Engng.J.CMU.(2018) 25 (3), 190−198

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

อิทธิพลของปริมาณยางรีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง

Effect of Recycle Ratio on Die Swell Ratio of Rubber Compound in Tread Extrusion Process

ศุภชัย นาทะพันธ์* และ สมเกียรติ วัฒน์ปฐมทรัพย์

Supphachai Nathaphan* and Somkieat Watpathomsub

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170 ประเทศไทย

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Mahidol University, Nakhonpathom 73170, Thailand
*E-mail: supphachai.nat@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางในกระบวนการอัดรีดโดยการประยุกต์การทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทดลองมี 3 บล็อกของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์) อัตราการบวมตัวของแต่ละบล็อกจะถูกวัด ณ โหลดในการอัดรีด 3 ระดับ (1.720 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร) โดยทดลองอัดรีดหน้ายางสำหรับยางล้อขนาด 225/65R17 102H หน้ายางถูกอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ความยาว 500 มิลลิเมตรเพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลมีอิทธิพลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง โดยที่อัตราการการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลและอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อโหลดในการอัดรีดสูง ผู้ผลิตสามารถใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลได้สูงสุดที่ 40 เปอร์เซ็นต์ และโหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมเท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตรจึงจะทำให้อัตราการบวมตัวของหน้ายางมีค่าอยู่ในขีดจำกัดข้อกำหนดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.60 ± 0.04

คำสำคัญ: การรีไซเคิลยางคอมพาวนด์ อัตราการบวมตัว หน้ายาง การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

The objective of this research is to study the effect of recycled rubber compound volumes on die swell ratio of a tread in the extrusion process applying two-factor factorial design without interaction. There are three blocks of recycled rubber compound volumes (0, 20 and 40 percentage). The die swell ratio of each block is measured for each of three extrusion loads (1.720, 1.735 and 1.750 kg/m) by the experiment of a tread extrusion for the tire size 255/65R17 102H. The tread is extruded by single screw extruder and records a weight of tread at 500 millimeters for calculating a die swell ratio of tread. The results of analysis of variance showed that the use of recycled rubber compound influences the die swell ratio of the tread which the die swell ratio have a tendency of decrease when recycled rubber compound volume is used and die swell ratio have a tendency of increase when the extrusion load is high, the manufacturers can use the volume of recycled rubber compound up to 40 percent and the suitable extrusion load, equals 1.720 kg/m, make the die swell ratio of the tread in the specification limits that are 1.60 ± 0.04.

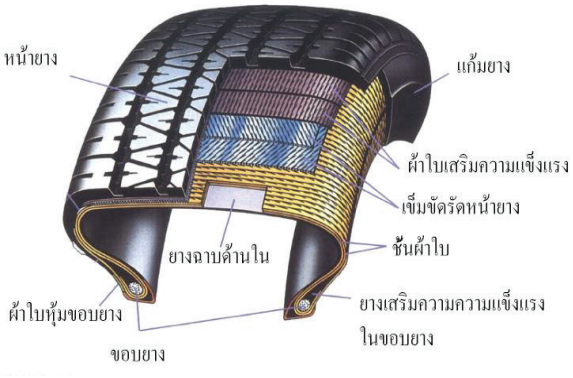
Keyword: Recycled Rubber Compound, Die Swell Ratio, Tread, Experimental Design

Received 17 May 2017
Accepted 17 August 2017

1. บทนำ

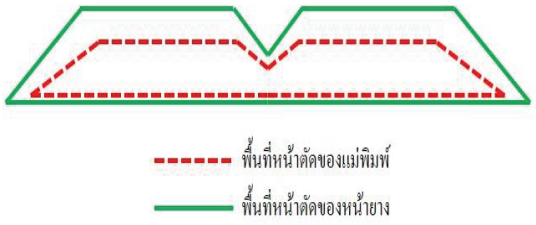
ทั่วโลกมีความต้องการยางล้อเพิ่มขึ้น 4.1% ต่อปี มีปริมาณมากถึง 3 พันล้านเส้นในปี พ.ศ.2562 มีมูลค่าการขายเพิ่มขึ้น 7% ต่อปี สูงถึง 258 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ การเติบโตมากกว่าครึ่งเกิดขึ้นในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และเป็นภูมิภาคที่มีความต้องการยางล้อเติบโตอย่างรวดเร็วที่สุด (5.8% ต่อปี) ทำให้หลายประเทศในเอเชียแปซิฟิกได้รับผลประโยชน์ โดยเฉพาะประเทศอินเดีย ประเทศอินโดนีเซีย และประเทศไทย [1] ประเทศไทยได้มีนโยบายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางล้อ อาทิ โครงการจัดตั้งศูนย์ทดสอบยานยนต์และยางล้อแห่งชาติ เพื่อให้ประเทศไทยเป็นผู้นำด้านการทดสอบและรับรองผลิตภัณฑ์ยานยนต์และชิ้นส่วน และยางล้อ นำไปสู่การเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนและยางล้อของอาเซียน [2]

ยางล้อเป็นส่วนประกอบของล้อ ยางล้อประเภทอัดลมมีหน้าที่ คือ การรับน้ำหนักบรรทุก การรับแรงกระแทก การส่งผ่านการขับและการเบรค การต้านทานการสึกหรอ การตอบสนองต่อพวงมาลัย แรงต้านทานมีเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนที่ต่ำ และความทนทานตลอดอายุการใช้งาน ยางล้อประกอบมาจากชิ้นส่วนย่อยหลายชิ้น เช่น หน้ายาง แก้มยาง ยางใน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 1 [3] ยางล้อหนึ่งเส้นนั้นมีวัตถุดิบหลายอย่าง เช่น คาร์บอนแบล็ค โลหะ สิ่งทอ สังกะสีออกไซด์ กำมะถัน สารเติมแต่ง และมียางเป็นวัตถุดิบหลัก ในยางล้อรถยนต์นั่งมียางเป็นส่วนผสมมากถึง 47% ซึ่งส่วนมากอยู่ในหน้ายาง (32.6% ของยางทั้งหมดโดยน้ำหนัก) [4] หน้ายางทำหน้าที่ ต่อต้านการสึกหรอของยางล้อ ต่อต้านการขัดถู เพิ่มการยึดเกาะ ทำให้ความเร็วมีเสถียรภาพ และปกป้องโครงของยางล้อ อีกทั้งหน้ายางผลิตมาจากยางคอมพาวนด์สำหรับต่อต้านการสึกหรอ แรงฉุด และการต้านทานการหมุนที่ต่ำ [5]

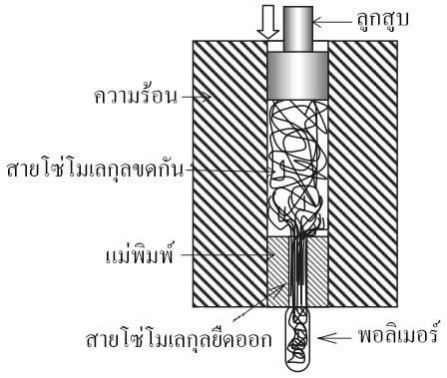


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของยางล้อรถยนต์นั่งประสิทธิภาพสูง [3]

หน้ายาง (Tread) ผลิตมาจากยางคอมพาวนด์ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) คือการอัดรีดยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ผ่านแม่พิมพ์ (Die) ทำให้เกิดโปรไฟล์ชิ้นยาว (Extrudate) เป็นหน้ายาง ในกระบวนการนี้ผลิตภัณฑ์มักจะมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าแม่พิมพ์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การบวมตัว (Die swell, Extrudate swell หรือ Barus effect) แสดงดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยทฤษฎีพลังงานสะสมแบบยืดหยุ่น นั่นคือในระหว่างที่ยางคอมพาวนด์มีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้องหลอมเหลว สายโซ่โมเลกุลจะขดกันเป็นกลุ่ม (Molecular entanglement) และถูกอัดรีดไหลผ่านแม่พิมพ์ ซึ่งในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวอยู่ในแม่พิมพ์ สายโซ่โมเลกุลจะถูกยืดออก (Molecular disentanglement) และเก็บสะสมพลังงานเอาไว้ เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลพ้นแม่พิมพ์พลังงานที่สะสมไว้จะถูกปลดปล่อยทำให้สายโซ่โมเลกุลคืนสภาพ ส่งผลให้เกิดการบวมตัวแสดงดังรูปที่ 3 [6]



รูปที่ 2 การบวมตัวของหน้ายาง



รูปที่ 3 การบวมตัวของพอลิเมอร์ตามทฤษฎีพลังงานสะสมแบบยืดหยุ่น [6]

หัวใจของกระบวนการอัดรีด คือ การควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ให้คงที่หรือการควบคุมอัตราการบวมตัว (Die swell ratio) กล่าวคือ ในกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์มีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [7] (1) ปัจจัยด้านสภาวะในการอัดรีด ประกอบด้วย อุณหภูมิในการอัดรีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวลดลง [6], [8] ความเร็วของสกรูที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [6] อัตราเฉือน (Shear rate) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [8-9] โหลดในการอัดรีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [10] (2) ปัจจัยด้านแม่พิมพ์ ประกอบด้วย ความยาวของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวลดลง [9], [11] การออกแบบแม่พิมพ์ (Die design) ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [12] และ(3) ปัจจัยด้านคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ประกอบด้วย คุณลักษณะของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันก็มีอิทธิพลส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [13-14]

ในอุตสาหกรรมยางทั่วไปมักจะมีการรีไซเคิล (Recycle) ยางที่หมดอายุการใช้งาน (End of life) และการนำยางที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) เป็นเรื่องปกติ โดยมีปริมาณประมาณ 3-15% และ 5-23% ตามลำดับ โดยทั่วไปในโรงงานจะมีของเสียเกิดขึ้นประมาณ 5-15% และในการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดรีดที่เป็นกระบวนการสุดท้ายจะเกิดของเสียประมาณ 2-5% [16] กระบวนการผลิตหน้ายางของโรงงานที่ได้ทำการศึกษามีการนำของเสียที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอัดรีดหน้ายางที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ การเปลี่ยนรุ่นการผลิต และการทดลองแม่พิมพ์มารีไซเคิล แล้วนำกลับมาใช้ในกระบวนการอัดรีดอีกครั้ง ในกระบวนการผลิตหน้ายางทั้งหมดของโรงงาน พบว่ามีการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในปริมาณเฉลี่ย 15% เทียบกับยางคอมพาวนด์ทั้งหมดที่ใช้

ในกระบวนการอัดรีดหน้ายางพบปัญหาหน้ายางมีอัตราการบวมตัวไม่เป็นไปตามข้อกำหนด และจากงานวิจัยของ John S. Dick [15] ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติหยุ่นหนืดของยางคอมพาวนด์ พบว่า สารเติมแต่งที่ต่างชนิดกันหรือมีปริมาณแตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการบวมตัวที่แตกต่างกัน จากการศึกษามีการคาดการณ์ว่าการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีด อาจจะส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางแตกต่างกัน ดังนั้น การศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีดหน้ายางจึงนำไปสู่การควบคุมอัตราการบวมตัว โดยการปรับโหลดในการอัดรีดให้เหมาะสมกับปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง โดยประยุกต์เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์และกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนด [17]

2. การทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอัดรีดหน้ายางสำหรับยางล้อรถยนต์นั่งอเนกประสงค์ (Sport utility vehicle: SUV) ขนาด 225/65R17 102H โดยมีอัตราการบวมตัวเป้าหมาย (Target) เท่ากับ 1.60 ± 0.04

2.1 วัสดุ

ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ยางคอมพาวนด์ที่มีคุณสมบัติ

- ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) เท่ากับ 57 ML1+4(100°C)
- ค่าความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 1.145 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

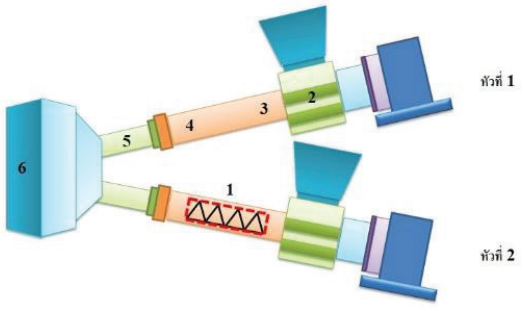
แม่พิมพ์หน้ายางที่ใช้ในงานวิจัยทำมาจากเหล็กเกรด S50C มีพื้นที่หน้าตัด (Cross-section area) เท่ากับ 16.87 ตารางเซนติเมตร

2.2 การเตรียมยางคอมพาวนด์รีไซเคิล

ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัย คือ ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดมาแล้ว โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลด้วยเครื่องผสมยางแบบปิดแบนบูรี่ (Banbury internal mixer) โดยใช้อุณหภูมิห้องผสม (Chamber) และตัวบดผสม (Rotor) ที่ 80°C

2.3 สภาวะในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอัดรีดหน้ายางด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวสองหัวแสดงดังรูปที่ 4 แต่ละหัวมีขนาดสกรูเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ความเร็วสกรูเท่ากับ 8.7 รอบต่อนาที อุณหภูมิของ (1) สกรู, (2) บริเวณป้อนยางคอมพาวนด์, (3) บาเรลบริเวณป้อนยาง, (4) บาเรลบริเวณกลาง, (5) บาเรลบริเวณหัว และ (6) หัว เท่ากับ 70, 60, 55, 50, 45 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4 แผนภาพตำแหน่งจุดปรับตั้งอุณหภูมิในการอัดรีด

2.4 การวัดอัตราการบวมตัว

อัตราการบวมตัว (Die swell ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์กับพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ ดังสมการที่ (1) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วัดอัตราการบวมตัวของหน้ายางด้วยน้ำหนักและความยาวของหน้ายาง ดังสมการที่ (2) [6]

$$\text{Die swell ratio} = \frac{A'}{A} \qquad (1)$$

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์

A' = พื้นที่หน้าตัดของหน้ายาง

เนื่องจาก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของหน้ายาง} = \frac{\text{ปริมาตรของหน้ายาง}}{\text{ความยาวของหน้ายาง}}$$

โดยที่

$$\text{ปริมาตรของหน้ายาง} = \frac{\text{น้ำหนักของหน้ายาง}}{\text{ค่าความหนาแน่น}}$$

ดังนั้น

$$\text{Die swell ratio} = \frac{W}{D*A*L} \qquad (2)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของหน้ายาง

D = ค่าความหนาแน่น

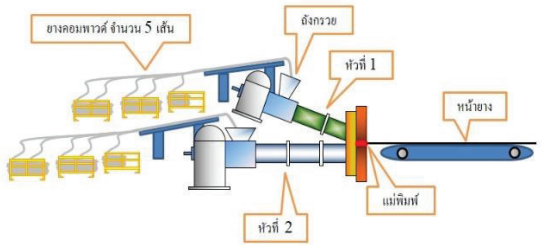
A = พื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์

L = ความยาวของหน้ายาง

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองอัดรีดยางคอมพาวนด์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมของหน้ายางนั้น ปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%R: A) หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ และโหลดในการอัดรีด (Load: B) หรือปริมาณยางคอมพาวนด์ที่ไหลออกจากแม่พิมพ์ หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง ขนาด 225/65R17 102H โดยมีการป้อนยางคอมพาวนด์

เข้าเครื่องอัดรีดที่เหมาะสมอยู่ที่จำนวน 5 เส้นต่อหัว แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการป้อนยางคอมพาวน์เข้าเครื่องอัดรีด

งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดลองแบบบล็อกโดยการทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเนื่องจากการเพิ่มโหลดในการอัดรีดหรือการเพิ่มปริมาณยาง (กิโลกรัมต่อเมตร) จะทำให้อัตราการบวมตัวของหน้ายางเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะใช้ปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลเท่าไรก็ตาม ดังนั้น เมื่อผู้ทดลองเข้าใจความสัมพันธ์อยู่แล้ว ผู้ทดลองสามารถลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้ กล่าวคือ การบล็อก (Blocking) ปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลที่ระดับแตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผสมยางคอมพาวน์รีไซเคิลเข้ากับยางคอมพาวน์บริสุทธิ์ต่ออัตราการบวม อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในการเปรียบเทียบโหลดในการอัดรีดที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางร่วมกันได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) วิเคราะห์ความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยและระดับปัจจัยที่แตกต่างกันส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ [18]

การกำหนดบล็อกของปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลที่ใช้ในการทดลอง คือ 0 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณยางที่ใช้ โดยพิจารณาจากปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลที่สามารถกำหนดได้ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นยางคอมพาวน์รีไซเคิลต่อเส้นยางคอมพาวน์บริสุทธิ์ อาทิ 1:4 หมายถึง การใช้ยางคอมพาวน์รีไซเคิล 20 เปอร์เซ็นต์ต่อยางคอมพาวน์บริสุทธิ์ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้ปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลเฉลี่ยอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น บล็อกสูงสุดจึงกำหนด เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ การกำหนดระดับปัจจัยของโหลดในการอัดรีดกำหนดจากพิสัยของปริมาณยางคอมพาวน์เดิม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บล็อกและค่าระดับปัจจัยของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
A: ปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิล (%)	0	20	40
B: โหลดในการอัดรีด (กก./ม.)	1.720	1.735	1.750

ในการทดลองอัดรีดหน้ายางในแต่ละบล็อก ปริมาณยางคอมพาวน์รีไซเคิลจะดำเนินการทดลองปรับสภาวะโหลดในการอัดรีด (Load) แบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดในการทดลองจากปัจจัยรบกวน ในแต่ละสภาวะของการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replication) และบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ความยาว 500 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 การชั่งน้ำหนักตัวอย่าง

3. ผลการทดลอง

ผลการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวน์รีไซเคิล (Block) ที่ส่งผลต่อการบวมตัวของหน้ายางแสดงค่าอัตราการบวมตัวในตารางที่ 2 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน ความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง และวิเคราะห์หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง โดยใช้โปรแกรม Minitab16

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง ขนาด 225/65R17 102H

ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%)	โหลดในการอัดรีด (กิโลกรัม/เมตร)								
	1.720			1.735			1.750		
0	1.619	1.621	1.627	1.625	1.628	1.629	1.635	1.636	1.640
20	1.595	1.592	1.597	1.593	1.591	1.596	1.603	1.607	1.610
40	1.592	1.594	1.598	1.598	1.600	1.603	1.605	1.606	1.614

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของหน้ายางด้วยแบบจำลองทางสถิติสำหรับการทดลองปัจจัยตัวเชิงประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย แสดงดังสมการที่ (3) โดยแสดงผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 พบว่าปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%R) และปัจจัยโหลดในการอัดรีด (Load) มีอิทธิพลส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ ค่าวิกฤติมีค่าเท่ากับ $F_{0.05,2,22} = 3.44$ ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 96.25% และสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่มีการปรับค่า(Adjusted R^2) เท่ากับ 95.57%

$$y_{ijk} = \mu+\tau_i+\beta_j+\varepsilon_{ijk} \quad ,i = 1,2,3 \quad j = 1,2,3 \quad k = 1,2,3 \qquad (3)$$

โดยที่ y_{ijk} หมายถึง ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางที่ k ทดลองภายใต้ระดับของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ j และภายใต้โหลดในการอัดรีดที่ i

μ หมายถึง ค่าเฉลี่ยรวมของอัตราการบวมตัว

τ_i หมายถึง ค่าผลกระทบของโหลดในการอัดรีดที่ i

β_j หมายถึง ค่าผลกระทบของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ j

ε_{ijk} หมายถึง ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง

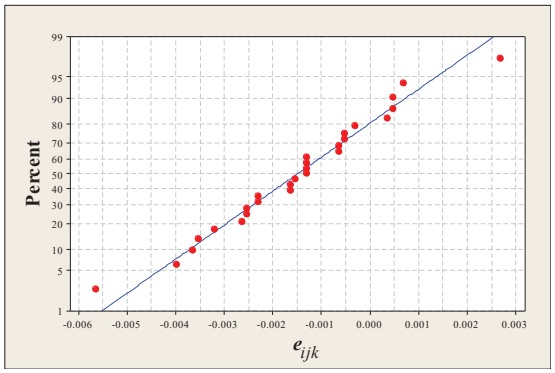
Source	DF	SS	MS	F
Load	2	0.0008916	0.0004458	41.61
%R	2	0.0051612	0.0025806	240.87
Error	22	0.0002357	0.0000107	
Total	26	0.0062885		
R-Sq = 96.25%			R-Sq(adj) = 95.57%	

3.2 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองในการทดลอง

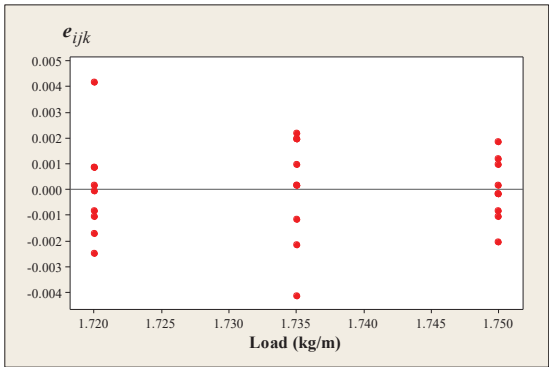
การตรวจสอบแบบจำลองทางสถิติดังสมการที่ (3) ของค่าสังเกตอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดลอง ภายใต้สมมติฐาน $e_{ijk} \sim N(0,\sigma^2)$ โดยการวิเคราะห์ค่าตกค้าง (Residual analysis: e_{ijk}) กล่าวคือ ค่าสังเกตหรือค่าตกค้างต้องมีการแจกแจงปกติด้วยค่าความแปรปรวนที่เท่ากันสำหรับแต่ละระดับปัจจัย [18] สามารถวิเคราะห์ค่าตกค้างได้ดังต่อไปนี้

1) การแจกแจงปกติ โดยการพล็อตค่าตกค้างลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงปกติ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าตกค้างเรียงตัวเป็นเส้นตรง เนื่องจากทุกจุดเมื่อคำนวณด้วยค่าตกค้างมาตรฐาน (d_{ijk}) แล้วไม่พบว่ามีจุดใดมีค่าเกิน ±3

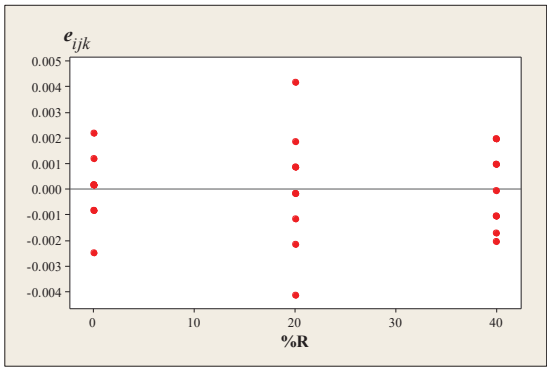
2) ความเท่ากันของความแปรปรวน โดยการพล็อตค่าตกค้างเทียบกับโหลดในการอัดรีด และเทียบกับบล็อกยางคอมพาวนด์รีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันและมีการกระจายอย่างสุ่ม



รูปที่ 7 ค่าตกค้างของอัตราการบวมตัวที่มีการแจกแจงปกติ



(1) ค่าตกค้างเทียบกับโหลดในการอัดรีด



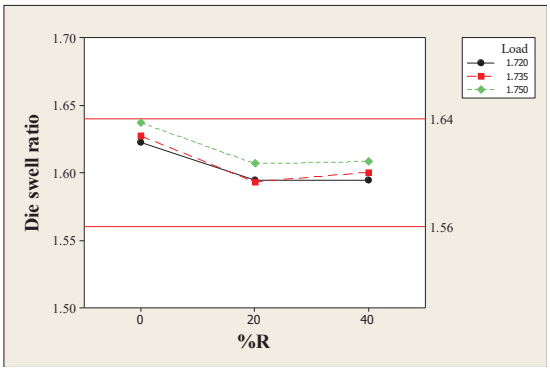
(2) ค่าตกค้างเทียบกับบล็อกยางคอมพาวนด์รีไซเคิล

รูปที่ 8 กราฟตรวจสอบความแปรปรวน

สรุปได้ว่าแบบจำลองทางสถิติสำหรับการทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแสดงดังสมการที่ (3) แกร่ง (Robustness) กลุ่มข้อมูลอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือตามสมมติฐาน $e_{ijk} \sim N(0,\sigma^2)$

3.3 การวิเคราะห์บล็อกและระดับปัจจัย

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยที่จำแนกตามบล็อก ภายใต้โหลดในการอัดรีดเท่ากับ 1.720, 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร ดังรูปที่ 9 พบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลจะทำให้สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดมากขึ้น (เกิดการสะสมพลังงานได้น้อยลง) ทำให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า คุณลักษณะของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันจะมีอิทธิพลส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [13-14] เมื่อโหลดในการอัดรีดเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของยางคอมพาวนด์หลอมเหลวหลังพ้นหัวแม่พิมพ์ลดลง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยืดน้อยลงตามแนวสายพานทำให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกระบวนการผลิตหน้ายางสามารถใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลได้สูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางเป็นไปตามข้อกำหนด คือ 1.60 ± 0.04 อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างกันของโหลดในการอัดรีดด้วยวิธีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่น้อยที่สุด (The least significant difference method: LSD method) พบว่า โหลดในการอัดรีดเท่ากับ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร มีค่าอัตราการบวมตัวมากกว่าโหลดในการอัดรีดอื่น ขณะที่การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 เปอร์เซ็นต์ กับ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางน้อยกว่ายางคอมพาวนด์บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

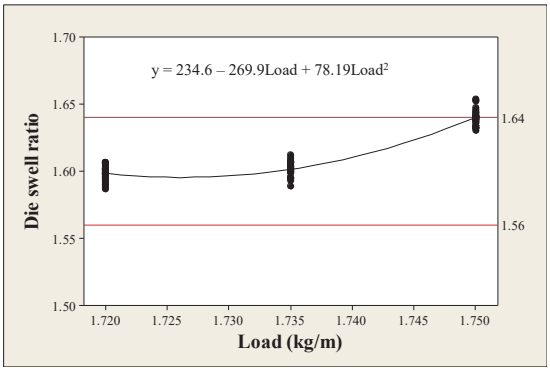


รูปที่ 9 กราฟค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง

4. การทดสอบเพื่อยืนยันผล

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง พบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 เปอร์เซ็นต์ กับ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α = 0.05) จึงได้ทำการยืนยันผลการทดลอง เพื่อหาโหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมสำหรับการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิล ได้แก่ 1.720 1.735 และ1.750 กิโลกรัมต่อเมตร ตามลำดับ ภายใต้ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (Block) เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ (1:4) และ 40 เปอร์เซ็นต์ (2:3) โดยทำการทดลองซ้ำ 15 ครั้ง แล้วพิจารณาค่าอัตราการบวมของหน้ายาง

ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล พบว่า โหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมสำหรับปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตร เนื่องจากค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีค่าเท่ากับ 1.60 ± 0.01 และ 1.60 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าอัตราการบวมตัวเป้าหมายเท่ากับ 1.60 ± 0.04 โดยมีแบบจำลองการถดถอยเชิงพหุนามกำลังสอง เพื่อทำนายผลลัพธ์อัตราการบวมตัวของหน้ายางแสดงดังรูปที่ 10 ภายใต้สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square = 92.0%



รูปที่ 10 แบบจำลองทำนายอัตราการบวมตัว

5. สรุป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีดหน้ายางสำหรับยางล้อรถยนต์นั่งเอนกประสงค์ (Sport utility vehicle: SUV) ขนาด 225/65R17 102H โดยการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ผลการวิจัยพบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลส่งผลให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มลดลง ภายใต้โหลดในการอัดรีดเท่ากับ 1.720, 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร ตามลำดับ โดยค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางที่ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 กับ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ α = 0.05 ดังนั้นในการผลิตยางล้อรถยนต์สามารถเลือกใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (Block) ที่ระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ได้ เมื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของโหลดในการอัดรีด พบว่าปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ควรใช้โหลดในการอัดรีดหน้ายางเท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตร

ดังนั้น ในอุตสาหกรรมยางล้อ หากมีการนำยางคอมพาวนด์รีไซเคิลมาใช้ในกระบวนการอัดรีดหน้ายางจะต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ เพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีอัตราการบวมของหน้ายางให้เป็นไปตามข้อกำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท สยามมิชลิน จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยจำนวน 127,500 บาท และสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Tire demand to top three billion units by 2019. Rubber World, Freedonia Group, 2016; 253(4): 10.

[2] Thailand Board of Investment. Next generation automotive - a new era for Thailand. *Thailand Investment Review,* 2017; 27(3): 5-7.

[3] Rodgers, B. and Waddell, W. Tire Engineering. The science and technology of rubber, Waltham: Elsevier, 2013; 653-695.

[4] Evans, A. and Evans, R. The composition of a tire: Typical components. *The Waste&Resources Action Programme*, 2016; 1-5.

[5] Waddell, W. and Tsou, A.H. Butyl rubbers. Rubber compounding. Marcel Dekker, New York, 2014.

[6] Intawong, N. Extrudate swell behavior of polymer melt in extrusion process. *The Journal of KMUTNB*, 2009; 19(3): 449-454.

[7] Sirisinha, C. A review of extrudate swell in polymers. *Science Society of Thailand*, 1997; 23: 259-280.

[8] Liang, J. Z. Effect of the die angle on the extrusion swell of rubber compound. *Materials Processing Technology.* 1995; 52: 207-212.

[9] Liang, J. Z. A study of die-swell behavior of rubber compounds during short-die extrusion. *Materials Processing Technology.* 1996; 59: 268-271.

[10] Wong, A. C. Y. and Liang, J. Z. Relationship between die swell ratio and melt flow index. *Chemical Engineering Science*. 1997; 52(18): 3219-3221.

[11] Wang, K. Die swell of complex polymeric systems. Viscoelasticity-From theory to biological applications, ISBN: 978-953-51-0841-2, InTech, Rijeka, 2012.

[12] Sombatsompop, N. and Dangtungee, R. Flow visualization and extrudate swell of natural rubber in a capillary rheometer: Effect of die/barrel system. *Journal of Applied Polymer Science.* 2001; 82: 2525-2533.

[13] Koopmans, R. J. Die swell or extrudate swell. Polypropylene: An A-Z Reference. ISBN: 0-412-80200-7, Kluwer, Dordrecht,1999.

[14] Dangtungee, R., Desai, S. S., Tantayanon, S. and Supaphol, P. Melt rheology and extrudate swell of low-density polyethylene/ethylene-octene copolymer blends. *Polymer Testing*. 2006; 25: 888-895.

[15] Dick, J.S., Norton, E. and Xue, T. Measuring the effects of filler variations on compound viscoelastic properties as measured by the capillary rheometer and RPA. *Rubber World*, 2016; 39-45.

[16] Forrest, M. Overview of the world rubber recycling market. Recycling and Re-use of Waste Rubber, ISBN: 978-184735-684-0, Smithers Rapra, UK, 2014.

[17] Tanakulchaitawee, K. and Nathaphan, S. Design of experiments to analyze factors affecting the main function of u-shaped plastic shopping bags. *Naresuan University Engineering Journal*, 2014; 9(12): 38-47.

[18] Nathaphan, S. Basic Design and Analysis of Experiments. ISBN: 978-616-08-2475-5, Thailand, 2016.