพึงพอใจอยู่ที่ 0.86182 ดังแสดงในรูปที่ 5 ถือเป็นความเหมาะสมที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์

5) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยกราฟพื้นผิว

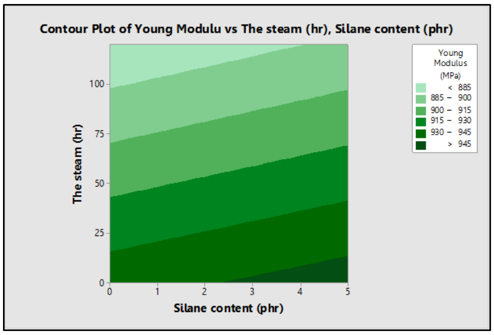
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยกราฟพื้นผิว (Surface Plot) โดยโปรแกรม Minitab Release 17 เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนกับเวลาในการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

จากรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในเชิงบวก เนื่องจากมีความชันของเส้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณไซเลน และปัจจัยการอบไอน้ำมี อิทธิพลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในเชิงลบเนื่องจากมีความชันของเส้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการอบไอน้ำ

6) การพยากรณ์โดยกราฟ Contour Plot



รูปที่ 7 กราฟ Contour Plot ของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

จากกราฟ Contour Plot ของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นระหว่างปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซ-

เลนกับการอบไอน้ำ แสดงให้เห็นค่าแนวโน้มการพยากรณ์ว่าที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดที่มากกว่า 945 MPa ต้องเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 5 phr และไม่ต้องมีการอบไอน้ำจึงจะทำให้ได้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุด

7) วิจารณ์ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

จากผลการทดสอบ การวิเคราะห์ทางสถิติของพอ-ลิออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนกับการอบไอน้ำ แสดงให้เห็นว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่กล่าวมาในทางตรงกันข้าม โดยที่การเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน 3phr และไม่มีการอบไอน้ำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด คือ 1089.39±36.75 MPaจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของปัจจัยทั้งสองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาปัจจัยแต่ละปัจจัย จะเห็นว่าที่อิทธิพลของการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 1 และ 3 phrให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 5 phr ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลงดังรูปที่ 1 เนื่องจากไซเลนเข้าไปทำให้สายโซ่เกิดการเชื่อมขวางสายโซ่เป็นพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้ค่าความแกร่งสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้างเมื่อเติมมากขึ้นเกิดเชื่อมขวางสายโซ่มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีทำให้ความแกร่งของวัสดุลดลงลักษณะของวัสดุจึงมีความแข็งแรงยืดตัวได้ดีขึ้น จากรูปที่ 2 อิทธิพลของการอบไอน้ำที่ 0 ชั่วโมง ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด เพิ่มเวลาเป็น 72 ชั่วโมงให้ค่าใกล้เคียงที่ไม่อบไอน้ำ และเมื่ออบไอน้ำ 120 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มเวลาอบไอน้ำจะเข้าไปช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง แต่ค่าความแกร่งลดลงสอดคล้องกับผลของค่าความต้านแรงดึงดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยลักษณะของวัสดุจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ซึ่งจากค่าการพยากรณ์โดยกราฟ Contour Plot แสดงให้เห็นว่าการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนมากขึ้นและอบไอน้ำน้อยกว่า 12 ชั่วโมง ให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดลักษณะของวัสดุจะเป็นวัสดุแข็งเปราะเช่นเดียวกัน

4. สรุป

การเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลนที่ 0, 1, 3 และ 5 phr ส่งผลต่อสมบัติทางมอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิ-ออกซีเมทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปริมาณไซเลนลดลงและระยะเวลาในการอบไอน้ำเพิ่มเวลาเป็น 72 ชั่วโมง ให้ค่าใกล้เคียงที่ไม่อบไอน้ำ และเมื่ออบไอน้ำ 120 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นลดลง อิทธิพลของการอบไอน้ำและสัดส่วนการผสม ส่งผลต่อมอดูลัสความยืดหยุ่นตัว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ เครื่องมือทดสอบ สถาบันพลาสติกที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือขึ้นรูป และบริษัท โตคูมิ อิเล็กทรอนิกส์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เม็ดพลาสติกในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริรัตน์ วัชรวิชานันท์, โครงการวัสดุพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยสารประกอบโลหะระดับนาโน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2551

[2] Xiaodong Wang และ Xiuguo Cui, Effect of ionomers on mechanical properties, morphology, and rheology of polyoxymethylene and its blends with methylmethacrylate - styrene - butadiene copolymer,European Polymer Journal, No.41, pages 871-880, 2547

[3] กัลยาณี สิริสิงห, โครงการการเตรียมสมบัติและการใช้งานของพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีโครงสร้างร่างแหไซลอกเซน, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2555

[4] เกศกนก แก้วกอ, การศึกษากราฟท์ของพอลิโพร-พิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิทด้วยไซเลนและการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2547

[5] อนุชิต คงฤทธิ์ และคณะ, อิทธิพลของสารคู่ควบต่อ

สมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิ-เอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 ก.ค.-ธ.ค. 2559.

[6] อนุชิต คงฤทธิ์ และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนชนิดนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีโครงสร้างร่างแหโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2558, 6-7 สิงหาคม 2558, กรุงเทพ: 667-672, 2558

[7] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ, การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอไมด์ 6 ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยการเติมสารควบคู่ 3-Aminopropyl triethoxy Silane, การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2559, 7-8 กรกฎาคม 2559, ขอนแก่น : 667-672

[8] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และอนุชิต คงฤทธิ์. (2558) "การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วโดยใช้สารควบคู่" การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ. 6-7 สิงหาคม 2558, กรุงเทพมหานคร.

[9] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และโสฐิดา พูนโตนด. "การศึกษาสมบัติความต้านทานแรงกระแทก พอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (r-PET)/พอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลตเกรดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (PET) โดยเติมสารควบคู่ Vinyl-Trimethoxy Silane". การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ .ศ.2560. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 12-15 กรกฎาคม 2560 เชียงใหม่.

[10] พิมผกา มีสัจ และสมประสงค์ สังข์ด่าน, อิทธิพลของการผสมพอลิเอไมด์ 6 และไซเลนกับการอบไอน้ำที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล, ปริญญานิพนธ์ สาขา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2558