



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

An Investigation into Weldline Strength of Rubber Molded Parts

نامผู้วิจัย นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จิระชัย มิ่งบรรเจิดสุข, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ไพโรจน์ จิตธรรม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์นุชนาฏ ฌ ระนอง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พิชร์พันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา อีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

An Investigation into Weldline Strength of Rubber Molded Parts

โดย

นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัชรพงษ์ ชูแก้ว 2557: การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง
ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ปริญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์จรัสชัย มิ่งบรรเจิตสุข, Ph.D. 147 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการคงรูป และปัจจัย
จากกระบวนการผลิต ที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและอายุความล้าของชิ้นงานยาง
ธรรมชาติที่มีรอยประสาน จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต
ในชิ้นงานยางไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานต่อแรงดึง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความ
ต้านทานต่อแรงดึงและอายุความล้าระหว่างชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานมีค่าเพิ่มมากขึ้น
เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำและซิลิกา และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของระบบการคงรูป พบว่า ชิ้นงานยาง
ที่มีรอยประสานเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าแบบ
ประสิทธิภาพ ในขณะที่มีอายุความล้าสูงกว่าแบบประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผลจากการศึกษา
ยังแสดงให้เห็นว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและอายุความล้าของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานและ
ตำแหน่งที่เกิดรอยประสาน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาจาก
พื้นฐานของแบบจำลองจลนพลศาสตร์กระบวนการคงรูป แบบจำลองการถดถอย และแบบจำลอง
เครือข่ายประสาทเทียม สามารถทำนายผลได้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ยัง
ได้นำเสนอแนวทางการสร้างฟังก์ชันพลังงานความเครียดของชิ้นงานยางที่พัฒนามาจาก
แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด โดยได้
เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Neo-Hookean Mooney-Rivlin และ Ogden
ที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนาย
พฤติกรรมของวัสดุยางได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเครียดต่ำและช่วง
ความเครียดสูง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Watcharapong Chookaew 2014: An Investigation into Weldline Strength of Rubber Molded Parts. Doctor of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Jirachai Mingbunjerdasuk, Ph.D. 147 pages.

This work aims to investigate the effects of filler types and contents, vulcanizing systems, and processing parameters on the tensile strength and fatigue life of weldline containing natural rubber (NR) parts. From the experimental results, it can be seen that the increasing amount of CaCO_3 did not affect the tensile strength of NR. However, the differences in maximum tensile strength and fatigue life between weldline and non-weldline NR specimens became larger with the increase of SiO_2 and CB concentration. In the case of curing systems, the tensile strength of weldline containing NR vulcanized by CV system was found to be lower than that of EV system, while the fatigue life of NR vulcanizates using CV system was higher than of EV system. The results also suggested that the tensile strength and fatigue life of NR containing weldline significantly increased with the increase of mold temperature and clamping pressure.

The mathematical models for the prediction of weldline strength and weldline position have been developed. A satisfying agreement between the analytical and experimental results indicated that the kinetic model for vulcanization, regression models and neural network model can be employed as a valuable tool for the prediction of weldline strength of rubber molded parts and also the occurrence of weldlines during the compression molding process. In addition, the neural network model was utilized for construction the strain-energy-density function in order to simulate the stress-strain behavior of rubber parts. The proposed model was verified to the experiments and those of general constitutive models i.e. Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, and Ogden models. From the comparison results, a good agreement between developed model and existing experimental data was found, especially at very low strain and at very high strain.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. จิระชัย มิ่งบวรเจตสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์ อ.ดร. นุชนาฏ ฌ ระนอง และ อ.ดร. ไพโรจน์ จิตธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาทั้งในเรื่องการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และที่สำคัญได้วางแนวทางในการดำเนินชีวิตสำหรับการเป็นบุคลากรด้านการวิจัยที่ดี และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ชาคิต สิริสิงห์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัย ผศ.ดร. นุชนาฏ ตั้งบริบูรณ์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (PaRP-Group) ที่ได้มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัย และได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่ในการดำเนินงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา จนกระทั่งผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

งานวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากขาดซึ่งการสนับสนุนจากหน่วยงานต่อไปนี้ คือ สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการวิจัยขนาดเล็กและขนาดกลางเรื่องยาพารา ซึ่งได้สนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานวิจัย และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้มอบทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ให้ข้อคิดและเป็นที่กำลังใจให้กับผู้วิจัยทุกเรื่องและทุกเวลาในยามที่ต้องการ ขอขอบใจน้องสาวทั้งสองคนและน้องๆ ในกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง ที่ให้การดูแลและคอยช่วยเหลือเป็นอย่างดีในช่วงเวลาที่ทำงานวิจัย และด้วยคุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นอันสืบเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่ ทุกคนที่ได้เอ่ยนามมาแล้วข้างต้น รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่มีอุปการคุณต่อผู้วิจัย

วัชรพงษ์ ชูแก้ว

มกราคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	63
สรุปและข้อเสนอแนะ	119
สรุป	119
ข้อเสนอแนะ	121
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	123
ภาคผนวก	133
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์และยางคงรูป	134
ภาคผนวก ข โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการคำนวณ	142
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัย
2	ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน
3	แผนการทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม
4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม
5	แผนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1
6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1
7	แผนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 2
8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 2
9	แผนการทดลองเพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายตำแหน่งการเกิดรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป
10	ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการที่ 62
11	ความแม่นยำของแบบจำลองไฮเปอร์อิลาสติกที่ได้พัฒนาขึ้นด้วยสมการที่ใช้หาค่าพลังงานความเครียดแบบต่าง ๆ
ตารางผนวกที่	
ก1	ความหนาแน่นของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV และยางคอมพาวนด์ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่าง ๆ
ก2	สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV และยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ
ก3	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน
ก4	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน
ก5	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเซมาดำในปริมาณต่าง ๆ กัน

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก6 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	137
ก7 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	137
ก8 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต	137
ก9 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกา	138
ก10 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำ	138
ก11 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ระดับการคงรูปต่าง ๆ	138
ก12 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน	139
ก13 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน	139
ก14 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน	139
ก15 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปทั้งมีและไม่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	139
ก16 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปทั้งมีและไม่มีรอยประสานแบบร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ หลังสิ่งกีดขวาง	140
ก17 อายุความล้าแบบดึงยึดของชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ กัน	140
ก18 อายุความล้าแบบดึงยึดของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr เมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	140
ก19 อายุความล้าแบบดึงยึดของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	141
ก20 อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV	141

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์	1
2	สาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงที่บริเวณรอยประสาน	2
3	ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปยาง	5
4	ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดส่งขึ้นรูปยาง	6
5	ลักษณะเครื่องและแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง	7
6	ชนิดของรอยประสาน	8
7	รอยประสานบนชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายทางเข้า	9
8	ลักษณะการวางชิ้นงานยางคอมพาวนด์สองตำแหน่งและรอยประสานที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูป	9
9	การเกิดรอยประสานจากรอยฟัน	10
10	เทคนิค Sequential Valve Gate	11
11	เทคนิค Push-Pull Injection	11
12	เทคนิค Multiple live-feed injection molding	12
13	การแทรกตัวของสายโซโม่เลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส	13
14	การออกแบบแม่พิมพ์ให้มีตำแหน่งยึดเกาะโดยทางกล	13
15	แรงวันเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ	14
16	การแพร่ข้ามของสายโซโม่เลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส	14
17	สายโซโม่เลกุลยาง	17
18	ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง ODR หรือ MDR	19
19	สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน	20
20	โครงสร้างตาข่าย	23
21	พฤติกรรมยืดหยุ่นของวัสดุ	24
22	แบบจำลองสายโซโม่เลกุลยาง	25
23	พฤติกรรมของวัสดุยางเมื่อได้รับแรงดึง	26
24	พฤติกรรมของวัสดุยางเมื่อได้รับแรงดึงและแรงอัด	26
25	แบบจำลองแบบ 8 chain	28
26	การทดสอบยาง	32
27	การทดสอบแบบดึงแกนเดียว	32
28	การทดสอบแบบดึงสองแกน	34
29	การทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	39
31	การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412	41
32	การทดสอบสมบัติอายุความล้าแบบดึงยึดตามมาตรฐาน BS903-A51	42
33	ทดสอบสมบัติอายุความล้าแบบหักงอตามมาตรฐาน ASTM D430	43
34	แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสาน	44
35	การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	44
36	ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	45
37	เงื่อนไขในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	45
38	แม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสาน	46
39	ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	47
40	เงื่อนไขในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	47
41	ชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบดึงยึด	48
42	แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ	49
43	การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ	49
44	ชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหักงอที่ผ่านการอัดขึ้นรูป	50
45	แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับเก็บข้อมูลตำแหน่งรอย ประสาน	50
46	ลักษณะการวางยางคอมพาวด์เริ่มต้นและรอยประสานที่เกิดขึ้น	51
47	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานของ ชิ้นงานยางอัดขึ้นรูป	52
48	สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	54
49	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายตำแหน่ง รอยประสาน	56
50	การเก็บพิกัดตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	56
51	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของรอยประสาน	57
52	ขั้นตอนการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม CADMOULD VERSION 2.0	58
53	การ Import แบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์เข้ามาในโปรแกรม CADMOULD	58
54	แบบจำลองหลังการสร้างโครงร่างตาข่าย	58
55	ความหนืดของยางคอมพาวด์ที่ใช้วิเคราะห์	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	ข้อมูลของวัสดุและตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้วิเคราะห์	59
57	ผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CADMOULD VERSION2.0	60
58	ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก	61
59	ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์	62
60	ความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์เมื่อ बदผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ กัน	63
61	ความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV	64
62	เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อ बदผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ กัน	65
63	สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบคงรูปแบบ EV และ CV	66
64	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน	67
65	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน	69
66	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยประสานที่แสดงให้เห็นร่องบากรูปตัววีและโพรงอากาศขนาดเล็ก	69
67	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน	70
68	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV	71
69	แบบจำลองแสดงสภาวะที่เกิดขึ้น ณ บริเวณรอยประสาน	72
70	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	73
71	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	74
72	ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน	75
73	ผลการทดสอบด้วยเครื่อง MDR ของยางคอมพาวนด์เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน และใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 150°C	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน	76
75	ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน	77
76	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV	78
77	ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้ระดับการคงรูปแบบต่าง ๆ กัน	79
78	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน	81
79	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	82
80	ตำแหน่งของชิ้นงานยางทดสอบเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง	83
81	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็นและแบบร้อนเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	83
82	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน	84
83	การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ตำแหน่งต่าง ๆ หลังสิ่งกีดขวาง	85
84	ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมในปริมาณ 30 phr เมื่อผ่านกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูป	86
85	การสูญเสียฮีสเทอรีซิสชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำ	87
86	อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำ	88
87	อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	89
88	อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	89
89	อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV	90
90	อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
91	ผลการทำนายระดับการคงรูปโดยใช้แบบจำลอง Isayev and Deng	92
92	ผลการเปรียบเทียบทำนายความแข็งแรงรอยประสานที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดสอบจริงเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน	94
93	ผลการทำนายความแข็งแรงรอยประสานที่ใช้เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 170°C	95
94	สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน	97
95	ความแม่นยำของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเมื่อผันแปรอัตราการ เรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัด	99
96	ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน	101
97	ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน	103
98	ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางไม่ผสมสารตัวเติมที่ได้จาก แบบจำลองต่าง ๆ	104
99	ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสม แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน	104
100	ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสม ซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน	105
101	ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสม เซมาต้าในปริมาณต่าง ๆ กัน	105
102	ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม	107
103	ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการ ฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียม	108
104	ผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม	108
105	ผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม	109
106	ผลทดสอบการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ ผลการทดลอง	110
107	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจาก การฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน	111
108	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจาก การฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็น	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

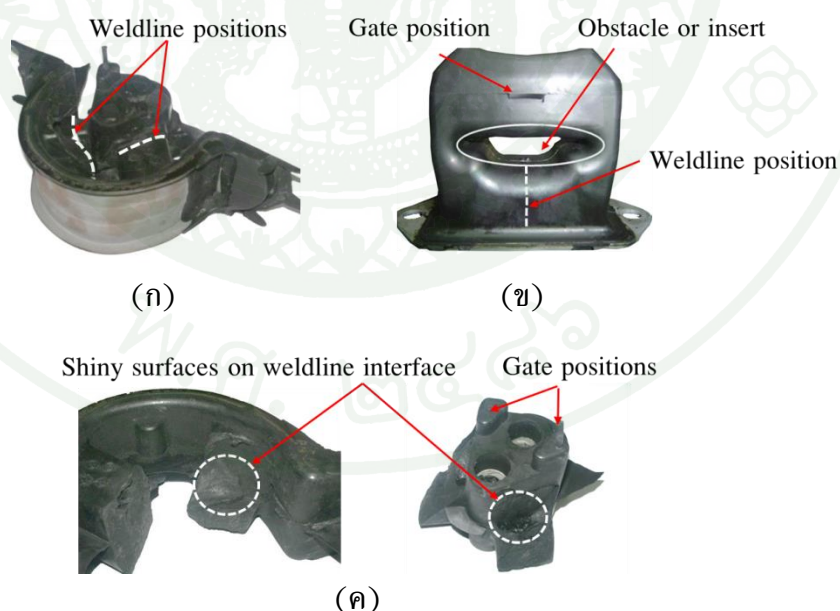
ภาพที่		หน้า
109	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากการฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อน	112
110	สาเหตุที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและเกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง	113
111	การเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบดึงแบบแกนเดียวและผลการทำงานด้วยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก	115
112	การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกทั่วไปและแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากเครือข่ายประสาทเทียม	115
113	การเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลอง	118
ภาพผนวกที่		
ข1	Source code MATLAB สำหรับการคำนวณค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์กระบวนการคงรูป	143
ข2	ตัวอย่าง Source code MATLAB สำหรับการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป	144
ข3	ตัวอย่าง Source code MATLAB สำหรับการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเค้นในชิ้นงานยาง	145

การศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

An Investigation into Weldline Strength of Rubber Molded Parts

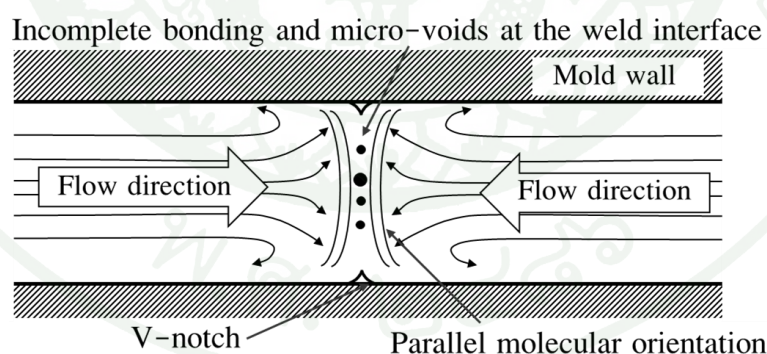
คำนำ

รอยประสาน (weldline) ที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ ยังคงเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติเชิงกล (mechanical property) และอายุการใช้งาน (life cycle) ของผลิตภัณฑ์ การเกิดรอยประสานมีสาเหตุมาจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนสูง ซึ่งจำเป็นต้องวางยางคอมพาวด์หลายตำแหน่ง (ในกระบวนการอัดขึ้นรูป) หรือการใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้ามากกว่าหนึ่งตำแหน่ง (ในกระบวนการอัดส่งขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป) และนอกจากนี้รอยประสานยังอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันมาก ปัญหาดังกล่าวนี้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันตลาดมีความต้องการชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งรอยประสานอาจเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยในภาพที่ 1(ก) และ (ข) แสดงตำแหน่งรอยประสานบนผลิตภัณฑ์ยาง และภาพที่ 1(ค) แสดงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานในขณะนำป้อนออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (ก) รอยประสานบนผิวผลิตภัณฑ์ที่มีหลายทางเข้า (ข) รอยประสานบนผิวผลิตภัณฑ์ที่ยางไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และ (ค) การฉีกขาดที่บริเวณรอยประสานของผลิตภัณฑ์ยาง

ความแข็งแรงที่ลดลงบริเวณรอยประสานในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก มีสาเหตุมาจากบริเวณหน้าสัมผัสของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการแพร่ข้ามและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ (incomplete molecular diffusion and molecular entanglement) การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล (molecular orientation) ขนานกับรอยประสานหรือตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง และการเกิดร่องบากตัววี (V-notch) ที่บริเวณรอยประสาน รวมทั้งการเกิดโพรงอากาศ (voids) ที่หน้าสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงทางกลของชิ้นงานลดลงประมาณ 30–50% (Kazmer, n.d.; Overton, n.d.) รวมทั้งอัตราการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า (Merah *et al.*, 2004) มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานสำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Kim and Suh, 1986; Mekhilef *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2004) ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎีการแพร่ (diffusion theory) โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ เวลาที่พอลิเมอร์หลอมเหลวสัมผัสกัน (contact time) และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่บริเวณหน้าสัมผัส (contact temperature) และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรในกระบวนการผลิตที่ถูกเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองเพื่อให้สามารถทำนายผลได้แม่นยำมากขึ้น ตัวอย่างเช่น แรงดันในการฉีด (injection pressure) และอุณหภูมิพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt temperature) (Chen *et al.*, 2007) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามบริเวณรอยประสานของชิ้นงานยางนั้น มีทั้งการแพร่ข้ามระหว่างหน้าสัมผัสและเชื่อมขวางเป็นโครงข่ายระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาที่สัมผัสกันภายในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนกว่ากลไกที่เกิดขึ้นในวัสดุเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองเช่นเดียวกันได้



ภาพที่ 2 สาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงที่บริเวณรอยประสาน

ในปัจจุบันการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ได้เข้ามามีบทบาทในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น โดยความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นขึ้นอยู่กับแบบจำลองคอนสติติวทีฟ (constitutive model) ที่สามารถทำนายหรือจำลองผลได้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมาก

ที่สุด จากการสำรวจเอกสารที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองคอนสติดิวทีฟที่พัฒนาจากพื้นฐานของวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติ (statistical thermodynamics approach) สามารถทำนายพฤติกรรมได้แม้ว่าอยู่นอกช่วงของการทดสอบ อย่างไรก็ตามผลการทำนายยังคงมีความแม่นยำที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่พัฒนาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต (phenomenological approach) ซึ่งพบว่า แบบจำลองสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเครียดประมาณ 50% (Sharlton *et al.*, 1993) และหากพิจารณาความแม่นยำของแบบจำลองคอนสติดิวทีฟที่พัฒนาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต พบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำหากข้อมูลที่ใช้ในการทำนายอยู่ในช่วงของการทดสอบ เนื่องจากหลักการของวิธีนี้ คือ การสร้างฟังก์ชันพลังงานความเครียดจากการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ของข้อมูลจากการทดสอบ เพื่อหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของฟังก์ชัน ซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพนั้นต้องสามารถปรับเส้นโค้งได้แม่นยำมากที่สุด โดยวิธีที่นักวิจัยใช้ในการพัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มเทอมและอันดับ (term and order) ของอัตราการจัดตัวหรืออินวาเรียนต์ของความเครียด (strain invariants) เข้าไปในฟังก์ชันพลังงานความเครียด (strain energy function) อย่างไรก็ตามแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนาขึ้นโดยส่วนใหญ่แล้วมีประสิทธิภาพในช่วงความเครียดกลาง ๆ (moderate strain) ส่งผลให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุในช่วงความเครียดต่ำมาก (low strain < 0.3) หรือสูงมาก (high strain > 2.5) ได้ (Shen *et al.*, 2004)

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดรอยประสาน ความแข็งแรงของรอยประสาน รวมถึงแนวทางในการปรับปรุงความแข็งแรงของรอยประสาน โดยเน้นไปที่วัสดุเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (Malguarnera and Manisali, 1981; Kim and Suh, 1986; Selden, 1997; Liu *et al.*, 2001; Nguyen-Chung, 2004; Turng and Kharbas, 2004; Wu and Liang, 2005; Patcharaphun *et al.*, 2006; Morelli *et al.*, 2007) ในขณะที่ด้านวัสดุเทอร์โมเซตติง (Davis and Gramanm, 2003; Rios *et al.*, n.d.) และวัสดุยางมีรายงานวิจัยน้อยมาก (Seadan *et al.*, 2002) ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงความแข็งแรงของรอยประสานและอายุความล้าในชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีรอยประสาน ได้แก่ ปัจจัยที่มาจากส่วนผสมยางคอมพาวนด์ เช่น ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงระบบการคงรูปของยาง และปัจจัยที่มาจากกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์ และเวลาการคงรูป ส่วนที่สองเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายความแข็งแรงของรอยประสานและตำแหน่งรอยประสาน ทั้งจากกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป และส่วนที่สามได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองคอนสติดิวทีฟสำหรับอธิบายลักษณะของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะขึ้นงานได้รับแรง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวด์และปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานและอายุความล้าของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายตำแหน่งรอยประสาน (weldline position) และความแข็งแรงรอยประสาน (weldline strength) ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานยาง
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองคอนสตีติวทีฟสำหรับอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปร่าง (deformation) ของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน

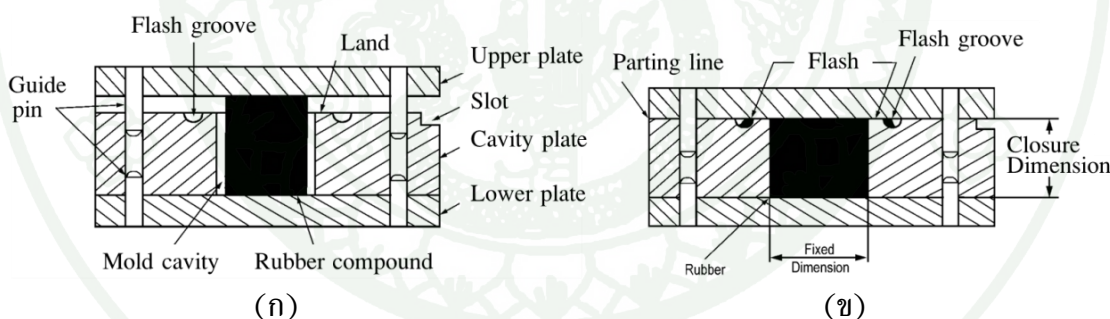
การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์ (rubber molding process)

กระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (transfer molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) โดยมีหลักการเดียวกัน คือ การให้ความร้อนและแรงดันแก่ยางคอมพาวนด์เพื่อให้ยางสามารถไหลไปตามช่องทางการไหล และเกิดกระบวนการคงรูป (vulcanization) ภายในแม่พิมพ์ (cavity)

1.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding)

กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและการลงทุนทางด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ต่ำกว่ากระบวนการอื่น องค์ประกอบของแม่พิมพ์อัดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (upper mold half) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (lower mold half) ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และ (ข)



ภาพที่ 3 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปยาง (ก) ก่อน และ (ข) หลังปิดแม่พิมพ์

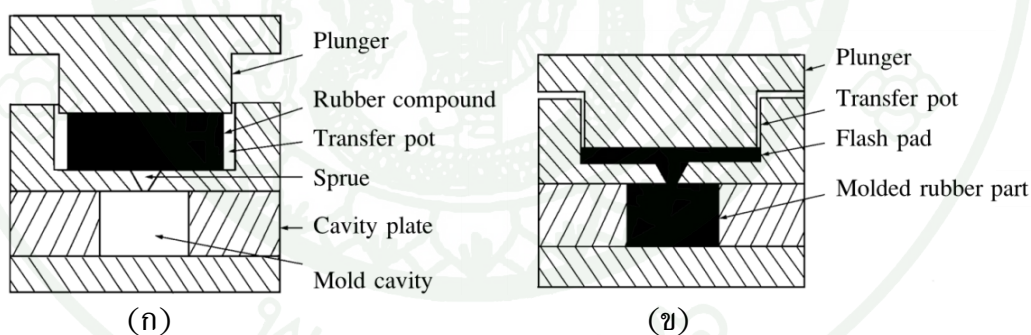
ที่มา: Johnson (2001)

ขนาดของแม่พิมพ์อัดขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของชิ้นงาน โดยขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากวางยางคอมพาวนด์ลงในเบ้าแม่พิมพ์ (cavity) จากนั้นปิดแม่พิมพ์และอัดให้ยางไหลจนแม่พิมพ์ปิดสนิท ในกรณีที่ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงอาจต้องใช้เทคนิคการอัดและคลาย (bumping) เพื่อไล่อากาศออก ยางส่วนเกินที่ไหลออกจากแม่พิมพ์ที่บริเวณรอบเบ้าพิมพ์ไปตาม

ร่อนล้น (over flow) ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) ยางที่ไหลเกินออกมาจากแม่พิมพ์เรียกว่า ครีบบาง (flash) หลังจากได้รับความร้อนและความดันจากเครื่องอัดจนยางเกิดปฏิกิริยาควบรูปสมบูรณ์ จึงเปิดแม่พิมพ์และนำปลดชิ้นงาน

1.2 กระบวนการอัดส่งชิ้นรูป (transfer molding)

กระบวนการอัดส่งชิ้นรูปเป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการอัดชิ้นรูป แต่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยทั่วไปแม่พิมพ์อัดส่งชิ้นรูปมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งได้แก่ แม่พิมพ์ส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายแท่งกดยาง (plunger) แม่พิมพ์ส่วนกลางเป็นแอ่งพักยาง (transfer pot) ซึ่งมีช่องทางการไหลของยางไปสู่เบ้าพิมพ์ และแม่พิมพ์ส่วนล่างที่มีลักษณะเป็นเบ้าพิมพ์ (cavity plate) หลักการของกระบวนการอัดส่ง คือ ยางที่ได้รับความร้อนจนเกิดการอ่อนตัวจะถูกอัดไหลจากแอ่งพักยางผ่านรูฉีด (sprue) เข้าไปยังเบ้าพิมพ์ที่เป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ กระบวนการอัดส่งมีรอบเวลาในการผลิตที่สั้นกว่ากระบวนการอัดชิ้นรูป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ 10°C จากการไหลผ่านรูฉีด ทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อยางมีความสม่ำเสมอกว่ากระบวนการอัดชิ้นรูป อย่างไรก็ตามกระบวนการอัดส่งมีต้นทุนทางด้านแม่พิมพ์สูงกว่ากระบวนการอัดชิ้นรูปและที่สำคัญ คือ มีของเสียเกิดขึ้นหลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปเนื่องจากยางที่ตกค้างภายในแอ่งพักยาง

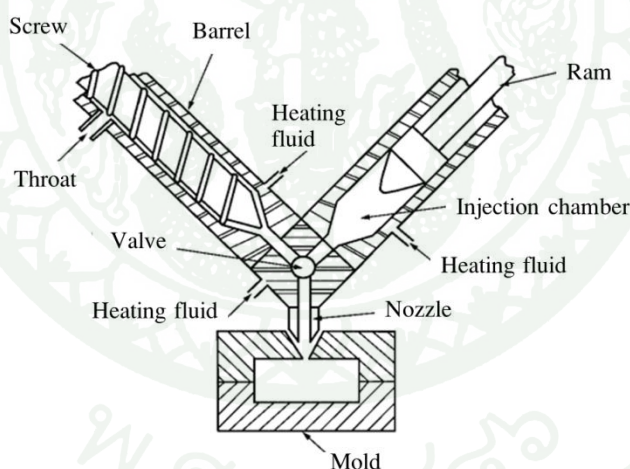


ภาพที่ 4 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดส่งชิ้นรูปอย่าง (ก) ก่อน และ (ข) หลังปิดแม่พิมพ์

ที่มา: Johnson (2001)

1.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากกว่า 2 แบบแรก ดังแสดงในภาพที่ 5 เครื่องที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีทั้งชนิดสกรู (screw) หรือชนิดลูกสูบ (piston) ลักษณะเครื่องฉีดขึ้นรูปมี 2 แบบ ได้แก่ แบบแนวตั้ง และแบบแนวนอน ซึ่งหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องฉีดพลาสติก โดยยางที่ป้อนเข้าเครื่องฉีดอาจอยู่ในรูปลักษณะยางเส้น ยาวขนาดเล็ก (rubber strip) หรือเม็ดยางขนาดเล็ก (rubber granular) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยางถูกให้ความร้อนก่อนอย่างทั่วถึง อุณหภูมิของยางขณะไหลผ่านตามช่องทางสู่แม่พิมพ์เริ่มสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (shear heating) ส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปอย่างทั่วถึงและมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน นอกจากนี้กระบวนการฉีดขึ้นรูปยังมีข้อเด่นต่าง ๆ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในด้านแรงงาน รอบการทำงานสั้น สามารถควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ ผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนได้ และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเครื่องจักรสำหรับฉีดขึ้นรูปมีราคาสูง รวมถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปมีความซับซ้อนมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตชิ้นงานยางสูงขึ้นเช่นกัน



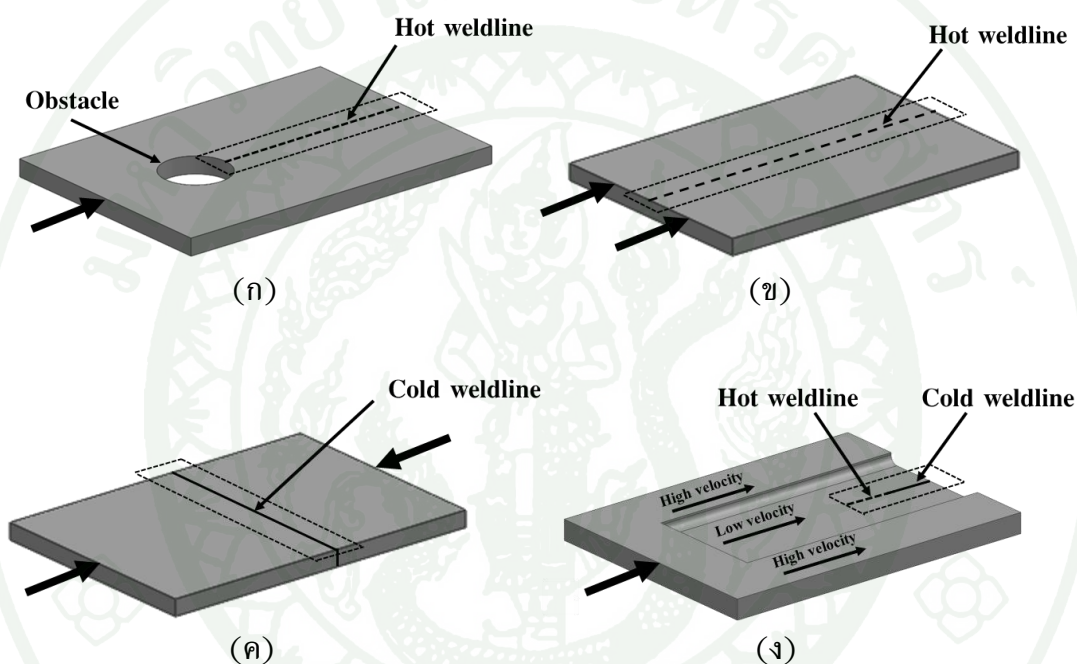
ภาพที่ 5 ลักษณะเครื่องและแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

ที่มา: Johnson (2001)

2. กลไกการเกิดรอยประสาน (mechanism of weldline formation)

รอยประสานบนชิ้นงานสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ โดยสามารถแบ่งการเกิดรอยประสานออกได้เป็น 2 ชนิด คือ รอยประสาน

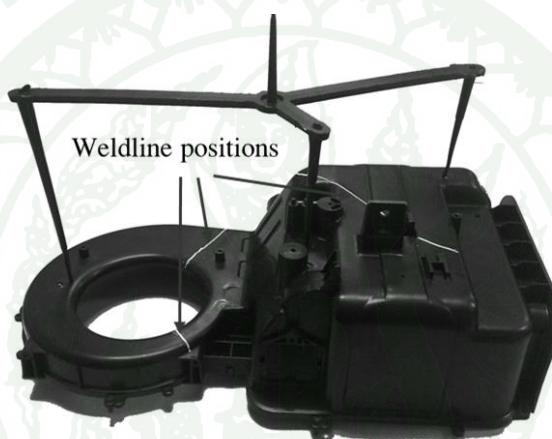
แบบร้อน (hot weldline) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกันและยังคงไหลต่อเนื่องภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) และ (ข) ในขณะที่รอยประสานแบบเย็น (cold weldline) เกิดขึ้นจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาประสานกันและไม่เกิดการไหลอีกต่อไป (Guo *et al.*, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 6(ค) นอกจากนี้รอยประสาน (ทั้งแบบร้อนและแบบเย็น) ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาที่แตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกไหลขึ้น (Fellahi *et al.*, 1995) ดังแสดงในภาพที่ 6(ง)



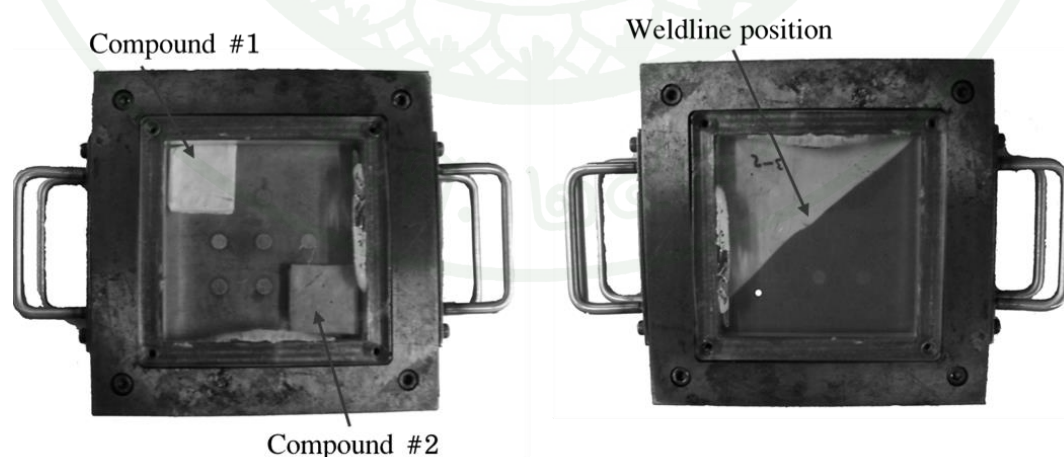
ภาพที่ 6 ชนิดของรอยประสาน (ก) รอยประสานแบบร้อนที่เกิดจากการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (ข) รอยประสานแบบร้อนที่เกิดจากการไหลจากสองตำแหน่งในทิศทางเดียวกัน (ค) รอยประสานแบบเย็น และ (ง) รอยประสานที่เกิดจากชิ้นงานที่มีความหนาผนังแตกต่างกัน

สาเหตุของการเกิดรอยประสานบนชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูปมีหลายลักษณะ ได้แก่ การที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านสิ่งกีดขวางภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการไหลแยกและไหลมาบรรจบกันอีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) รวมถึงการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ที่มีความหนาผนัง (wall thickness) ที่แตกต่างกันมาก ยังอาจก่อให้เกิดรอยประสานได้ ดังแสดงในภาพที่ 6(ง) ในกรณีที่ชิ้นงานมีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้ทางเข้าหลายตำแหน่ง (multiple gates) ดังแสดงในภาพที่ 7 หรือการวางยางคอมพาวนด์หลายชั้น (multiple charges) ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่

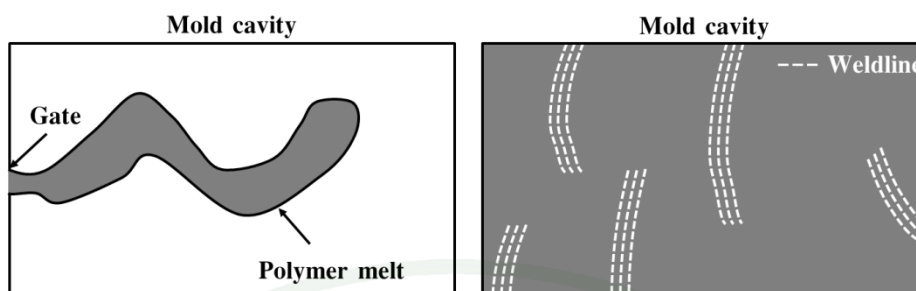
8 ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยประสานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และนอกจากนี้รอยประสานยังอาจเกิดขึ้นได้กับชิ้นงานปกติ โดยอาจมีสาเหตุมาจากความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่สูงเกินไป หรือการออกแบบทางเข้าที่เล็กเกินไป ในกรณีนี้จะเกิดการกองรวมกันของพอลิเมอร์ทำให้เกิดรอยประสานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9 การที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงอย่างมากตรงบริเวณรอยประสานสามารถอธิบายได้ดังนี้ กล่าวคือ 1) บริเวณหน้าสัมผัสของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการแพร่และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ 2) การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลขนานกับรอยประสานหรือตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง 3) การเกิดรอยบากตัววีที่บริเวณรอยประสาน (ดังแสดงในภาพที่ 2) (Hagerman, 1973; Kim and Suh, 1986; Tomari *et al.*, 1990; Tomari *et al.*, 1993; Kim *et al.* 1997)



ภาพที่ 7 รอยประสานบนชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบหลายทางเข้า

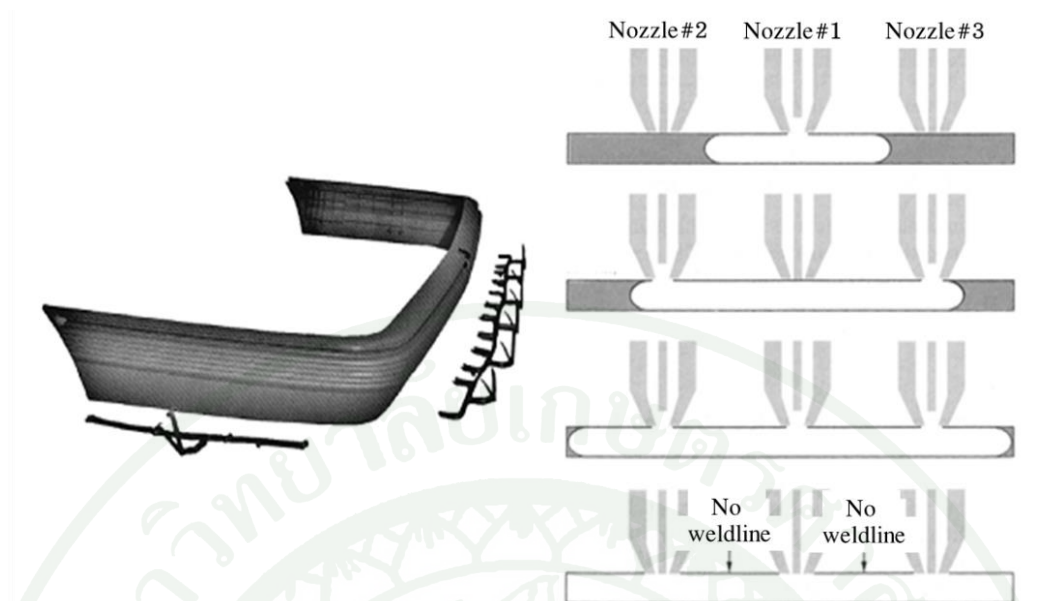


ภาพที่ 8 ลักษณะการวางชิ้นงานยางคอมพาวด์สองตำแหน่งและรอยประสานที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 9 การเกิดรอยประสานจากรอยพ่น (jetting)

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยประสานนั้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมการรับแรงทางกลของรอยประสานในวัสดุเทอร์โมพลาสติก ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยในกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mold temperature) และความดันที่ใช้ในการฉีด (injection pressure) (Kim and Suh, 1986; Liu *et al.*, 2001; Nguyen-Chung, 2004) ในขณะที่ความแข็งแรงของรอยประสานในวัสดุเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต นอกจากปัจจัยในกระบวนการผลิตที่กล่าวไว้ข้างต้น ยังขึ้นอยู่กับปริมาณและการจัดเรียงตัวของสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) โดยความแข็งแรงของรอยประสานมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อปริมาณสารตัวเติมที่ใช้เพิ่มมากขึ้น (Patcharaphun *et al.*, 2006) ในกรณีวัสดุยางหรืออีลาสโตเมอร์ พบว่า มีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อยมาก โดยผลจากงานวิจัยของ Seadan *et al.* (2002) แสดงให้เห็นว่าความหนืด และปริมาณเคมีดำมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของรอยประสานของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป สำหรับในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดรอยประสาน นอกเหนือจากการปรับแก้แม่พิมพ์และเงื่อนไขในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแล้ว ยังสามารถใช้เทคนิคพิเศษในการขึ้นรูป เพื่อหลีกเลี่ยงหรือเพิ่มความแข็งแรงของรอยประสานของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก ยกตัวอย่างเช่น การใช้เทคนิค Sequential Valve Gate (Kühnert *et al.*, 2005) การใช้เทคนิค Shear Control Orientation Injection Molding (SCORIM) (Pittman *et al.*, 1996; Reis *et al.*, 1998) และการใช้เทคนิค Push-Pull Injection (Ludwig *et al.*, 1995; Patcharaphun, 2006) รวมถึงการใช้เทคนิค Multiple live-feed injection molding ดังแสดงในภาพที่ 10 ถึง 12 ตามลำดับ



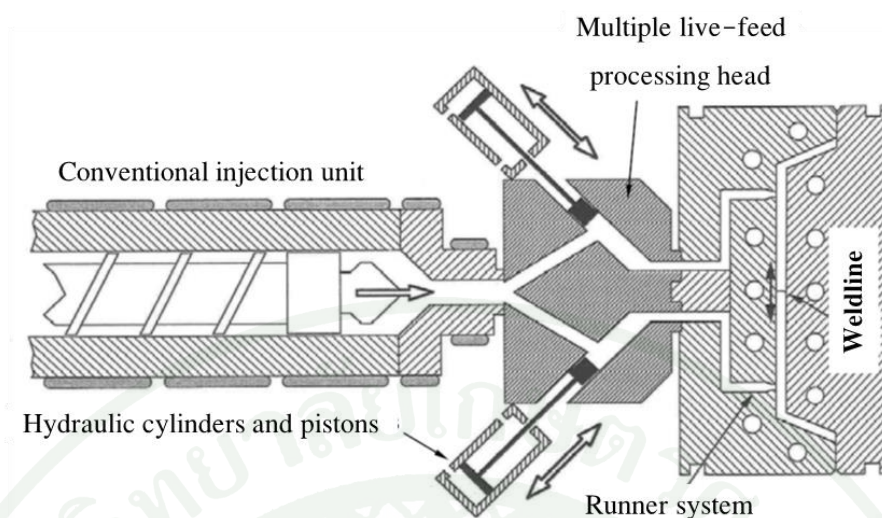
ภาพที่ 10 เทคนิค Sequential Valve Gate

ที่มา: Malloy (1994)



ภาพที่ 11 เทคนิค Push-Pull Injection

ที่มา: Patcharaphun (2006)



ภาพที่ 12 เทคนิค Multiple live-feed injection molding

ที่มา: Malloy (1994)

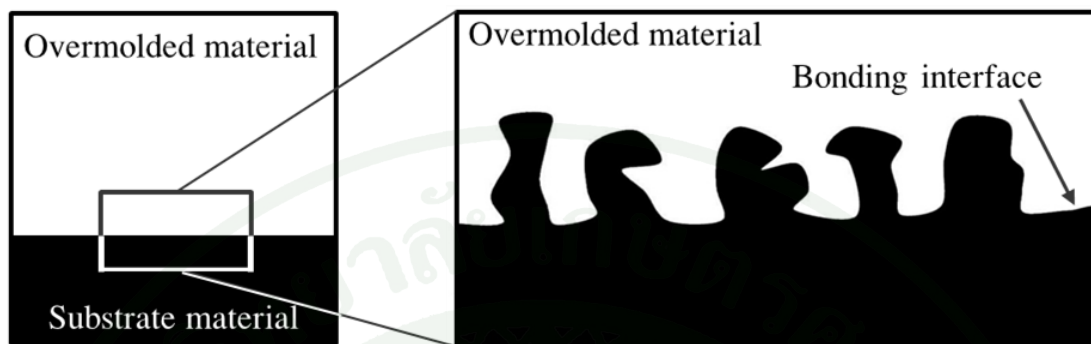
3. ทฤษฎีการยึดเกาะ (theory of bonding)

ในปัจจุบันการอธิบายกลไกในการเกาะติด (mechanisms of adhesion) และการยึดเกาะ (bonding) ยังไม่เป็นที่ชัดเจน ซึ่งพบว่า มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายกลไกดังกล่าว โดยมี 4 ทฤษฎี ที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือ ทฤษฎีการยึดเกาะโดยทางกล (mechanical interlocking theory) ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory) ทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory) และทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์ (electronic theory) ในที่นี้ขอนำเสนอเพียง 3 ทฤษฎี ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อของพอลิเมอร์เท่านั้น เนื่องจากทฤษฎีการเชื่อมต่อโดยอิเล็กทรอนิกส์ เป็น การอธิบายการเชื่อมต่อระหว่างโลหะและแก้ว (Clements, 2007)

3.1 ทฤษฎีการยึดเกาะโดยทางกล (mechanical interlocking theory)

การยึดติดหรือการยึดเกาะทางกลในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เกิดจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลมาสัมผัสเกิดการแทรกตัวเข้าหากัน โดยความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวและขนาดของพื้นที่สัมผัส (Kinloch, 1990; Packham, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 13 การใช้เทคนิคปรับปรุงพื้นผิว (surface treatment) เพื่อเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสในระดับไมครอน สามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดเกาะได้ (Clearfield *et al.*, 1991) โดยทั่วไปแล้วภาคอุตสาหกรรมการผลิตนิยมใช้หลักการยึดเกาะทางกลโดยออกแบบ

แม่พิมพ์ให้เกิดการไหลทะลุของพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งเป็นวัสดุซ้อนทับไปยังอีกด้านของวัสดุพื้น ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันแบบทางกลดังแสดงในภาพที่ 14



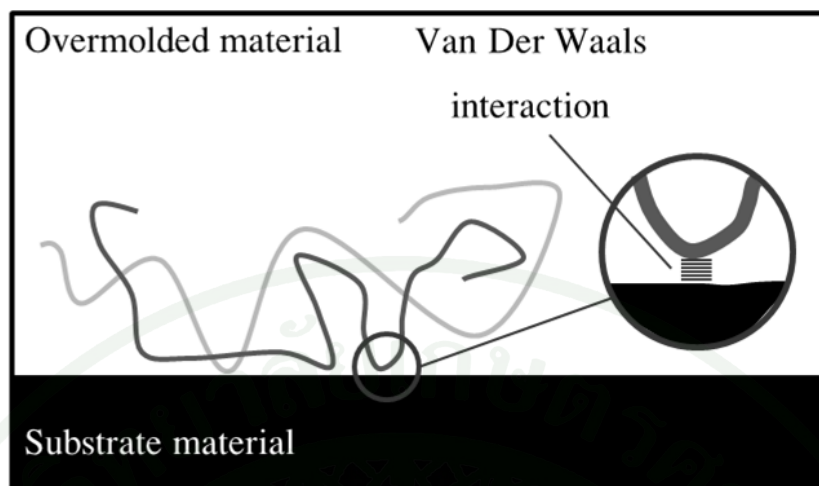
ภาพที่ 13 การแทรกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส



ภาพที่ 14 การออกแบบแม่พิมพ์ให้มีตำแหน่งยึดเกาะโดยทางกล

3.2 ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory)

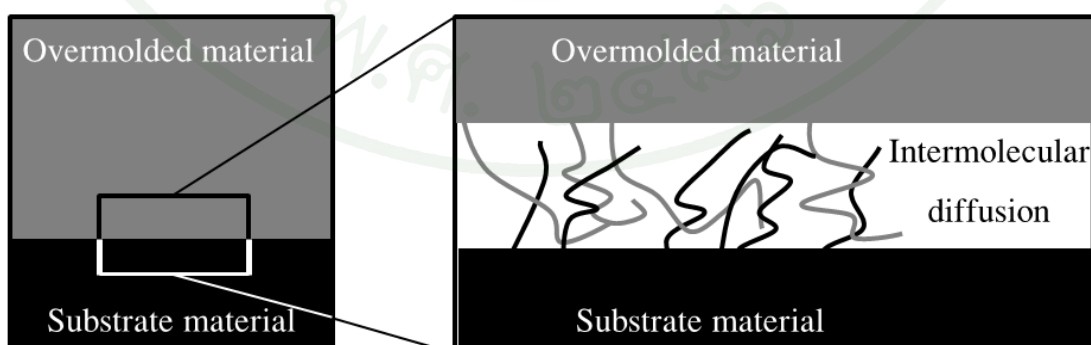
ทฤษฎีการดูดซับถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายถึงการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น ยางหรือเทอร์โมพลาสติก (Lee, 1991) ซึ่งมีพื้นผิวที่สัมผัสหรือเชื่อมติดกัน โดยการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลในบริเวณที่พอลิเมอร์สองชนิดสัมผัสกัน โดยทั่วไปแล้วแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากแรงทุติยภูมิ (secondary force) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แรงวันเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ

3.3 ทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory)

ทฤษฎีการแพร่ข้ามอธิบายการยืดยาวของวัสดุสองชนิดที่มีผิวสัมผัสกันในระยะที่สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างกัน (Pocius, 2002) ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิดกลายเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 16 และพบว่า เวลาที่เกิดการแพร่ข้ามของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 วินาที (Clements, 2007) และมีอัตราการแพร่ข้ามอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-11} ถึง 10^{-14} cm^2/s ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปการแพร่ข้ามเกิดขึ้นน้อยมาก อย่างไรก็ตามแม้ว่าความลึกจากการแพร่ข้ามมีไม่มากนักแต่พอลิเมอร์บางชนิดยังคงเชื่อมต่อย่างแข็งแรง



ภาพที่ 16 การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ (mathematical model for prediction of polymer property)

4.1 แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสาน (weldline strength model) สำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่พัฒนาโดย Kim และ Suh (Kim and Suh model)

Kim and Suh (1986) ได้พัฒนาแบบจำลองในการทำนายความแข็งแรงรอยประสานสำหรับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก โดยแสดงความสัมพันธ์ของระดับการยึดเกาะ (degree of bonding) ในรูปฟังก์ชันของเวลาสัมผัส (contact time/bonding time) และอุณหภูมิที่หน้าสัมผัส (interfacial temperature) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = \frac{A_o - A_N}{A_o} = 1 - f(T, t) \quad (1)$$

โดย σ_w คือ ความต้านทานแรงดึงของรอยประสาน σ_b คือ ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน A_o คือ บริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสเริ่มต้นของชิ้นงานหรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน A_N คือ บริเวณพื้นที่ที่ไม่เกิดการยึดเกาะ (สายโซ่โมเลกุลไม่มีการแพร่ข้ามหน้าสัมผัส) T คือ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่หน้าสัมผัส และ t คือ เวลาสัมผัสหรือเวลาประสาน

จากกฎข้อที่ 1 ของ Fick (Fick's first law) ได้ให้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อพันธะของรอยประสานดังแสดงในสมการที่ 2

$$\frac{dA_N}{dt} = C \frac{D \Delta G}{kT} \quad (2)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) K คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ t คือ เวลาสัมผัส และ ΔG คือ ผลต่างพลังงานอิสระ (free energy) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3

$$\Delta G = -2\gamma A_N - T \Delta S_m \quad (3)$$

โดยที่ γ คือ ค่าแรงตึงผิว (surface tension) และ ΔS_m คือ ค่าเอนโทรปีของการผสม (entropy of mixing)

จากทฤษฎี Lattice ของ Flory-Huggins (Flory-Huggins theory of lattice) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4

$$\Delta S_m = -kA_N \delta x \delta n_o \ln(1/2) \quad (4)$$

โดยที่ δx และ δn_o คือความหนาของการแพร่ (diffusion thickness) และจำนวนของ Lattice ต่อหน่วยปริมาตร ตามลำดับ

จากสมการที่ 2 3 และ 4 สามารถคำนวณพื้นที่ที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อพันธะของรอยประสานได้ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\frac{1}{A_N} dA_N = -\frac{CD}{kT} (2\gamma - kT \delta x \delta n_o \ln(1/2)) dt \quad (5)$$

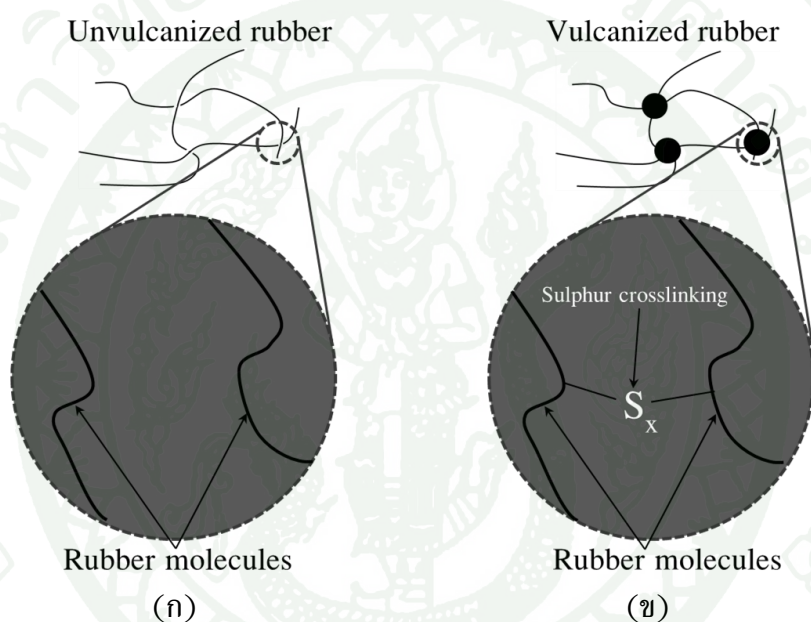
อินทิเกรตสมการที่ 5 แล้วแทนในสมการที่ 1 สามารถคำนวณค่าความแข็งแรงรอยประสานได้ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = 1 - \exp \left\{ -\frac{CD}{kT} [-2\gamma + kT \delta x \delta n_o \ln(1/2)] t \right\} \quad (6)$$

งานวิจัยของ Kim and Suh (1986) พบว่า เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความแข็งแรงรอยประสาน อย่างไรก็ตามในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงการสัมผัสกันของพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (Clements, 2007) ทำให้สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถแพร่ข้ามหน้าสัมผัสได้มากนัก ดังนั้นองค์การประสานจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิมากกว่าเป็นฟังก์ชันของเวลาสัมผัส (Allen et al., n.d.) อย่างไรก็ตามในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ยังคงมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับความแข็งแรง ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ และปัจจัยที่ได้จากกระบวนการผลิตอื่นๆ Mekhilef et al. (1995) ได้พัฒนาแบบจำลองของ Kim and Suh เพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานของพอลิเมอร์ผสม และ Chen et al. (2007) ได้นำแบบจำลองของ Kim and Suh มาพัฒนาเช่นกัน โดยได้เพิ่มปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงรอยประสาน ซึ่งได้แก่ ความหนาชิ้นงาน อุณหภูมิพอลิเมอร์หลอมเหลว ความดันในการขึ้นรูป และแรงดันย่ำ รวมทั้งอัตราการไหลของพอลิเมอร์ในขณะฉีดขึ้นรูป

4.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูป (cure kinetic model)

กระบวนการคงรูปอย่างเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight) ที่ไม่มีการเชื่อมขวางกันด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงในภาพที่ 17(ก) เปลี่ยนเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นหรือมีความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้น (high crosslinking) ซึ่งโครงสร้างของยางอยู่ในรูปของเครือข่าย 3 มิติ (3D network) ดังแสดงในภาพที่ 17(ข) (Mark *et al.*, 1994) โดยทั่วไปแล้วระดับการคงรูป (degree of curing, α) มักถูกใช้เป็นตัวชี้วัดถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 7



ภาพที่ 17 สายโซ่โมเลกุลยาง (ก) ก่อน และ (ข) หลังผ่านกระบวนการคงรูป

$$\alpha = \frac{H}{H_U} \quad (7)$$

โดยที่ H คือ ความร้อนสะสมในระหว่างกระบวนการคงรูป และ H_U คือ ความร้อนสูงสุดที่ปลดปล่อยในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ ซึ่งในกรณีของยางที่ยังไม่เกิดการคงรูป $\alpha=0$ และยางที่คงรูปสมบูรณ์ $\alpha=1$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาคงรูป (da/dt) ถูกกำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ (t) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{H_U} \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (8)$$

จำนวนแบบจำลองเชิงพลวัตกรรมสำหรับจลนพลศาสตร์ได้รับการพัฒนาเพื่ออธิบายคุณลักษณะของกระบวนการคงรูปสำหรับยางแต่ละประเภทที่มีความแตกต่างกัน โดยแบบจำลองอย่างง่ายที่นำเสนอ คือ n^{th} Order Rate ดังแสดงในสมการที่ 9 และ 10

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(1-\alpha)^n \quad (9)$$

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

โดยที่ n คือ อันดับของการเกิดปฏิกิริยา (reaction order) K คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (reaction constant) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ (ฟังก์ชันของอาร์เรเนียส) K_0 คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาในสถานะเริ่มต้น E_a คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy) R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

Kamal and Sourour (1973) ได้นำเสนอแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่อธิบายถึงลักษณะของกระบวนการคงรูปโดยได้เพิ่มค่าคงที่ของปฏิกิริยา (K) ในแบบจำลองเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย ดังแสดงในสมการที่ 11 และ 12

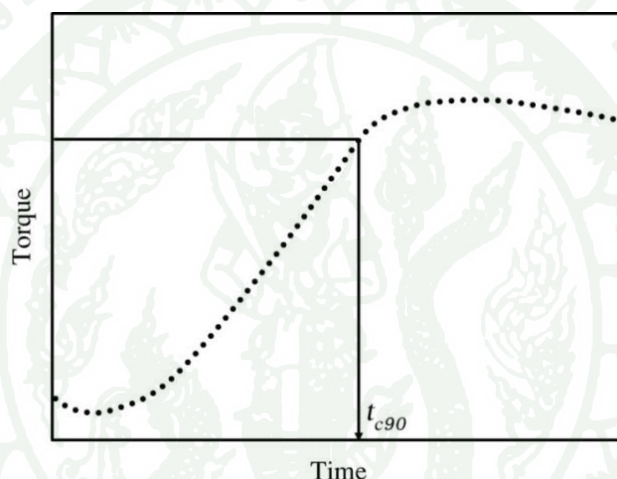
$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (11)$$

$$K_i = K_{i0} \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{RT}\right) \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

ต่อมา Isayev and Deng (1988) ได้พัฒนาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูปให้ง่ายขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 13 ซึ่งยังคงสามารถอธิบายพฤติกรรมในกระบวนการคงรูปได้ดี โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำหรับการวิเคราะห์การไหลของวัสดุภายในแม่พิมพ์ (Simcon-kunststofftechnische Software GmbH, 2002)

$$\alpha = \frac{Kt^n}{1 + Kt^n} \quad (13)$$

โดยทั่วไปแล้วในกระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์นิยมใช้ระดับการคงรูปที่ 90% (Datta, 2001) ซึ่งยางสามารถคงรูปต่อเนื่องได้หลังจากนำปลดออกจากแม่พิมพ์ การวิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางนิยมใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ (rheometer) ได้แก่ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) หรือเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) ซึ่งเป็นการทดสอบทางจลนพลศาสตร์ที่อธิบายถึงแรงบิด (torque, T) ที่เปลี่ยนไปตามเวลา (time, t) ในระหว่างกระบวนการคงรูป (Sezna and DiMauro, 1984; Deng and Isayev, 1991) ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยแรงบิดที่เพิ่มขึ้นหมายถึงระดับการคงรูป (crosslink density) ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานยาง ได้แก่ ค่ามอดูลัสแรงดึง (tensile modulus) และค่าความแข็ง (hardness) เป็นต้น (Gent, 2001)

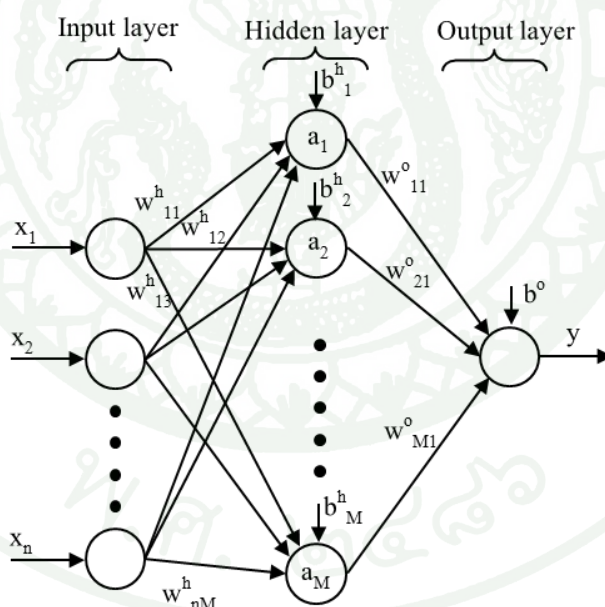


ภาพที่ 18 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง ODR หรือ MDR

จากความสัมพันธ์ของระดับการคงรูปและสมบัติทางกล Nichetti (2004) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสมบัติทางกลของยางโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการคงรูป ซึ่งพบว่า สามารถทำนายค่าความแข็ง ค่ามอดูลัสแรงดึง และการสึกหรอ (abrasion) ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง จากการสำรวจเอกสาร พบว่า มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานของวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Kim and Suh, 1986; Mekhilef *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2004) ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎีการแพร่ โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว และเวลาการสัมผัส ในขณะที่บริเวณรอยประสานของชิ้นงานยางนั้น นอกจากเกิดการแพร่ข้ามหน้าสัมผัสของสายโซ่โมเลกุล เช่นเดียวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกแล้ว ยังมีการเชื่อมขวางเป็นโครงข่ายระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาที่ยางสัมผัสกันภายในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

4.3 แบบจำลองของเครือข่ายประสาทเทียม (neural network model)

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่มาจากส่วนผสมของยางคอมพาวนด์ รวมทั้งปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างซับซ้อน สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุยาง จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่สามารถจำลองหรือเรียนรู้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้ จากการสำรวจเอกสารพบว่า แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมนั้นมีความสามารถในการจำลองหรือเลียนแบบพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นสูง (high nonlinearity) ได้เป็นอย่างดี (Martin *et al.*, 1995) โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมีหลักแนวคิด คือ สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้า (input) และตัวแปรส่งออก (output) ที่ลอกเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสถาปัตยกรรม (architecture) ภายในแบบจำลองประกอบด้วย ชั้นตัวแปรนำเข้า (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) ชั้นตัวแปรส่งออก (output layer) ดังแสดงในภาพที่ 19 ในแต่ละชั้นซ่อนประกอบด้วยจำนวนนิวรอน ซึ่งเป็นหน่วยที่รวมผลคูณของตัวแปรนำเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) รวมกับค่าไบแอส (bias) ดังสมการที่ 14



ภาพที่ 19 สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน

$$a = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \cdot \begin{Bmatrix} w_{1M}^h \\ w_{2M}^h \\ \vdots \\ w_{nM}^h \end{Bmatrix} + b_M^h \quad (14)$$

โดยที่ a คือ ตัวแปรส่งออกจากชั้นซ่อน x_i คือ ตัวแปรนำเข้า w_{iM}^h คือ ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน และ b_M^h คือ ไบแอสในชั้นซ่อน

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 14 เข้าสู่ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) ดังแสดงในสมการที่ 15 และ 16 ซึ่งฟังก์ชันส่งผ่านแบบลอจิสติกมอยด์ (log-sigmoid) แบบเชิงเส้น (linear) ตามลำดับ โดยพบว่า เมื่อนำฟังก์ชันส่งผ่านแบบลอจิสติกมอยด์ ไปใช้สำหรับชั้นซ่อน และเฟอร์ฟังก์ชันส่งผ่านแบบเชิงเส้น ไปใช้สำหรับชั้นส่งออกจะทำให้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่ดี (Demuth and Beale, 2001)

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (15)$$

$$f(x) = x \quad (16)$$

จากสมการที่ 14 15 และ 16 สามารถคำนวณตัวแปรส่งออกได้ดังสมการที่ 17

$$y = \sum_{j=1}^M w_{j1}^o f(a) + b^o \quad (17)$$

โดยที่ w_{j1}^o คือ ค่าถ่วงน้ำหนักชั้นตัวแปรส่งออก b^o คือ ค่าไบแอสของชั้นตัวแปรส่งออก

จากสมการที่ 17 ในกรณีที่ตัวแปรด้านขวาเป็นพลังงานความเครียด (strain energy) เมื่อนำมาหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเทียบกับการยืดตัว (extension) ผลลัพธ์ที่ได้คือ ความเค้นภายในที่เกิดขึ้นในวัสดุได้ ดังสมการที่ 18 (Shen et al., 2004)

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^M w_{j1}^o w_{ij}^h f(a) \quad i=1,2,\dots,n \quad (18)$$

จากข้อดีของแบบจำลองเครื่องช่วยประสาทเทียม Kenig (2001) ได้นำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) โดยมีปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว ความดันย้ำ (holding pressure) ความเร็วในการฉีด (injection speed) และเวลาในการหล่อเย็น (cooling time) โดยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายค่ามอดูลัสได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ Sadeghi (2000) ได้ใช้แบบจำลองเครื่องช่วยประสาทเทียม ในการทำนายคุณภาพชิ้นส่วนเครื่องคิดเลข CASIO รุ่น fx-570s โดยใช้ตัวแปรในกระบวนการผลิตคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว ความดันในการฉีด รวมทั้งค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Rate, MFR) พบว่าสามารถทำนายผลจากวัสดุเดียวกันแต่เกรดต่างกันได้

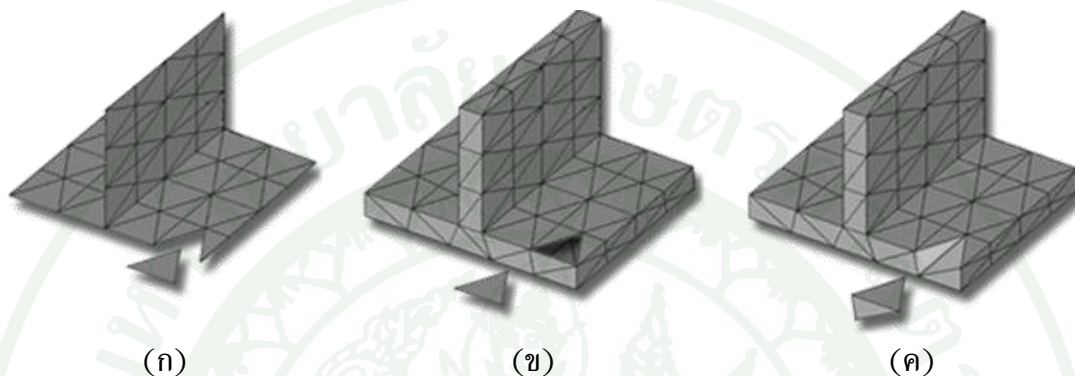
5. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตมีการแข่งขันสูงทั้งในด้านของคุณภาพ ราคา และความเร็วของการตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เริ่มตั้งแต่การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของผลิตภัณฑ์ (Computer Aided Design, CAD) ซึ่งสามารถช่วยให้เห็นการประกอบ (assembly) และรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ซึ่งมีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมได้หลากหลาย ได้แก่ การทำนายความเสียหายเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริง การทำนายอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ และการจำลองกระบวนการขึ้นรูป เช่น การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ การจำลองการเป่าขึ้นรูป และการจำลองกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น

5.1 การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยเฉพาะอย่างยิ่งระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์ (analytical method) ได้โดยตรง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ ตัวอย่างเช่น Moldflow, Cadmould Moldex และ 3DSigma เป็นต้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การไหลมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย (mesh) ซึ่งเกิดจากการแบ่งแบบจำลองของชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หรือ เอลิเมนต์ (element) โดยแต่ละเอลิเมนต์เชื่อมต่อกันที่โหนด (node) ทั้งนี้โครงสร้างตาข่ายที่ใช้ในการจำลองการไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ ได้แก่ โครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ (midplane) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความ

หน้าชั้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 20(ก) โครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ (dual domain) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ที่ผิวของชั้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 20(ข) และโครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ (solid) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ตลอดความหนาของชั้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 20(ค) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม CADMOULD VERSION 2.0 และวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ซึ่งมีฐานข้อมูลของวัสดุอย่างรวมทั้งสามารถเพิ่มสมบัติของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ได้



ภาพที่ 20 โครงสร้างตาข่าย (ก) แบบ 2 มิติ (ข) แบบ 2.5 มิติ และ (ค) แบบ 3 มิติ

ที่มา: Shoemaker (2008)

5.2 สมมติฐานในการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์

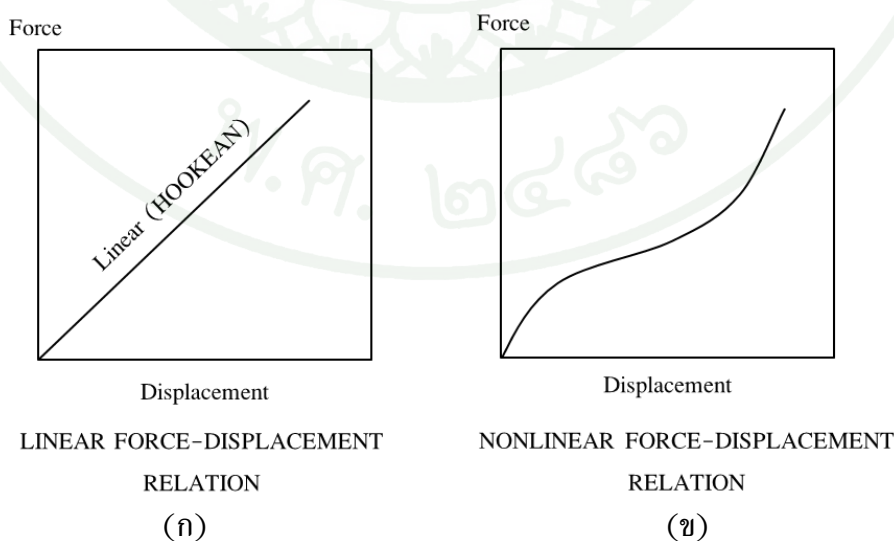
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (pre-processing) ซึ่งเป็นขั้นการเตรียมแบบ การกำหนดรูปทรง การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ เงื่อนไขของแบบจำลอง และการเลือกแบบจำลองวัสดุ ขั้นตอนที่ 2 คือ การประมวลผล (processing) เป็นขั้นตอนของการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนแรก จากนั้นแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนหลังการประมวลผล (post-processing) เป็นการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของรูปภาพหรือข้อมูลที่เป็นตัวเลข ซึ่งในการคำนวณเพื่อหาคำตอบของระบบสมการที่มีความซับซ้อนนั้น จำเป็นต้องตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ของโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 และ 2.5 มิติ ได้แก่ การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) และมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) กล่าวคือ เป็นของไหลที่มีค่าความหนืด (viscosity) คงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลา (time independent) และอัตราเครียดเฉือน (shear rate, γ) นอกจากนี้สมมติฐานทางความร้อนกำหนดให้มีการนำความร้อน (heat conduction) เฉพาะทิศทางตามความหนา (thickness direction) ในขณะที่สมมติฐานในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ได้แก่ พิจารณา

การถ่ายเทความร้อนในทุกทิศทาง รวมถึงมีการคำนวณความดัน ความเร็วและอุณหภูมิที่แต่ละโหนด โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่า ได้มีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมมาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การหดตัวของชิ้นงาน (shrinkage) การบิดเบี้ยว (warpage) และเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ฉีด (Akay *et al.*, 1996; Yeung and Lau, 1997; Ching *et al.*, 2009) รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมยังเข้าไปมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิดรอยประสานบนชิ้นงาน และการเกิดอากาศค้าง (air trap) ภายในแม่พิมพ์ เป็นต้น (Kima *et al.*, 2003; Beaumont, 2004; Shoemaker, 2008; Yung *et al.*, 2008)

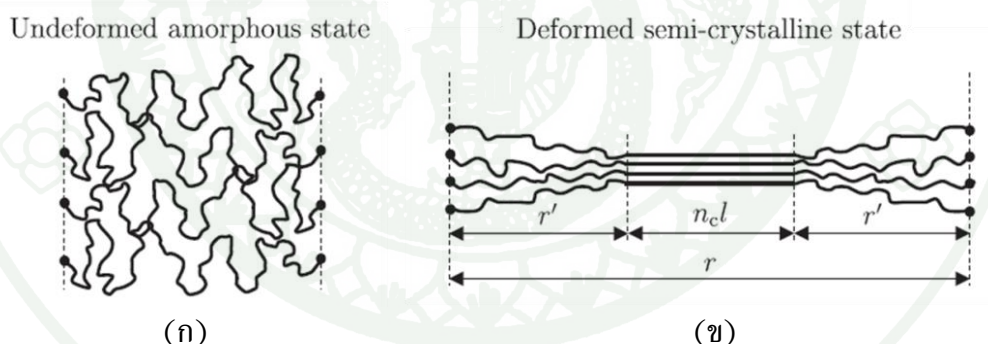
6. แบบจำลองคอนสติติวทีฟของยาง (constitutive model of rubber material)

วัสดุที่มีพฤติกรรมตามกฎของฮุค (Hooke's law) คือ วัสดุมีการยืดตัวออกเมื่อมีแรงมากระทำ (กรณีรับแรงดึง) และคืนตัวกลับในเส้นทางเดิมเมื่อหยุดให้แรงกระทำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรง (force or stress) และการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation or strain) เป็นแบบเชิงเส้น (ทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่วัสดุไม่เกิดการเสียรูปร่างแบบถาวร) ตัวอย่างวัสดุที่มีพฤติกรรมเช่นนี้ ได้แก่ โลหะ แก้ว เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 21(ก)



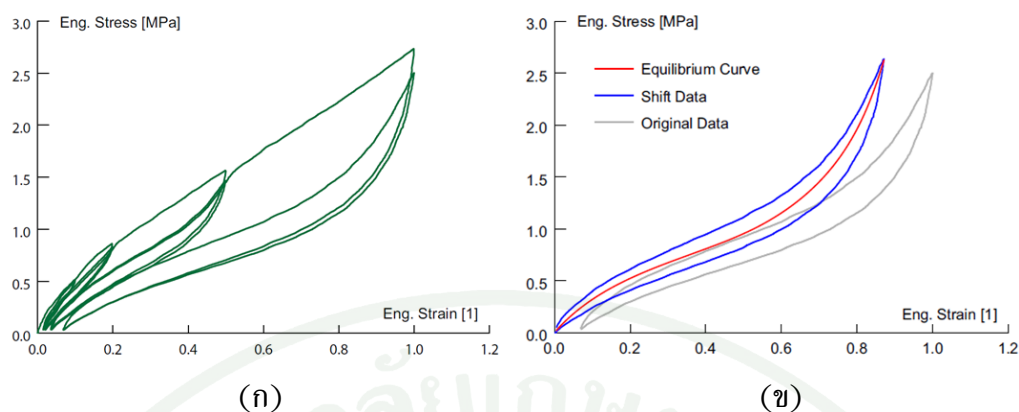
ภาพที่ 21 พฤติกรรมยืดหยุ่นของวัสดุ (ก) วัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น และ (ข) วัสดุคล้ายยาง

ยางคงรูป (cured rubber) มีความสามารถในการยืดตัวที่สูง (high deformation) และมีพฤติกรรมของการตอบสนองต่อแรงเมื่อมีการยืดตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic deformation) ดังแสดงในภาพที่ 21(ข) ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้แบบจำลองยืดหยุ่น (elastic model) สาเหตุที่ทำให้วัสดุยางมีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามกฎของฮุค สามารถสรุปได้ 4 ประการหลักๆ คือ ประการแรกยางบางประเภทสามารถเกิดผลึกได้เมื่อมีการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการยืดตัวสูง ดังแสดงในภาพที่ 22 (Kroon, 2010) ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างวัสดุยางมีการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ความสามารถในการรับแรงในแต่ละครั้งจึงมีความแตกต่างกัน โดยวัสดุยางมีความแข็งเกร็งสูง (high stiffness) เมื่อได้รับแรงในครั้งแรก และอ่อนตัว (soft) ลงเมื่อมีแรงกระทำในครั้งที่สอง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Mullin's Effect (Diani et al., 2009) ดังแสดงในภาพที่ 23(ก) และประการต่อมา เมื่อมีแรงมากกระทำวัสดุยางจะแสดงสมบัติความยืดหยุ่น (elastic property) และสมบัติพลาสติก (plastic property) กล่าวคือ วัสดุพยายามรักษารูปร่างเดิมก่อนมีแรงกระทำ (สมบัติความยืดหยุ่น) และในเวลาเดียวกันวัสดุพยายามรักษารูปร่างที่เกิดขึ้นภายหลังจากการรับแรง (สมบัติพลาสติก) โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นทางของกราฟความเค้น-ความเครียดที่แตกต่างกันในขณะที่มีแรงกระทำและเมื่อหยุดให้แรงกระทำ ดังแสดงในภาพที่ 23(ข) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Viscoelastic effect



ภาพที่ 22 แบบจำลองสายโซ่โพลิเมอร์ยาง (ก) ขึ้นงานที่ก่อนการรับแรง (ข) ขึ้นงานยางภายหลังจากการรับแรง

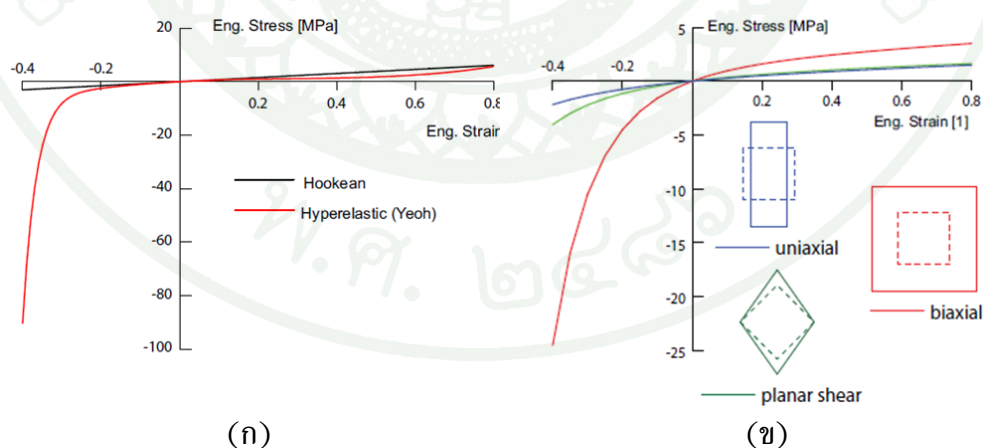
ที่มา: Kroon (2010)



ภาพที่ 23 พฤติกรรมของวัสดุยางเมื่อได้รับแรงดึง (ก) ทดสอบแรงดึง (Mullin's effect) และ (ข) ทดสอบแรงดึง (viscoelastic effect)

ที่มา: MSC.Software (2010)

ประการสุดท้ายพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุที่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ โดยหากมีสภาวะที่ต่างกันวัสดุจะตอบสนองต่อแรงที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ผลการทดสอบแบบดึงและแบบอัดกับวัสดุประเภทยาง ดังแสดงในภาพที่ 24(ก) และผลจากการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial) แบบดึงสองแกน (biaxial) และการดึงในแนวระนาบ (planar) ดังแสดงในภาพที่ 24(ข) (MSC.Software, 2010)



ภาพที่ 24 พฤติกรรมของวัสดุยางเมื่อได้รับแรงดึงและแรงอัด (ก) ทดสอบแรงดึง-แรงอัด และ (ข) ทดสอบดึงแกนเดียว ดึงสองแกน และดึงในแนวระนาบ

ที่มา: MSC.Software (2010)

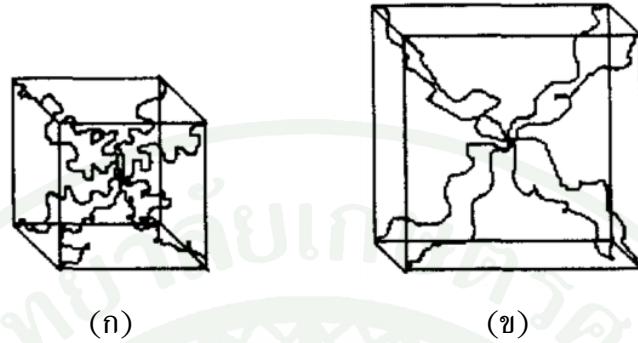
โครงสร้างในระดับจุลภาค (micro-structure) หรือระดับสายโมเลกุลของวัสดุยางนั้นมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลแบบกระจาย และเกิดการเชื่อมขวางทางเคมี (chemical crosslinking) ของสายโซ่โมเลกุลอย่างกับสารคงรูป (มีความแข็งแรงสูง) รวมทั้งการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลทางกายภาพ (physical crosslinking) (มีความแข็งแรงต่ำ) ส่งผลให้โครงสร้างระดับมหภาค (macro-structure) ของวัสดุยาง มีความสามารถในการยืดตัวสูง (large strain) และมีพฤติกรรมเสียรูปร่างยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic deformation) เป็นสาเหตุให้กราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) แตกต่างจากวัสดุที่เป็นไปตามกฎของฮุค มีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามสร้างแบบจำลองคอนสติดิวทิฟเพื่ออธิบายพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกอธิบายในรูปแบบความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียด (strain energy) และการยืดตัวของวัสดุ โดยเรียกแบบจำลองที่ใช้อธิบายถึงพฤติกรรมวัสดุที่มีการยืดตัวสูงว่า แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic model) โดยสามารถแบ่งแบบจำลองได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ แบบจำลองที่พัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติ (statistical thermodynamic-based approach) ซึ่งตั้งสมมติฐานให้ยางเป็นวัสดุยืดหยุ่น และแบบจำลองที่พัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต (phenomenological-based approach) ซึ่งกำหนดให้วัสดุยางเป็นสารต่อเนื่อง (Charlton et al., 1993; Boyce and Arruda, 2000)

6.1 แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกพัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติ (statistical thermodynamic-based model)

แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติ ได้พิจารณาการยืดตัวของวัสดุในระดับโมเลกุลจากความยาว การจัดเรียงตัว รวมถึงโครงสร้างของการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น (Bergstrom and Boyce, 2000) โดยตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในแบบจำลองทั้งหมดมีความหมายทางกายภาพ (physical meaning) ส่งผลให้แบบจำลองนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุยางได้ แม้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไม่ครอบคลุมปัญหาที่วิเคราะห์ก็ตาม ตัวอย่างของแบบจำลองนี้ ได้แก่ แบบจำลอง Arruda-Boyce และแบบจำลอง Van Der Waals เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีการยืดตัวไม่สูงมากนัก (ไม่เกิน 50%) (Shen et al., 2004) ซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการยืดตัวของยาง

พื้นฐานของการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติ วัสดุถูกกำหนดให้อยู่ในลักษณะเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายโซ่ ตัวอย่างเช่น แบบจำลอง Arruda-Boyce ซึ่งมาจากแบบจำลองโครงข่าย (network model) ที่มี 8 สายโซ่ (8 chains) โดยกำหนดให้สายโซ่แต่ละเส้นอยู่ในแนวทะแยงมุมของเอลิเมนต์ทรงลูกบาศก์และมีจุดเชื่อมต่อที่ตำแหน่งกลางเอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งแบบจำลอง Arruda-Boyce สำหรับค่าคงที่ต่างๆ ใน

แบบจำลองสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการขยายอนุกรม Inverse Langevin Function ดังแสดงในสมการที่ 19 และ 20 ตามลำดับ (Boyce and Arruda, 2000)



ภาพที่ 25 แบบจำลองแบบ 8 chain (ก) ก่อนดึงยืด และ (ข) ภายหลังดึงยืด

ที่มา: Boyce and Arruda (2000)

$$W_{8ch} = Nk\theta\sqrt{n} \left[\beta_{chain} \lambda_{chain} + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_{chain}}{\sinh \beta_{chain}} \right) \right] \quad (19)$$

$$\beta_{chain} = L^{-1} \left(\frac{\lambda_{chain}}{\sqrt{n}} \right) \quad (20)$$

โดยที่ W_{8ch} คือ พลังงานความเครียด N คือ จำนวนสายโซ่ k คือ Boltzmann's constant θ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ และ n คือ จำนวนจุดต่อในสายโซ่ สำหรับ λ_{chain} สามารถหาได้จากอัตราส่วนการยืดตัวในแนวแกนต่างๆ ดังสมการที่ 21

$$\lambda_{chain} = \left(\frac{1}{3} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \right)^{1/2} \quad (21)$$

แบบจำลองหนึ่งที่พัฒนาด้วยวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์สถิติซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี คือแบบจำลอง Van Der Waals ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 22

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{i - 3}{2} \right)^{3/2} \right\} \quad (22)$$

โดยที่ $i = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2$ และ $\eta = \sqrt{\frac{i - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$ a คือ Global interaction Parameter และ β คือ Invariant Mixture Parameter

6.2 แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต (phenomenological-based model)

จากข้อจำกัดของแบบจำลองที่พัฒนามาบนพื้นฐานของวิธีการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สถิติ ทำให้งานวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาฟังก์ชันพลังงานความเครียด (strain energy function) โดยวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต หลักการของแบบจำลองที่พัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต คือ การสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของกราฟที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่าคงที่หรือค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองไม่มีความหมายทางกายภาพ (non-physical meaning) เป็นเพียงการปรับข้อมูลเพื่อให้คล้ายกับผลการทดสอบจริงเท่านั้น ตัวอย่างของแบบจำลองประเภทนี้ ได้แก่ แบบจำลองพหุนาม (polynomial model) แบบจำลอง Neo-Hookean แบบจำลอง Mooney-Rivlin แบบจำลอง Ogden และแบบจำลอง Yeoh แบบจำลองดังกล่าวสามารถหาฟังก์ชันพลังงานความเครียดได้จากแรง (ความเค้น) ที่เกิดขึ้นเมื่อยางเกิดการยืดตัว (ความเครียด) วิธีการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ พลังงานความเครียดที่เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการยืดตัวในแนวแกนหลัก (principal stretch ratio) และพลังงานความเครียดที่เป็นฟังก์ชันของอินวาเรียนท์ของความเครียด (strain invariants)

6.2.1 ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการยืดตัว (stretch ratio based strain energy function)

อัตราส่วนการยืดตัว (stretch ratio, λ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวเมื่อได้รับแรง (L) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) ของวัสดุ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (23)$$

โดยที่ ε_i คือ ความเครียดวิศวกรรม (engineering strain) ในแต่ละแกน

พลังงานความเครียด (W) ที่เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการยืดตัว ถูกกำหนดให้อยู่ในผลรวมของฟังก์ชันการยืดตัว ดังแสดงในสมการที่ 24

$$W = \sum_{i=1}^3 u(\lambda_i) \quad (24)$$

แบบจำลองกลุ่มนี้ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและมีการนำไปใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม คือ แบบจำลอง Ogden (Ogden, 1997) ดังแสดงในสมการที่ 25

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (25)$$

โดยที่ μ_i และ α_i คือ ค่าคงที่ ซึ่งได้จากข้อมูลการทดลอง J^{el} คือ Elastic Volume Strain

6.2.2 ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอินวาเรียนต์ของความเครียด (strain invariants based strain energy function)

อินวาเรียนต์ของความเครียด 3 ค่า ที่ใช้ในการหาพลังงานความเครียด ได้แก่ อินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 1 (first strain invariant, I_1) อินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 2 (second strain invariant, I_2) และอินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 3 (third strain invariant, I_3) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการยืดตัว ดังสมการที่ 26

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (26)$$

โดยที่ λ_1 λ_2 และ λ_3 คือ อัตราส่วนการยืดตัว สำหรับวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible materials) $I_3 = 1$

รูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันพลังงานความเครียดสำหรับวัสดุที่อัดตัวไม่ได้และสมบัติของวัสดุไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic property) ดังแสดงในสมการที่ 27 โดยอยู่ในรูปของผลรวมของอนุกรมอันดับ (power series) ของ I_1-3 และ I_2-3

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (27)$$

โดยที่ C_{ij} คือ ค่าคงที่ และมีเงื่อนไขว่า $C_{00} = 0$ ในกรณีที่วัสดุไม่มีการยืดตัว

แบบจำลอง Neo-Hookean ดังแสดงในสมการที่ 28 ซึ่งสามารถหาโดยการแทนค่า $i=1$ และ $j=0$ ในสมการที่ 27 แบบจำลองนี้นิยมนำมาใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (28)$$

สมการที่ 29 คือ แบบจำลอง Mooney-Rivlin ซึ่งได้จากการเพิ่มเทอมของ I_2 เข้าไปในสมการที่ 28

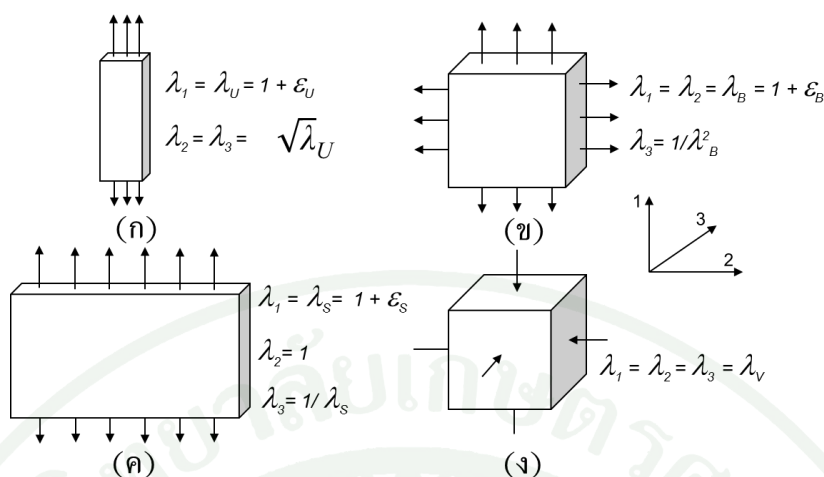
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (29)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 28 และ 29 พบว่า แบบจำลอง Mooney-Rivlin มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง Neo-Hookean เนื่องจากเทอมของ I_2 ที่เพิ่มขึ้น สำหรับพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนสูงในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ใช้ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่อยู่ในรูปของอนุกรมพหุนาม (polynomial series) ดังแสดงในสมการที่ 30

$$W = \sum_{i+j=1}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (30)$$

6.3 การทดสอบสมบัติทางกลสำหรับวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (mechanical testing for hyperelastic material)

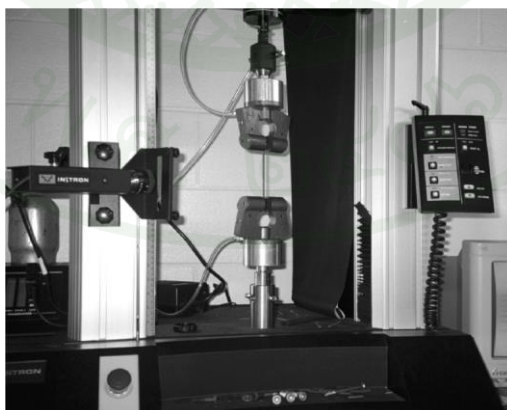
การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้สำหรับเป็นข้อมูลเพื่อหาค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพลังงานความเครียด ได้แก่ การทดสอบแบบดึงแกนเดียว (uniaxial test) การทดสอบแบบดึงสองแกน (biaxial test) การทดสอบแบบดึงในแนวระนาบ (planar test) การทดสอบเชิงปริมาตร (volumetric test) ดังแสดงในภาพที่ 26(ก) ถึง 26(ง) การทดสอบแบบดึงแกนเดียวเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานอย่างมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผลการทดสอบแบบดึงแกนเดียวในการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก



ภาพที่ 26 การทดสอบยาง (ก) แบบดึงแกนเดียว (ข) แบบดึงสองแกน (ค) แบบดึงในแนวระนาบ และ (ง) ทดสอบเชิงปริมาตร

6.3.1 การทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial test)

การทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว ดังแสดงในภาพที่ 27 เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับวัสดุยาง มีมาตรฐานการทดสอบหลายแบบที่กำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดสอบแบบดึง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าคงที่ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งได้แก่ ชิ้นงานต้องมีความยาวในทิศทางของแรงดึงมากกว่า 10 เท่าของความกว้างหรือความหนาชิ้นงาน และชิ้นงานไม่จำเป็นต้องเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน (Miller, 2004)



ภาพที่ 27 การทดสอบแบบดึงแกนเดียว

ที่มา: Miller (2004)

จากผลการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว สามารถหาพลังงานความเครียดได้จากสมการที่ 31

$$W = \int_0^{\varepsilon_U} \sigma_U d\varepsilon_U \quad (31)$$

โดยที่ σ_U คือ ความเค้นปกติ (nominal stress) และ ε_U ความเครียดปกติ (nominal strain) และ W คือ พลังงานความเครียดในชิ้นงานยาง ซึ่งหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve)

เมื่อได้ฟังก์ชันพลังงานความเครียด สามารถหาความเค้นแบบดึงในแนวแกนเดียว ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 32

$$\sigma_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (32)$$

โดยความเค้นแบบดึงในแนวแกนเดียว (ในแนวแกนที่ 1) ดังแสดงในสมการที่ 33 และเมื่อใช้กฎลูกโซ่ (chain rule) สามารถหาความเค้นได้จากสมการที่ 34

$$\sigma_1 = \sigma_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} \quad (33)$$

$$\sigma_U = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_1} \quad (34)$$

เมื่อนำสมการที่ 34 และความสัมพันธ์ของอัตราการยืดตัวแบบดึงในแนวแกนเดียว ดังแสดงในภาพที่ 26(ก) แทนค่าในสมการที่ 33 จะได้สมการที่ 35 ซึ่งถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้

$$\sigma_U = 2 \left(\lambda_U - \frac{1}{\lambda_U^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_U} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (35)$$

6.3.2 การทดสอบแบบดึงสองแกน (biaxial test)

การทดสอบแบบดึงสองแกน สำหรับวัสดุที่ถูกกำหนดให้ไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible material) โดยชิ้นงานถูกดึงออกจากสองทิศทางในระนาบเดียวกัน (biaxial extension) ดังแสดงในภาพที่ 28(ก) ซึ่งมีผลเทียบเท่ากับการกดอัด (pure compression) (Treloar, 1958) ดังแสดงในภาพที่ 28(ข) แต่ใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากกว่า อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการทดสอบแบบดึงสองแกน สามารถนำไปสร้างแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากการทดสอบแบบกดอัดได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส (Miller, 2004)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 28 การทดสอบแบบดึงสองแกน (ก) แบบยืดตัวสองแกน (ข) แบบกดอัด

ที่มา: Miller (2004)

จากการทดสอบดึงสองแกนสามารถหาพลังงานความเครียดได้จากสมการที่ 36

$$W = 2 \int_0^{\varepsilon_B} \sigma_B d\varepsilon_B \quad (36)$$

โดยที่ σ_B คือ ความเค้นปกติ ε_B ความเครียดปกติ สำหรับการดึงสองแกน

เมื่อนำสมการที่ 34 (ที่ผ่านการใช้อนุกรมเทย์เลอร์แล้ว) และความสัมพันธ์ของอัตราการยืดตัวแบบดึงสองแกน ดังแสดงในภาพที่ 26(ข) จะได้สมการที่ 37

$$\sigma_B = 2 \left(\lambda_B - \frac{1}{\lambda_B^5} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_B \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (37)$$

6.3.3 การทดสอบแบบดึงในแนวระนาบ (planar test)

ชิ้นงานยางที่ใช้ทดสอบการดึงในแนวระนาบมีลักษณะเป็นแผ่นที่ต้องมีความกว้างมากกว่า 10 เท่าของความยาวในทิศทางที่รับแรง (Miller, 2004) โดยชิ้นงานทดสอบถูกดึงออกในทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ

ที่มา: Miller (2004)

ผลจากการทดสอบการดึงในแนวระนาบสามารถหาพลังงานความเครียดได้จากสมการที่ 38

$$W = 2 \int_0^{\epsilon_p} \sigma_p d\epsilon_p \quad (38)$$

โดยที่ σ_p คือ ความเค้นปกติ และ ϵ_p ความเครียดปกติ สำหรับการทดสอบการดึงในแนวระนาบ

เมื่อนำสมการที่ 34 (ที่ผ่านการใช้อนุกรมลูกโซ่แล้ว) และความสัมพันธ์ของอัตราการยืดตัวแบบดึงในแนวระนาบ ดังแสดงในภาพที่ 26(ค) จะได้สมการที่ 39

$$\sigma_p = 2 \left(\lambda_p - \frac{1}{\lambda_p^3} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (39)$$

สมการที่ 31 36 และ 38 เป็นสมการที่ใช้ในการหาพลังงานความเครียดจากผลการทดสอบความเค้น-ความเครียด ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาฟังก์ชันของความเค้นที่ขึ้นอยู่กับความเครียด เนื่องจากรูปแบบของเส้นกราฟที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยในทางปฏิบัตินั้น ใช้สมการที่ 40 41 และ 42 เพื่อหาพลังงานความเครียดจากผลการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว แบบดึงสองแกน และแบบดึงในแนวระนาบ ตามลำดับ

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_U^i + \sigma_U^{i-1}) (\epsilon_U^i - \epsilon_U^{i-1}) \quad (40)$$

$$W = 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_B^i + \sigma_B^{i-1}) (\epsilon_B^i - \epsilon_B^{i-1}) \quad (41)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_P^i + \sigma_P^{i-1}) (\epsilon_P^i - \epsilon_P^{i-1}) \quad (42)$$

ในช่วงระยะหลายปีที่ผ่านมา คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) โดยเฉพาะอย่างยิ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น โดยใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสามมิติและมีรูปร่างที่ซับซ้อน รวมทั้งการวิเคราะห์ในสภาวะที่มีการยืดตัวสูงได้ดี ซึ่งสามารถช่วยในกระบวนการออกแบบชิ้นงานได้เป็นอย่างดี และการพัฒนาทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ช่วยให้มีการพัฒนาแบบจำลองคอนสติติวทีฟที่สามารถอธิบายผลได้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากต้องใช้ในแบบจำลองสำหรับการทำนายพฤติกรรมของวัสดุในขณะที่ได้รับแรงทางกล อย่างไรก็ตามจากการสำรวจเอกสารที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคอนสติติวทีฟที่ได้รับการพัฒนามาแล้วยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งาน (Charlton et al., 1993; Shen et al., 2004)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ของ THAI RUBBER LATEX CO., LTD.
- 1.2 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ของ THAI-LYSAGHT (THAILAND) CO., LTD.
- 1.3 กรดสเตียริก (stearic acid) ของ THAI POLY CHEMICALS CO., LTD.
- 1.4 เขม่าดำ (carbon black, CB) เกรด N330 ของ THAI CARBON BLACK PUBLIC CO., LTD.
- 1.5 ซิลิกา (silica) ของ TOKUYAMA SIAM SILICA CO., LTD.
- 1.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) ของ HERITAGE PLASITC, INC.
- 1.7 กำมะถัน (sulphur) ของ GPS PRODUCT CO., LTD.
- 1.8 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol, PEG) ของ UNION CHEMICAL 1986 CO., LTD.
- 1.9 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซอลซัลฟิनाไมด์ (N-Cyclohexyl-2-Benzothiazole Sulfonamide, CBS) ของ MONFLEX PTE. LTD.
- 1.10 น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) ของ GLOBAL CHEMIE TRADING CO., LTD.

2. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) ของ KNEADER MECHINARY CO., LTD.
- 2.2 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ขนาด 8×20 นิ้ว ผลิตโดย KODAIR SEISAKUSHO CO., LTD.: MODEL R11-3FF
- 2.3 เครื่องทดสอบความหนืดมูนีของยาง (Mooney viscometer) ของ TECHPRO-vis TECH: MODEL 123103
- 2.4 เครื่องทดสอบสมบัติการคงรูปของยางแบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) ของ TECHPRO-rheoTECH: MODEL 121105
- 2.5 เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) INSTRON: MODEL 1011

2.6 เครื่องทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืด (tension-fatigue tester) ของ WALLACE: MODEL F13

2.7 เครื่องทดสอบอายุความล้าหักงอ (De Mattia flexing machine) ของ WALLACE: MODEL F6

2.8 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) ของ WTB BINDER: MODEL FD400

2.9 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (rubber compression machine) ของ WABASH: MODEL V75H-18-BPX

2.10 เครื่องฉีดขึ้นรูปยาง (rubber injection machine) ของ REP. CO., LTD.: MODEL V37/100

2.11 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงรอยประสาน (compression mold for preparing the weldline specimen)

2.12 แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงรอยประสาน (injection mold for preparing the weldline specimen)

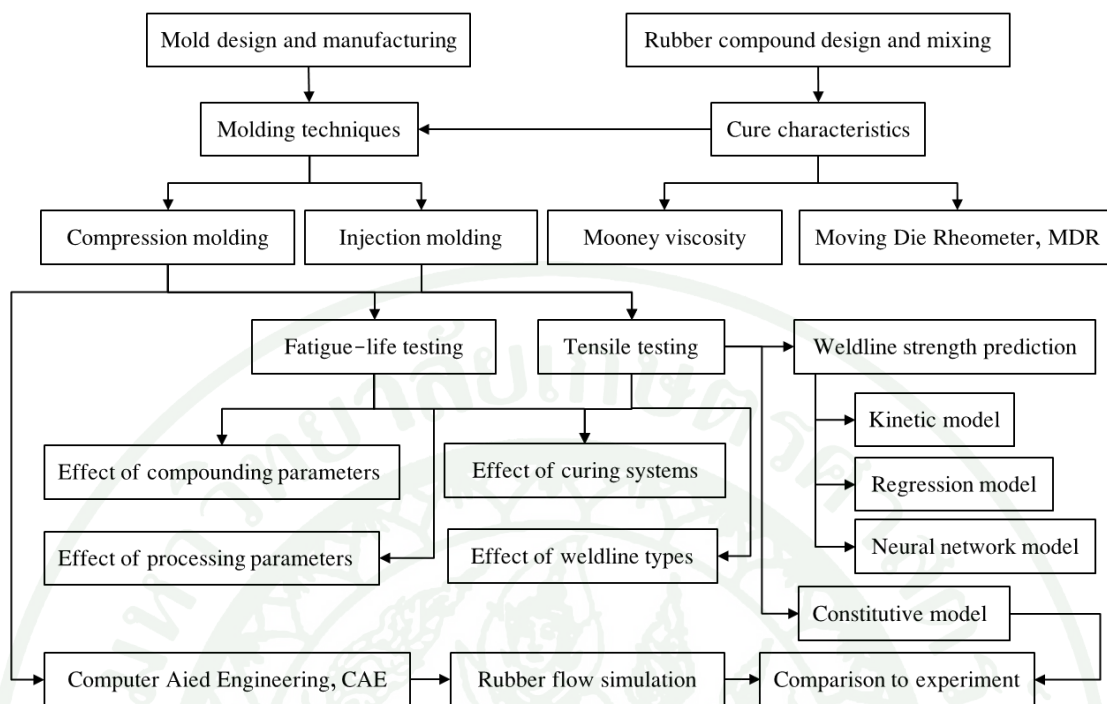
2.13 โปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรม (UNIGRAPHICS NX: VERSION 7.0)

2.14 โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CADMOULD: VERSION 2.0)

2.15 โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลข (MATLAB)

วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 30 โดยได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานและอายุความล้าในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูป ปัจจัยที่ได้ศึกษาแบ่งออกเป็น 1) ปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวนด์ ได้แก่ ระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม 2) ปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ 3) ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดถูกนำไปพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสาน รวมถึงได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายตำแหน่งรอยประสานที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป 4) ได้ประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ภายในแม่พิมพ์ฉีด และ 5) ได้พัฒนาแบบจำลองคอนสตีติวทีฟที่อธิบายถึงพฤติกรรมในขณะที่ยืดรับแรง ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และผลการทดลองจริง



ภาพที่ 30 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมยางคอมพาวนด์และการทดสอบสมบัติของยาง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งได้กำหนดส่วนผสมของยางคอมพาวนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยชนิดของสารตัวเติมที่ศึกษา ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 15 30 45 และ 60 phr ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป ซึ่งได้แก่ ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV ของยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมเขม่าดำ 60 phr

ขั้นตอนการบดผสมยางเริ่มต้นโดยการนำยางธรรมชาติมาบดให้นิ่ม (mastication) ด้วยเครื่องบดผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงบดผสมซึ่งคือออกไซด์และกรดสเตียริกเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นผสมสารตัวเติมครึ่งละหนึ่งในสามของสารตัวเติมทั้งหมด โดยใช้เวลากึ่งละ 2 นาที (ในกรณีของเขม่าดำใช้การบดผสมร่วมกับน้ำมันอะโรมาติกเพื่อช่วยให้เขม่าดำเกิดการกระจายตัวและเพื่อให้บดผสมได้ง่ายขึ้น สำหรับกรณีของซิลิกาใช้การบดผสมร่วมกับ PEG เพื่อป้องกันซิลิกาดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยา รวมทั้งเพื่อป้องกันการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกาภายในยางคอมพาวนด์) แล้วจึงนำยางคอมพาวนด์ที่ได้มาบดผสมต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิลูกกลิ้ง 70°C โดยบดผสมสาร

ตัวเร่งปฏิกิริยา (CBS) และกำมะถัน เป็นเวลา 1 นาที และ 3 นาที ตามลำดับ แล้วปรับขนาดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง เพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ให้เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 5 mm และพักยางคอมพาวนด์ไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปทดสอบความหนืดมูนนี่ ทดสอบสมบัติการคงรูป รวมถึงนำยางคอมพาวนด์ไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัย

Materials	Additive contents (*phr)			
	Vulcanization systems			
	CV			EV
STR5L	100	100	100	100
Stearic acid	2	2	2	2
ZnO	4	4	4	4
Sulfur	2.4	2.4	2.4	0.8
CBS	0.8	0.8	0.8	2.4
CaCO ₃	0/15/30/45/60	-	-	-
Silica	-	0/15/30/45/60	-	-
Carbon black	-	-	0/15/30/45/60	60
PEG	-	0/0.9/1.8/2.7/3.6	-	-
Aromatic oil	-	-	0/1/2/3/4	4

*phr = part per hundred of rubber

1.1 การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

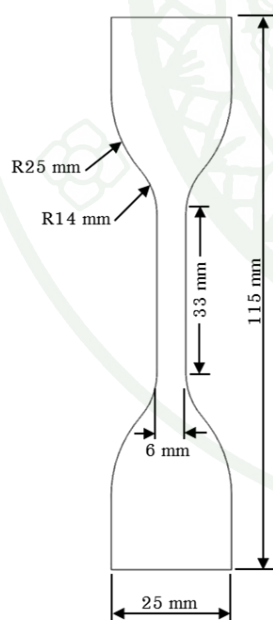
การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ สามารถทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 ค่าความหนืดที่วัดได้เรียกว่าความหนืดมูนนี่ หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ คือ นำยางคอมพาวนด์วางในห้องทดสอบ (chamber) ที่มีจานโลหะ (rotor) ภายในและหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 2 ± 0.02 รอบต่อวินาที โดยใช้อุณหภูมิ 100°C และการหมุนของจานโลหะที่มียางห่อหุ้มนี้ทำให้เกิดแรงบิด (torque) ซึ่งมีไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดขนาดของการเคลื่อนที่ดังกล่าวออกมาเป็นหน่วย ที่เรียกว่าค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity, MV) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด $8.30 \pm 0.02 \text{ N.m}$ เทียบเท่ากับค่าความหนืด 100 มูนนี่

1.2 การทดสอบการคงรูปของยางคอมพาวนด์ (cure characteristic)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เวลาเริ่มคงรูป (scorch time) และเวลาคงรูป (optimum cure time) ของยาง คือ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (MDR) ซึ่งกำหนดวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 โดยการวัดค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นจากการหมุนแกว่งของตาย ในขณะที่ยางคอมพาวนด์เกิดปฏิกิริยาคงรูปเมื่อได้รับความร้อนจากห้องทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยได้กำหนดอุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 140°C ถึง 170°C เป็นระยะเวลา 30 นาที

1.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile properties)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เริ่มต้นจากการตัดชิ้นงานยางด้วยเครื่องตัดแบบใช้กำลังลมให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) ดังแสดงในภาพที่ 31(ก) จากนั้นจึงนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ดังแสดงในภาพที่ 31(ข) โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



(ก)

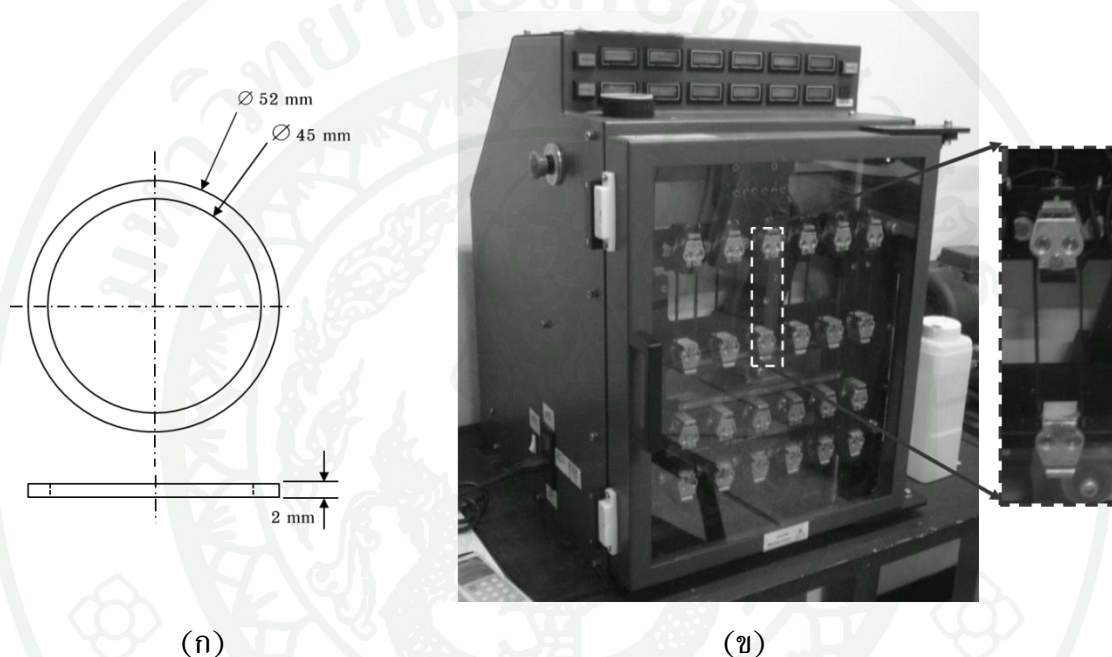


(ข)

ภาพที่ 31 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (ก) ขนาดชิ้นงาน (Die C) และ (ข) ชิ้นงานขณะทดสอบ

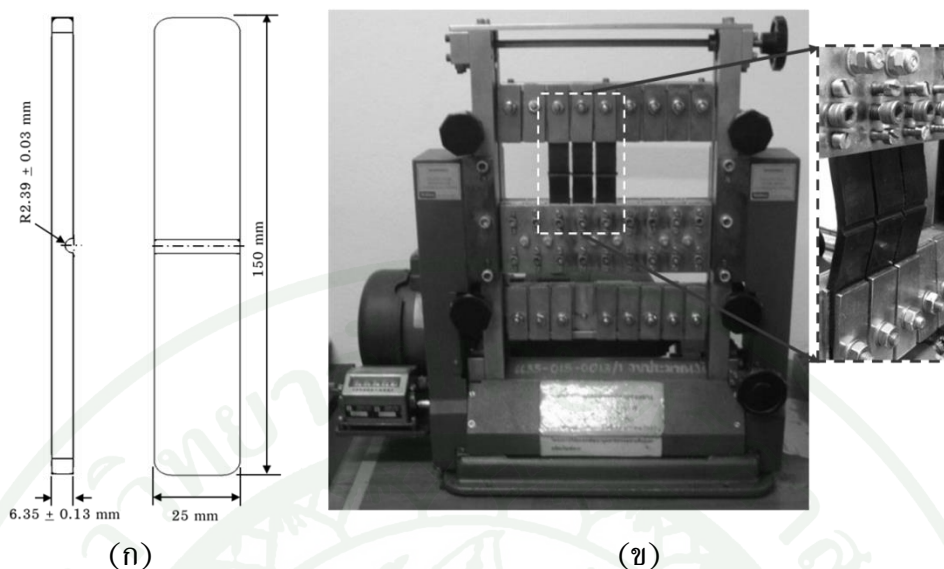
1.4 การทดสอบสมบัติอายุความล้าแบบดึงยืด (tension-fatigue life) และอายุความล้าแบบหักงอ (flex-fatigue life)

ชิ้นงานยางที่ใช้ในการทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืดมีลักษณะเป็นวงแหวนและมีรายละเอียดของขนาดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 32(ก) ซึ่งชิ้นงานยางดังกล่าวถูกนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืด ดังแสดงในภาพที่ 32(ข) ตามมาตรฐาน BS903-A51 โดยกำหนดระยะยืดที่ 100% แล้วทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน



ภาพที่ 32 การทดสอบสมบัติอายุความล้าแบบดึงยืดมาตรฐาน BS903-A51 (ก) ขนาดชิ้นงาน และ (ข) ชิ้นงานขณะทดสอบ

การทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะและขนาด ดังแสดงในภาพที่ 33(ก) ซึ่งมีร่องบากครึ่งวงกลมกลางชิ้นงาน โดยชิ้นงานนี้ถูกติดตั้งเข้ากับเครื่อง De Mattia flexing ดังแสดงในภาพที่ 33(ข) ตามมาตรฐาน ASTM D430 ที่อัตราเร็วในการทดสอบเท่ากับ 300 ± 10 รอบต่อนาที



ภาพที่ 33 การทดสอบสมบัติอายุความล้าแบบหักงอตามมาตรฐาน ASTM D430 (ก) ขนาดชิ้นงาน และ (ข) ชิ้นงานขณะทดสอบ

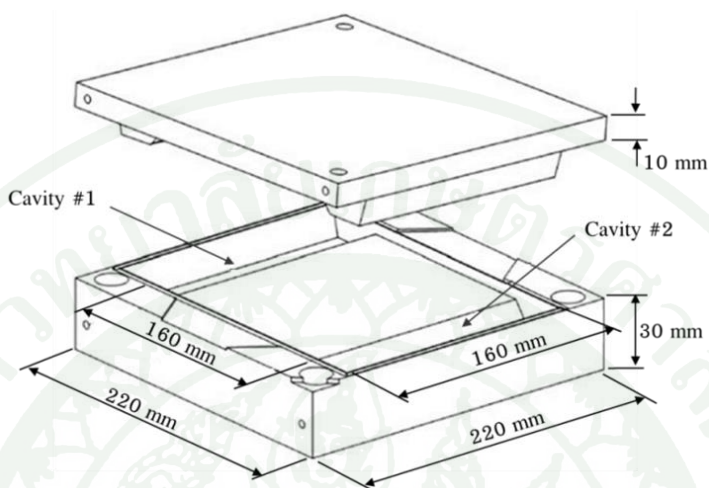
2. การออกแบบแม่พิมพ์และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบทางวิศวกรรม (Unigraphics VERSION 7.0) ซึ่งประกอบด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป 3 ชุด และแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป 1 ชุด โดยแม่พิมพ์ทั้งสองแบบสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานได้ ในกรณีของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ทดสอบอายุความล้า รวมถึงชิ้นงานสำหรับเก็บข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง สำหรับกรณีของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่มีรอยประสานแบบร้อน (hot weldline) และแบบเย็น (cold weldline)

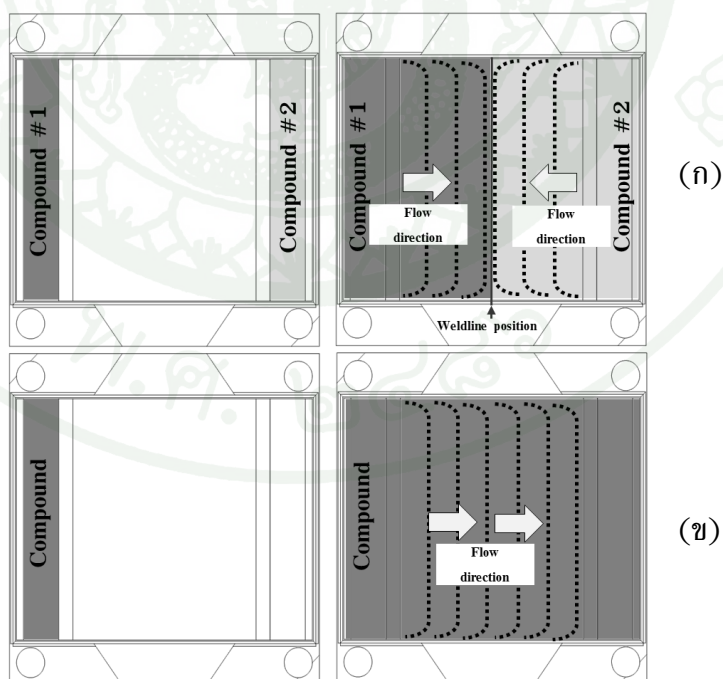
2.1 การขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

ในการเตรียมชิ้นงานยางทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ได้ใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 34 โดยได้ออกแบบให้มีตำแหน่งสำหรับการวางยางคอมพาวด์แต่ละด้านของแม่พิมพ์ ซึ่งเมื่ออัดขึ้นงานยางในแต่ละด้าน ยางสามารถไหลตามเบ้าแม่พิมพ์มาประสานกันที่บริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์เกิดเป็นรอยประสานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 35(ก) ในกรณีของการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน สามารถขึ้นรูปโดยการวางยางคอมพาวด์เพียงด้านเดียวเพื่อให้ยางไหลเต็มเบ้าพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 35(ข) ภาพที่ 36

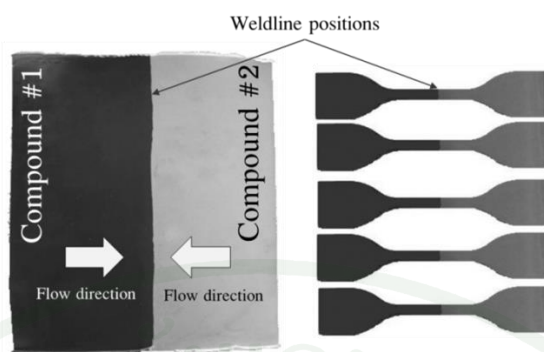
แสดงชิ้นงานยางที่มีรอยประสานซึ่งผ่านการอัดขึ้นรูปและลักษณะชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยในกรณีของการใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปนั้นได้เตรียมชิ้นงานตามเงื่อนไขในการศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 37



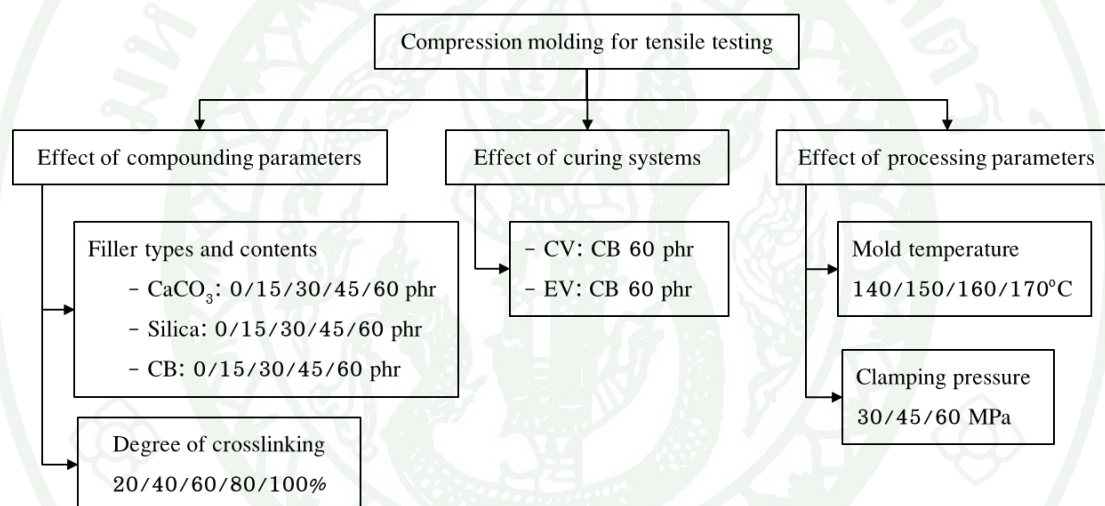
ภาพที่ 34 แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสาน



ภาพที่ 35 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (ก) การอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน และ (ข) การอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน

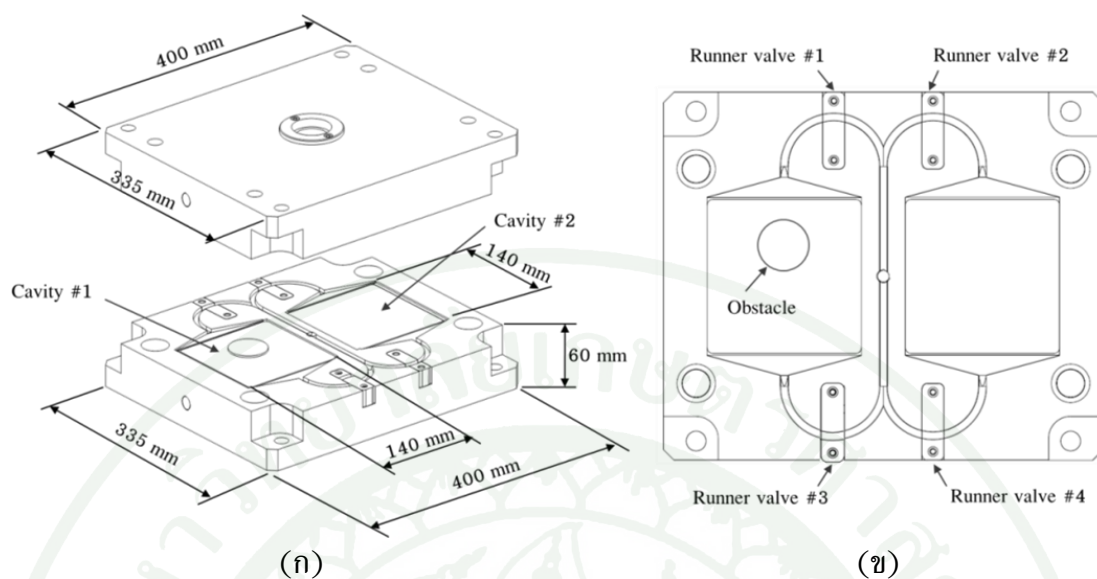


ภาพที่ 36 ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง



ภาพที่ 37 เงื่อนไขในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

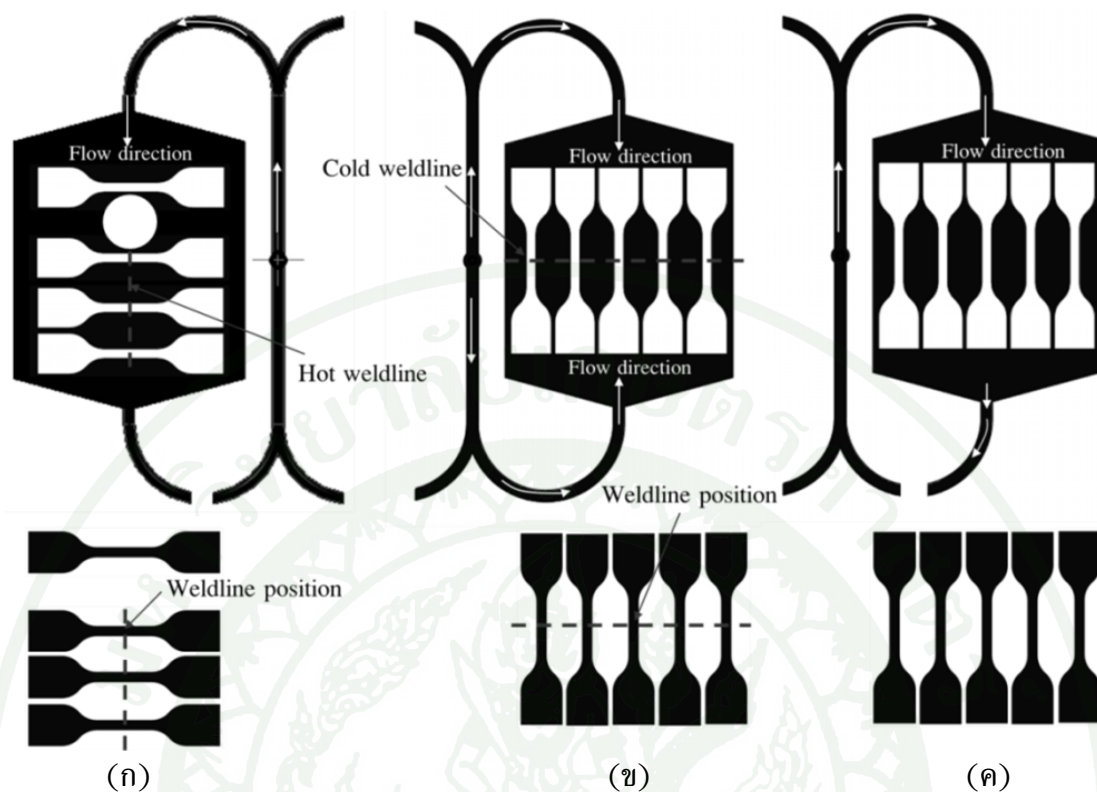
ในกรณีของการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงรอยประสาน ได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถผลิตชิ้นงานที่เกิดรอยประสานแบบร้อน และแบบเย็น ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งในกรณีของการเกิดรอยประสานแบบร้อน อาศัยหลักการปิดทางวิ่งตำแหน่งที่ 2 3 และ 4 เพื่อให้ยางคอมพาวนด์ไหลแยกผ่านสิ่งกีดขวางและเกิดเป็นรอยประสานขึ้นในแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 39(ก)



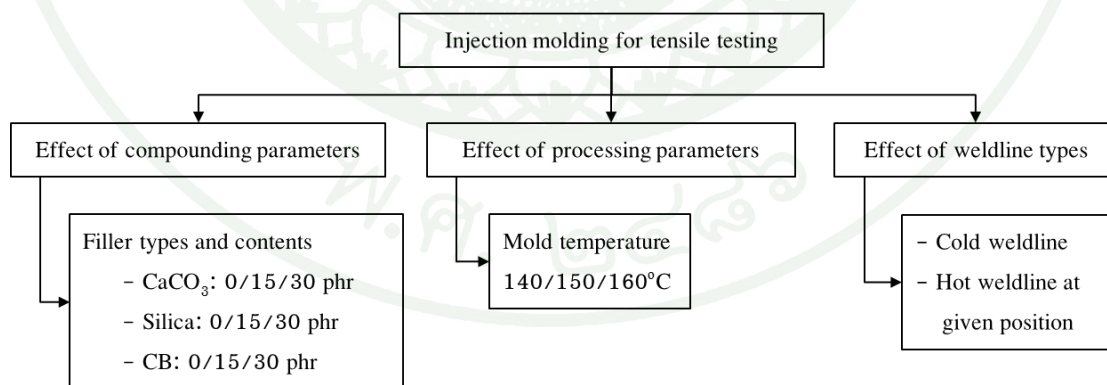
ภาพที่ 38 แม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสาน

(ก) มุมมองสามมิติ และ (ข) มุมมองด้านบน

การขึ้นรูปที่มีรอยประสานแบบเย็นทำได้โดยการปิดทางวิ่งตำแหน่งที่ 1 และ 3 ซึ่งทำให้เกิดรอยประสานบริเวณกลางชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 39(ข) สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานนั้นให้ปิดทางวิ่งตำแหน่งที่ 1 3 และ 4 ซึ่งทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ที่ 2 ได้ทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 39(ค) ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปถูกนำไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานเพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยในกรณีของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้เตรียมชิ้นงานตามเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 40 คือ ชิ้นงานยางผสมสารตัวเติม (เช่นเดียวกับกรณีการอัดขึ้นรูป) ซึ่งใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วงระหว่าง 140 °C ถึง 160 °C



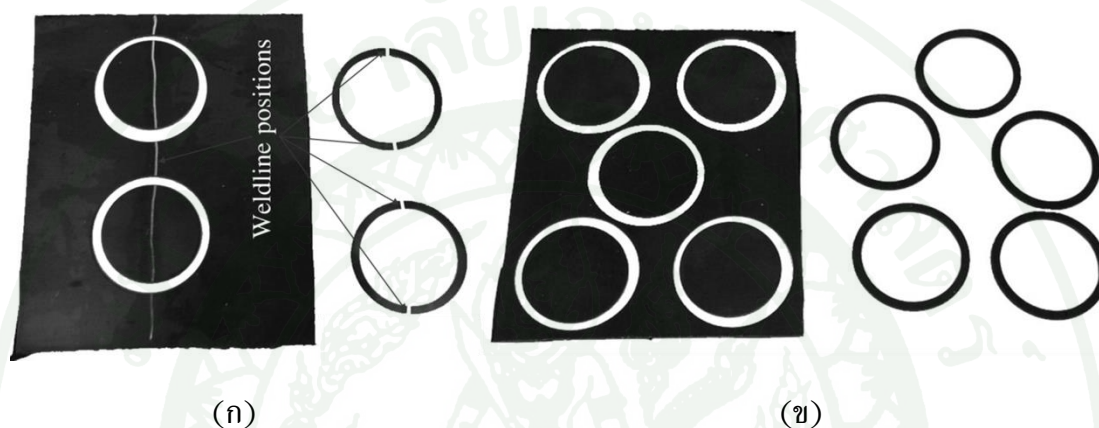
ภาพที่ 39 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (ก) ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อน (ข) แบบเย็น และ (ค) ชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน



ภาพที่ 40 เงื่อนไขในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

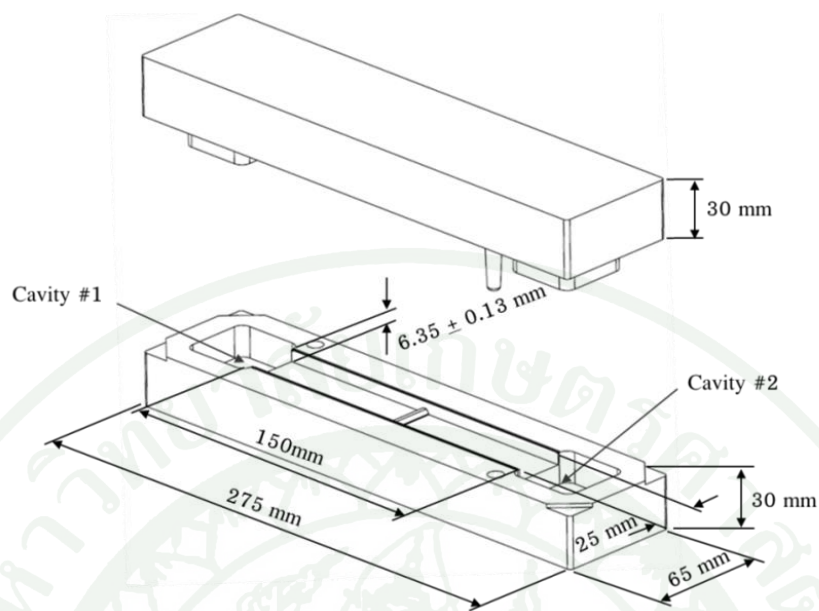
2.2 การขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืดและอายุความล้าแบบหักงอ

ในการขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อนำไปทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืดได้ใช้แม่พิมพ์เดียวกับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งชิ้นงานยางที่ได้ถูกนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ภาพที่ 41(ก) และ (ข) แสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีและไม่มีรอยประสาน ตามลำดับ

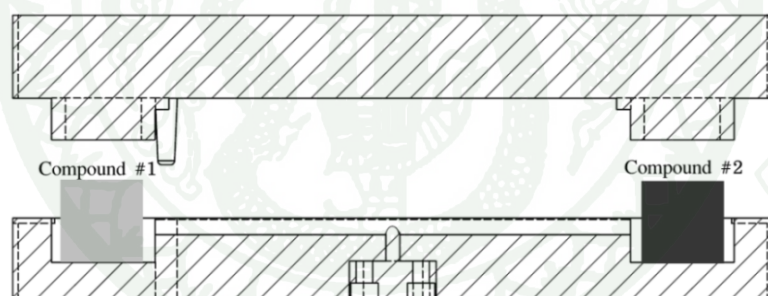


ภาพที่ 41 ชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืด (ก) ชิ้นงานที่มีรอยประสาน และ (ข) ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

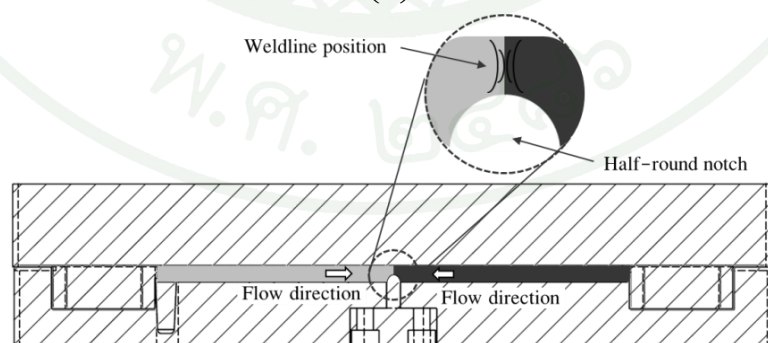
ส่วนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบหักงอได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ซึ่งใช้หลักการเดียวกับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ทั้งชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานและมีรอยประสานซึ่งมีรายละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 42 โดยในกรณีของชิ้นงานที่มีรอยประสานนั้น ต้องใช้แรงดันเพื่ออัดให้ยางคอมพาวนด์ไหลมาประสานกันที่ตำแหน่งร่องบากครึ่งวงกลม (half-round notch) บริเวณส่วนกลางของแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 43(ก) และ (ข) และได้ชิ้นงานทดสอบดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 42 แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ

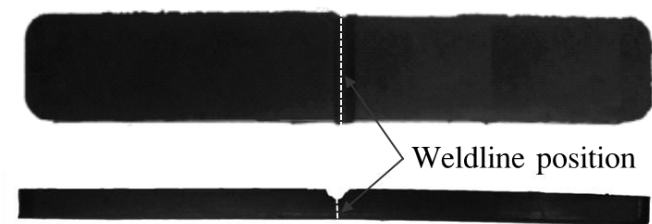


(ก)



(ข)

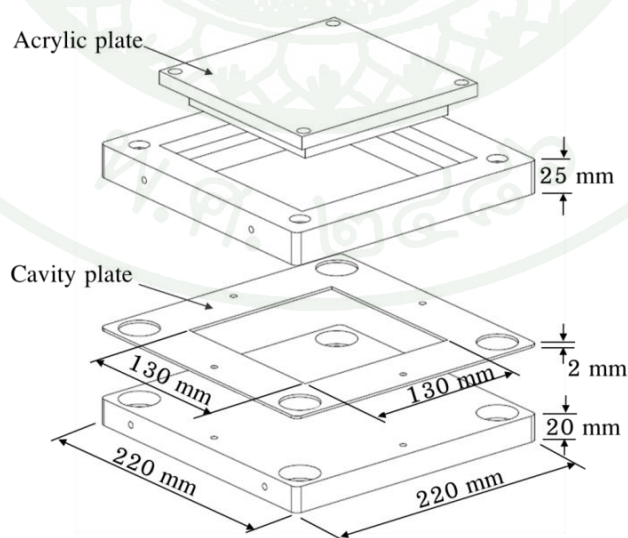
ภาพที่ 43 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอายุความล้าแบบหักงอ (ก) ลักษณะการวางยางคอมพาวด์เริ่มต้น และ (ข) การอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน



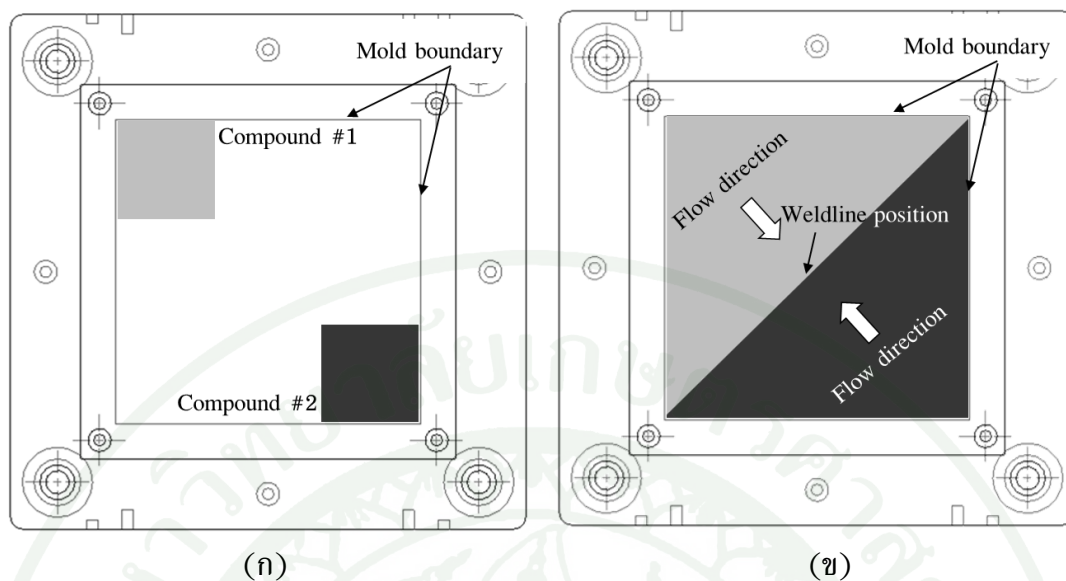
ภาพที่ 44 ชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหักงอที่ผ่านการอัดขึ้นรูป

2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานยางเพื่อเก็บข้อมูลนำไปพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสาน

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายตำแหน่งรอยประสานภายในแม่พิมพ์อัด จำเป็นต้องเก็บข้อมูลตำแหน่งพิกัดการวางยางคอมพาวนด์ (coordinate of charge position) และ ตำแหน่งพิกัดขอบเขตของแม่พิมพ์ (coordinate of mold boundary) รวมถึงตำแหน่งพิกัดรอยประสาน (coordinate of weldline position) ซึ่งได้ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ให้มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 45 โดยในการอัดขึ้นรูปได้วางยางคอมพาวนด์ภายในแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 46(ก) จากนั้นเมื่ออัดขึ้นรูปยางจะไหลมาประสานกันภายในแม่พิมพ์ทำให้เกิดรอยประสานขึ้นบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 46(ข) โดยเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการวางยางคอมพาวนด์เริ่มต้น ส่งผลให้รอยประสานเปลี่ยนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสาน



ภาพที่ 45 แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับเก็บข้อมูลตำแหน่งรอยประสาน



ภาพที่ 46 ลักษณะการวางยางคอมพาวด์เริ่มต้นและรอยประสานที่เกิดขึ้น (ก) ตำแหน่งยางคอมพาวด์เริ่มต้น และ (ข) ตำแหน่งรอยประสานที่เกิดขึ้น

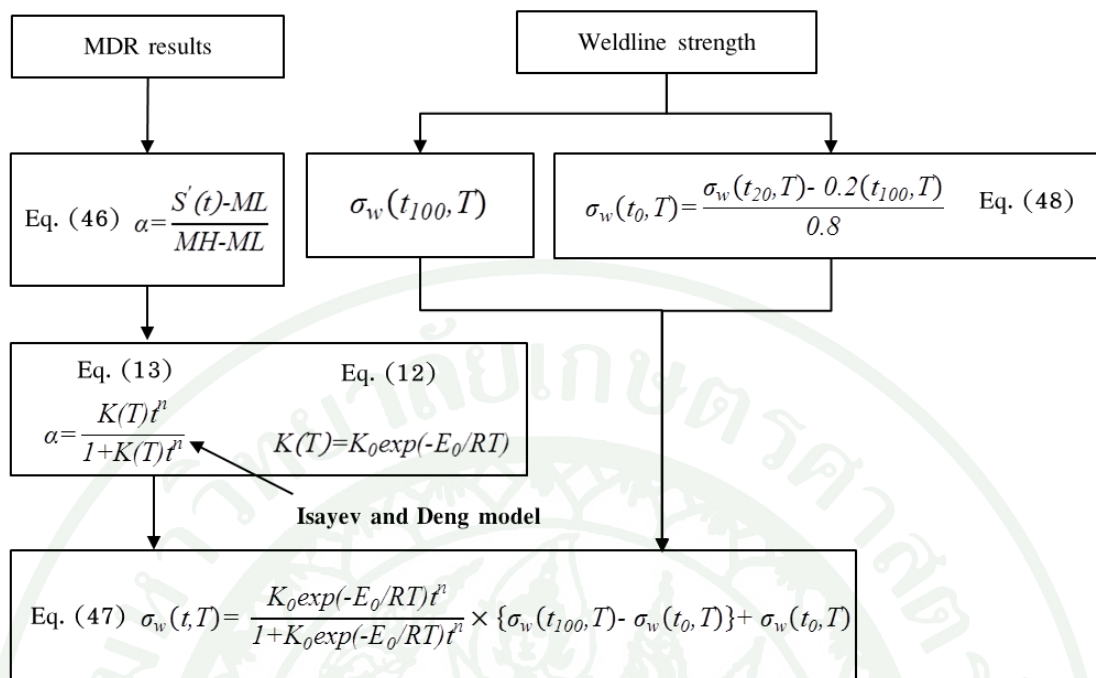
3. การพัฒนาแบบจำลองจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

งานวิจัยนี้ได้เลือกผลการทดสอบชิ้นงานยางผสมเซมาดำ 60 phr เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน โดยมีขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 47 ซึ่งอาศัยผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ MDR และผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ใช้ระดับการคงรูปเท่ากับ 20% และใช้ระดับการคงรูปเท่ากับ 100% ซึ่งในเบื้องต้นได้ตั้งสมมุติฐานว่า ความแข็งแรงรอยประสาน (weldline strength, σ_w) แปรผันโดยตรงกับระดับการคงรูป (degree of crosslinking, α) ดังแสดงในสมการที่ 43 และกำหนดเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 44

$$\sigma_w \propto \alpha(t, T) \quad (43)$$

$$\frac{\sigma_w(t, T) - \sigma_w(t_0, T)}{\sigma_w(t_{100}, T) - \sigma_w(t_0, T)} = \alpha \quad (44)$$

โดยที่ $\sigma_w(t, T)$ คือ ความแข็งแรงรอยประสานที่เวลาและอุณหภูมิใดๆ $\sigma_w(t_{100}, T)$ คือ ความแข็งแรงรอยประสานเมื่อคงรูปเต็มที่ (100% cured) และ $\sigma_w(t_0, T)$ ความแข็งแรงรอยประสานเมื่อเริ่มคงรูป (0% cured) สำหรับ α คือ ระดับการคงรูป



ภาพที่ 47 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูป

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการที่ 40 สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 45

$$\sigma_w(t, T) = \alpha \{ \sigma_w(t_{100}, T) - \sigma_w(t_0, T) \} + \sigma_w(t_0, T) \quad (45)$$

ระดับการคงรูป (α) สามารถหาคำนวณได้จากผลการทดสอบ แรงบิด (torque) กับเวลา (time) ด้วยเครื่องทดสอบ ODR หรือ MDR (Nichetti, 2004) โดยใช้สมการที่ 46

$$\alpha = \frac{S'(t) - ML}{MH - ML} \quad (46)$$

โดยที่ $S'(t)$ MH และ ML คือ ค่าแรงบิดที่เวลาต่างๆ ค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque) และค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque) ตามลำดับ

จากนั้นใช้แบบจำลองที่อธิบายจลนพลศาสตร์ในกระบวนการคงรูปที่พัฒนาโดย Isayev and Deng (1988) ดังสมการที่ 13 และ 10 โดยค่าคงที่ n คือ สัมประสิทธิ์อัตราเอกซ์โพเนนเชียล (exponential rate coefficient) และ $K(t)$ คือ เวลาจลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิที่กำหนด

(kinetic time at given temperature) ซึ่งได้จากการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB

จากผลการปรับเส้นโค้งแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear curve fitting) ทำให้ทราบถึงค่า n ที่เป็นตัวแทนของอัตราคงที่เวลาต่างๆ และได้รับค่า $K(t)$ ซึ่งถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ $\ln K(t)$ แล้วนำมาพล็อตกับค่า $1/T$ โดยจะได้สมการเส้นตรง ซึ่งในที่นี้สามารถหาค่าคงที่ K_0 และค่า E_0 จากจุดตัดแกน Y (Y-intercept) และความชัน (slope) ของสมการเส้นตรงตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการ 13 และ 10 แทนในสมการที่ 45 จะได้สมการที่ 47 ซึ่งสามารถหาค่าความแข็งแรงรอยประสานได้

$$\sigma_w(t, T) = \frac{K_0 \exp(-E_0/RT) t^n}{1 + K_0 \exp(-E_0/RT) t^n} \times \{\sigma_w(t_{100}, T) - \sigma_w(t_0, T)\} + \sigma_w(t_0, T) \quad (47)$$

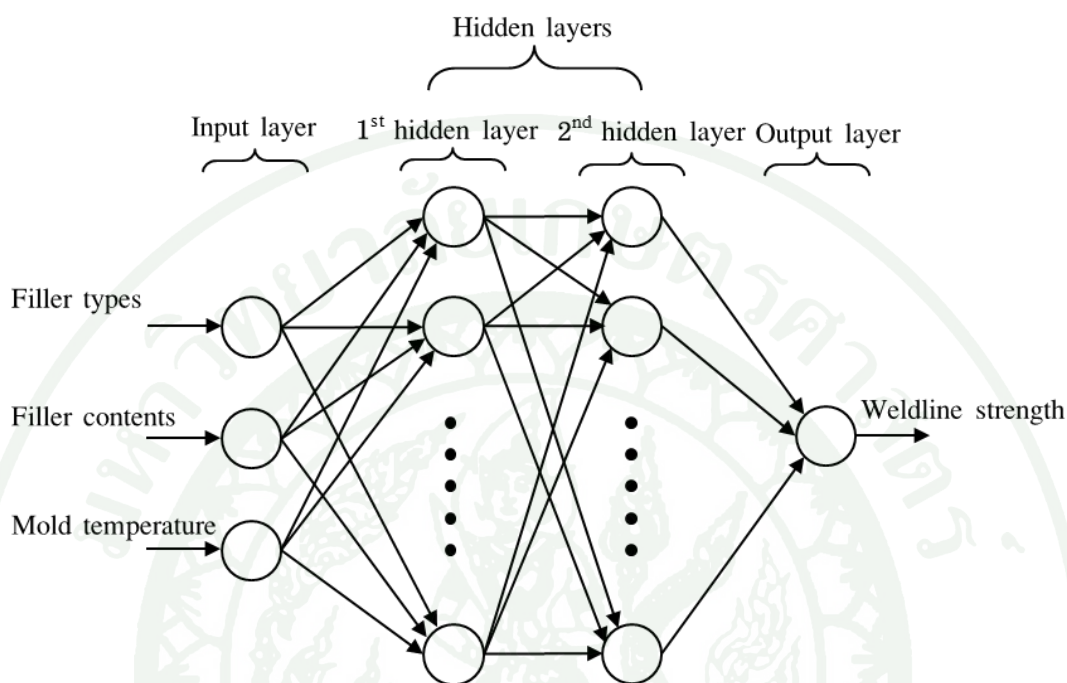
จากสมการที่ 47 สามารถหา $\sigma_w(T_{100}, t)$ จากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยประสานซึ่งใช้ระดับการคงรูปเท่ากับ 100% และ $\sigma_w(T_0, t)$ ด้วยการประมาณค่านอกช่วง (extrapolate) จากผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ใช้ระดับการคงรูปเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ โดยใช้สมการที่ 48

$$\sigma_w(t_0, T) = \frac{\sigma_w(t_{20}, T) - 0.2(t_{100}, T)}{0.8} \quad (48)$$

4. การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสาน ซึ่งประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียมนั้น ขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียม (architecture of neural network model) ได้แก่ อัตราการเรียนรู้ (learning rate) และจำนวนรอบการฝึกหัด (epoch) โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรนำเข้า สำหรับแบบจำลอง คือ ชนิดของสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเซมาต้า) ปริมาณสารตัวเติม (0 ถึง 30 phr) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (140 ถึง 160°C) ดังแสดงในภาพที่ 48 และได้พัฒนาแบบจำลองโดยการหาอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม รวมถึงจำนวนรอบการฝึกหัดที่ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากที่สุด จากนั้นได้หาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 (number of neurons in 1st hidden layer) และจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 (number of neurons in 2nd hidden layer) ตามลำดับ โดยในแต่ละขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมนี้ได้ใช้วิธีการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANalysis Of

VAriant, ANOVA) และการพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) เพื่อเลือกสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม



ภาพที่ 48 สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

5. การสร้างแบบจำลองการถดถอย (regression model) สำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

แบบจำลองการถดถอยใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลของสิ่งที่สนใจศึกษา (response variable) กับปัจจัยต่างๆ ที่เชื่อว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งที่ศึกษา (independent variable) ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยประสาน (weldline strength, σ_w) และตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสาน ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม (filler type, T , and content, C) รวมถึงอุณหภูมิแม่พิมพ์ (mold temperature, Mt) โดยแบบจำลองถดถอยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง (first-order regression model) และแบบจำลองการถดถอยแบบพหุนามกำลังสอง (second-order polynomial regression model) ดังแสดงในสมการที่ 49 และ 50 ตามลำดับ

$$\sigma_w = a_0 + a_1T + a_2C + a_3Mt \quad (49)$$

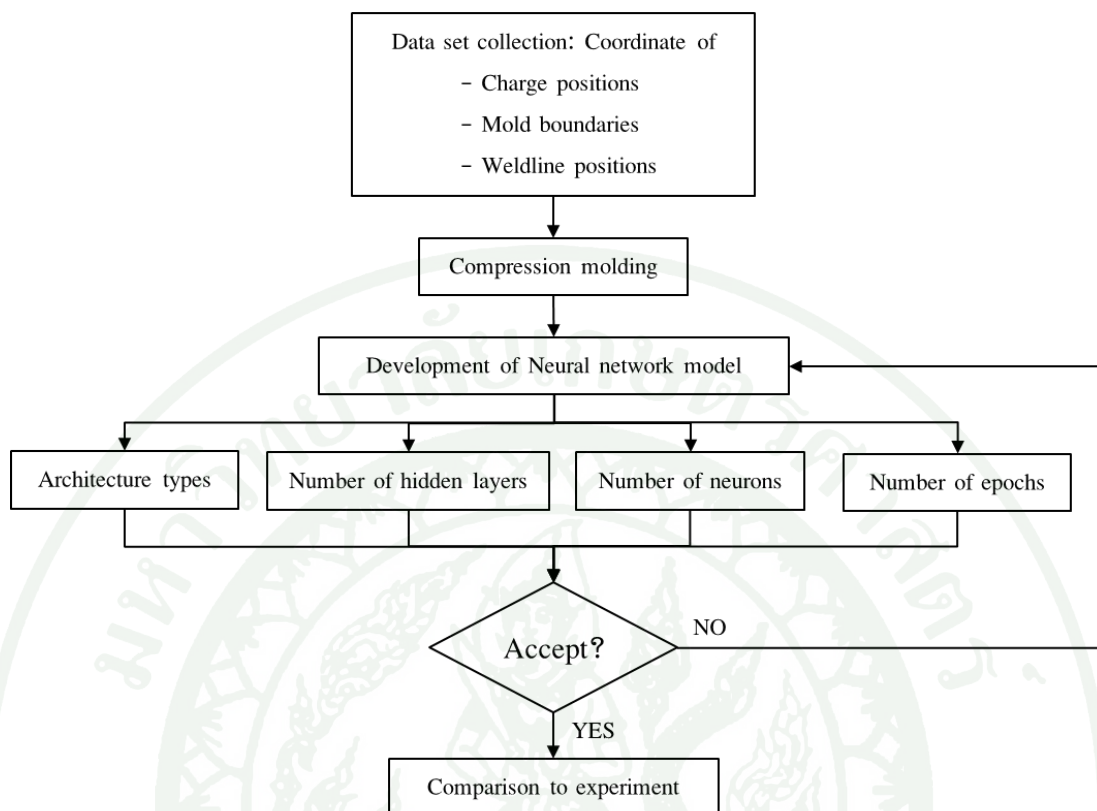
$$\sigma_w = a_0 + a_1T + a_2C + a_3Mt + a_4TC + a_5TMt + a_6CMt + a_7T^2 + a_8C^2 + a_9Mt^2 \quad (50)$$

โดยที่ $a_i (i=0, 1, \dots, 9)$ คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง T คือ ชนิดของสารตัวเติม ($\text{CaCO}_3 = 1$, Silica = 2, Carbon black = 3) C คือ ปริมาณสารตัวเติม และ Mt คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์

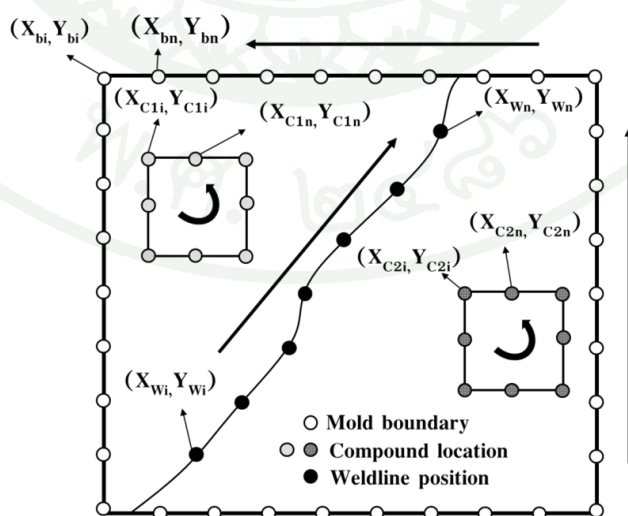
สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองสามารถหาได้โดยการเขียนฟังก์ชันความสัมพันธ์ในโปรแกรม MATLAB และแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (least-square regression) จากนั้นใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นข้อมูลเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้ฝึกหัดแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอย

6. การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายตำแหน่งรอยประสานในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

กระบวนการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายตำแหน่งของรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป ในกรณีที่มีชิ้นงานเริ่มต้น 2 ตำแหน่ง มีขั้นตอนการพัฒนาดังแสดงในภาพที่ 49 ซึ่งกำหนดให้ ขอบเขตของแม่พิมพ์ พิกัดตำแหน่งการขึ้นงานเริ่มต้น เป็นตัวแปรต้น ในขณะที่พิกัดตำแหน่งรอยประสานเป็นผลลัพธ์หรือตัวแปรตามที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ตำแหน่งของตัวแปรต้นและตัวแปรตามถูกเก็บอยู่ในรูปพิกัด X, Y ในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในภาพที่ 50 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ฝึกหัด ได้แก่ พิกัดขอบเขตของแม่พิมพ์ 4 จุด (8 ตัวแปร) พิกัดตำแหน่งขึ้นงานเริ่มต้น 2 ตำแหน่ง โดยแต่ละชั้นมีพิกัดของเขต 4 จุด (16 ตัวแปร) และตัวแปรตาม ได้แก่ พิกัดตำแหน่งของรอยประสาน 10 จุด (20 ตัวแปร) ซึ่งรูปแบบการวางชิ้นงานเริ่มต้น 200 รูปแบบ แบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกหัด 160 รูปแบบ และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเครือข่าย 40 รูปแบบ โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 51

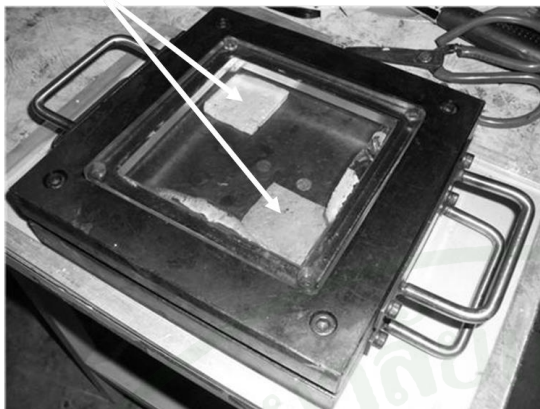


ภาพที่ 49 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสาน

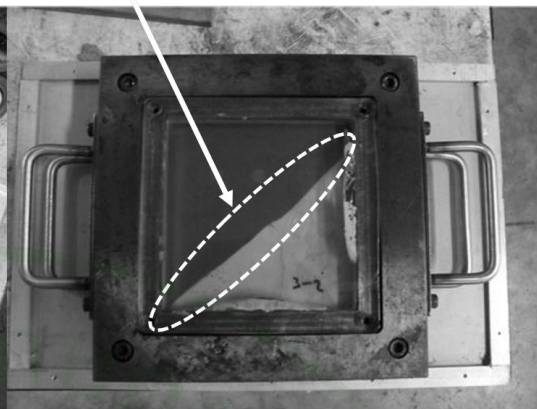


ภาพที่ 50 การเก็บพิกัดตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

Compound position



Weldline position

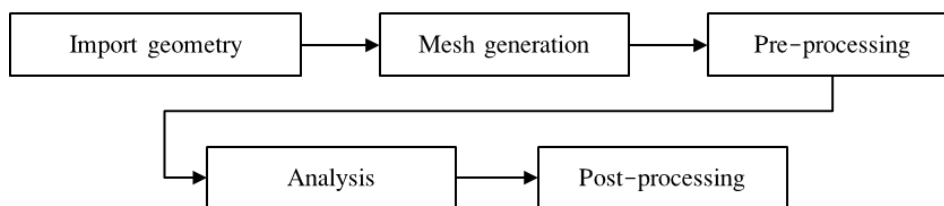


ภาพที่ 51 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของรอยประสาน

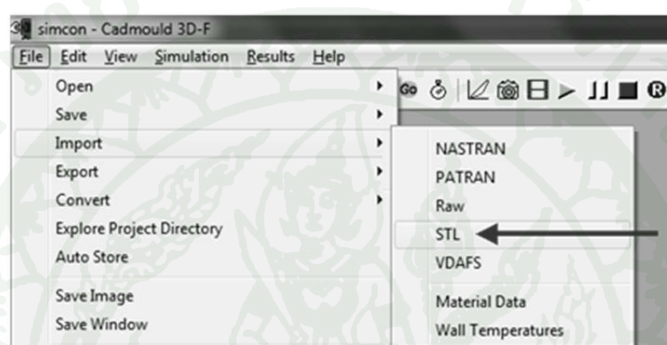
จากตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน นำมาเพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม โดยตัวแปรของแบบจำลองที่ได้ปรับเปลี่ยน ได้แก่ จำนวนชั้นซ่อน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน อัตราการเรียนรู้ จำนวนรอบการฝึกหัด โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแปรต่างๆ บอกเป็นค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error, MSE) ระหว่างข้อมูลของตัวแปรตามที่ใช้ฝึกหัดและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นตัวบอกความแม่นยำของการนำเครือข่ายประสาทเทียมไปใช้งาน

7. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CADMOULD VERSION 2.0 เพื่อวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งวัสดุยาง และเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้การวิเคราะห์โดยโปรแกรม CADMOULD เป็นการวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ซึ่งมีการแบ่งเอลิเมนต์เฉพาะที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็ว โดยขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 52 ซึ่งโดยเริ่มจากการนำแบบจำลองของชิ้นงานที่เป็นไฟล์ CAD ซึ่งโปรแกรมสนับสนุนเข้ามา จากนั้นจึงสร้างโครงร่างตาข่ายโดยแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ และให้ข้อมูลด้านวัสดุ (material data) และตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์ โดยภาพที่ 53 แสดงการนำเข้า (import) แบบจำลองของชิ้นงานที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม UNIGRAPHIC ซึ่งนามสกุลที่สามารถใช้ได้ คือ .STL

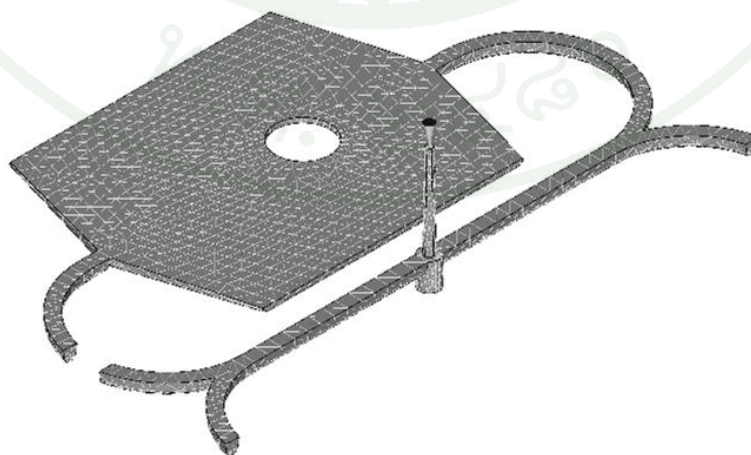


ภาพที่ 52 ขั้นตอนการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม CADMOULD VERSION 2.0



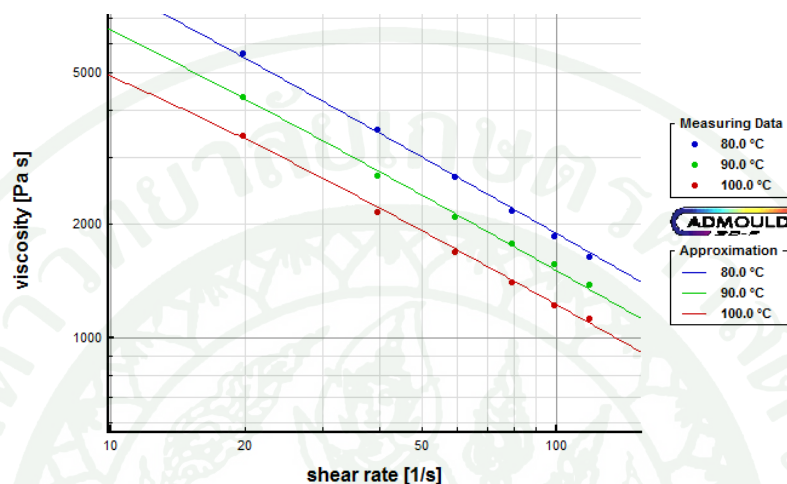
ภาพที่ 53 การ Import แบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์เข้ามาในโปรแกรม CADMOULD

เมื่อนำแบบจำลองสามมิติของชิ้นงานเข้ามาในโปรแกรมแล้ว จึงสร้างโครงร่างตาข่ายของชิ้นงาน โดยแบ่งเอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 54 ทั้งนี้ขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมควรมีอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาว (aspect ratio) ไม่เกิน 15 (Shoemaker, 2008)

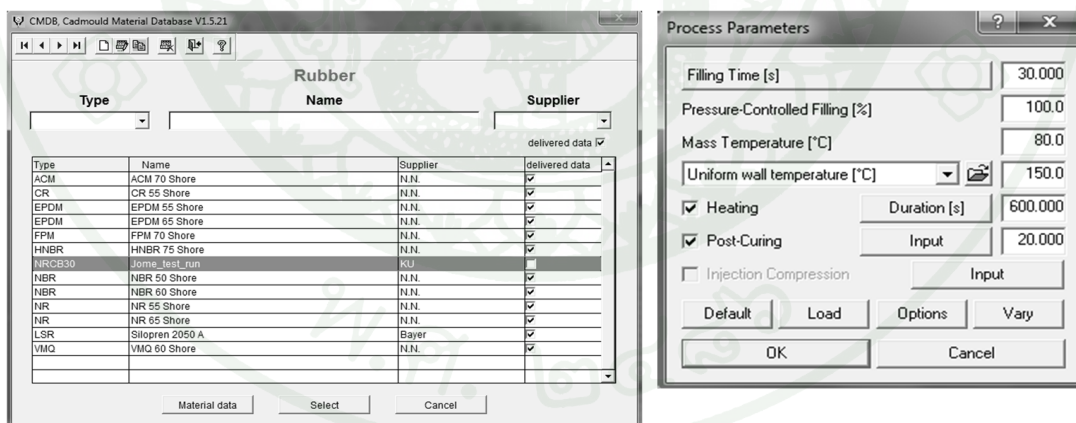


ภาพที่ 54 แบบจำลองหลังการสร้างโครงร่างตาข่าย

หลังจากการสร้างโครงร่างตาข่าย จึงเลือกชนิดของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผลการทดสอบค่าความหนืดเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน โดยอุณหภูมิในช่วง 140°C ถึง 160°C ดังแสดงในภาพที่ 55 รวมไปถึงกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งใช้ผลการทดสอบสมบัติการคงรูป ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาที่ใช้ในการคงรูป ดังแสดงในภาพที่ 56



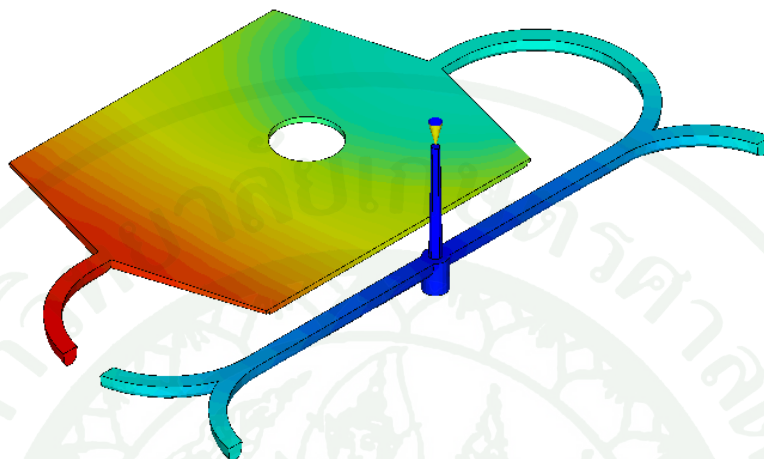
ภาพที่ 55 ความหนืดของยางคอมพาวด์ที่ใช้วิเคราะห์



ภาพที่ 56 ข้อมูลของวัสดุและตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้วิเคราะห์

ขั้นตอนการประมวลผล เป็นการแก้ไขปัญหาจากตัวแปรต้นที่ป้อนให้กับโปรแกรม โดยเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมขึ้นอยู่กับจำนวนของเอลิเมนต์ และประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลังจากขั้นตอน

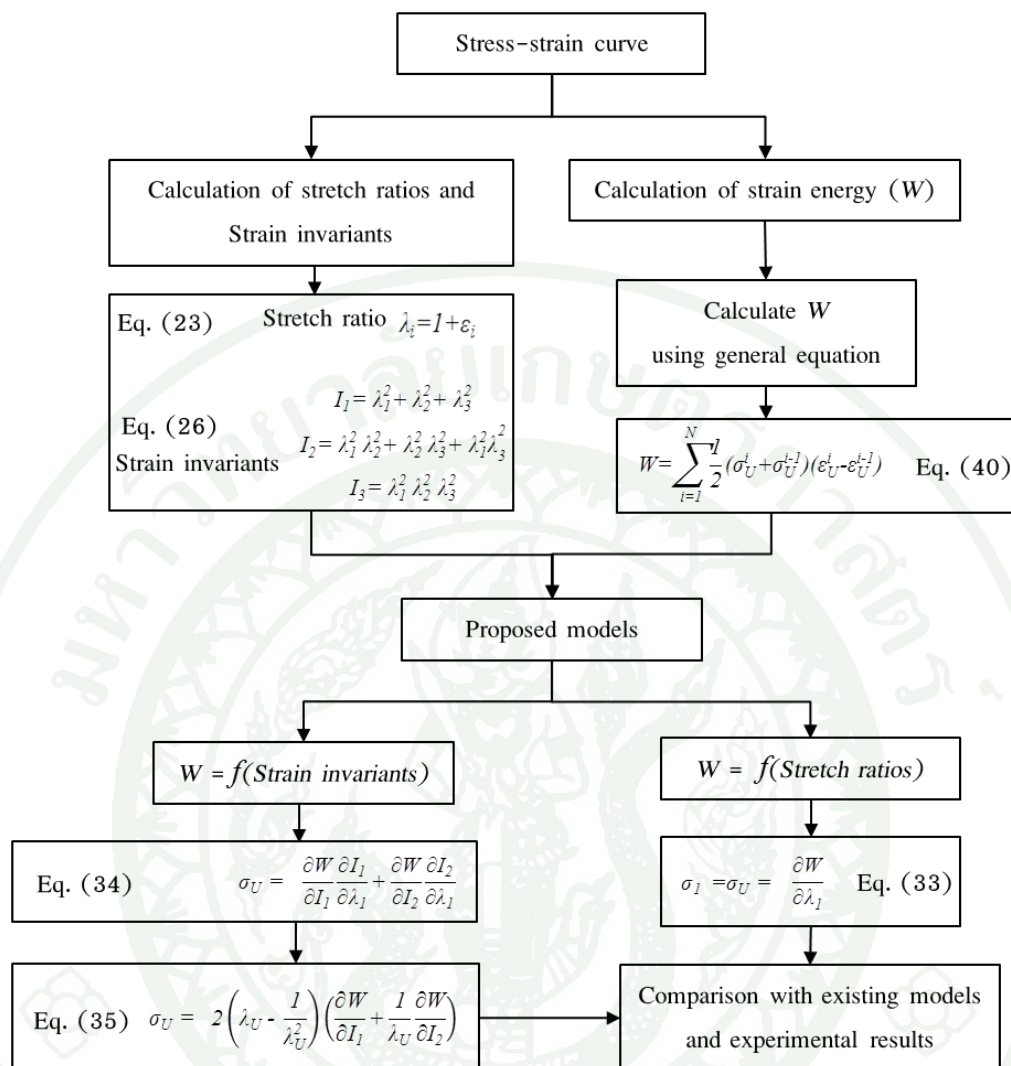
การประมวลผล สามารถเลือกการแสดงผลที่เกิดจากการไหลของยางภายในแม่พิมพ์ได้ เช่น อุณหภูมิของชิ้นงาน แรงดันฉีดและอัตราเครียดเฉือนที่เกิดขึ้น รวมไปถึงตำแหน่งของรอยประสานหรือจุดที่อากาศค้างภายในชิ้นงาน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 ผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CADMOULD VERSION 2.0

8. การพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสำหรับวัสดุยาง

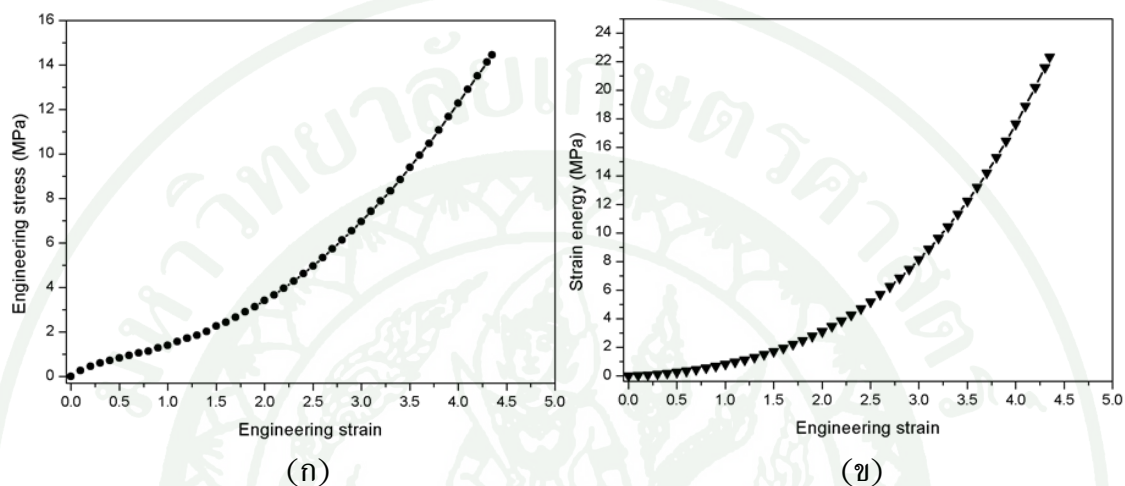
ขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 58 โดยใช้ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน ซึ่งผสมเซมาดำ 30 phr และฉีดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 150°C เริ่มต้นโดยการนำข้อมูลการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 59(ก) เพื่อหาค่าพลังงานความเครียด (W) ด้วยสมการที่ (40) ซึ่งเป็นสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการหาค่าพลังงานความเครียด โดยค่าของพลังงานความเครียดที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 59(ข) จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนการยืดตัว (stretch ratios, λ_s) และอินวาเรียนท์ของความเครียด (strain invariants, I_s) โดยใช้สมการที่ 23 และ 26 ตามลำดับ



ภาพที่ 58 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

การพัฒนาแบบจำลองในขั้นตอนนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับที่มี 1 ชั้นซ่อน ในการหาฟังก์ชันพลังงานความเครียด โดยกำหนดให้อินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 1 (I_1) และอินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 2 (I_2) เป็นตัวแปรนำเข้า และพลังงานความเครียดเป็นตัวแปรส่งออก สำหรับอินวาเรียนต์ของความเครียดลำดับที่ 3 (I_3) ไม่ได้นำมาพิจารณาเนื่องจากกำหนดให้ยางคงรูปเป็นวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดและอินวาเรียนต์ของความเครียด จากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้มาหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 เทียบกับ I_1 และ I_2 โดยใช้สมการที่ 34 และ 35 ซึ่งผลที่ได้ คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยาง โดยในกรณีของแบบจำลองพลังงานความเครียดที่เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการยืดตัวสามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางได้จากสมการที่

จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่ได้พัฒนาขึ้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (แบบจำลอง Neo-Hookean แบบจำลอง Mooney-Rivlin และแบบจำลอง Ogden) และผลจากการทดลองจริง โดยค่าคงที่ต่างๆ ของฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมย่อยที่กำหนดโดยผู้ใช้ (user define subroutine) ด้วยโปรแกรม Origin 8.0



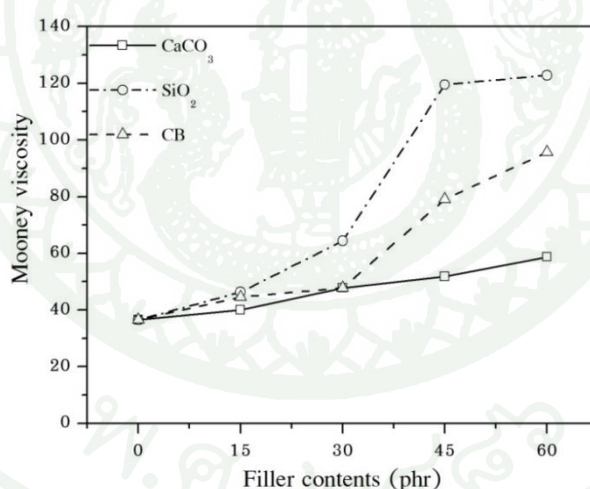
ภาพที่ 59 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (ก) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (ข) พลังงานความเครียด

ผลและวิจารณ์

1. ผลการทดสอบความหนืดมูนีและสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในภาพที่ 60 พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลต่อค่าความหนืดมูนีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของซิลิกาและเขม่าดำ ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิว (surface area) น้อย ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อยางลดลง (Barlow, 1993; Chuayjuljit *et al.*, 2002) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจึงไม่ทำให้ความหนืดของยางคอมพาวนด์เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) ปกติการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในยางเป็นการเพิ่มความแข็งและเพิ่มปริมาณเนื้อยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเท่านั้น



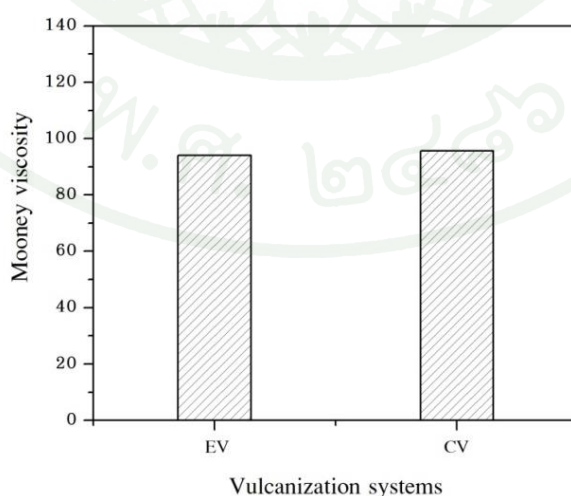
ภาพที่ 60 ความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์เมื่อผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาปริมาณซิลิกาและเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้สามารถยึดเกาะกับเนื้อยางได้ดี โดยซิลิกาและเขม่าดำทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) ดังนั้นความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์หรือความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์จึงลดลง (Blow and Hepburn, 1982) และเมื่อ

เปรียบเทียบค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า ที่ปริมาณการผสม 30 ถึง 60 phr ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาสูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (agglomerate) ภายในยางคอมพาวนด์ด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen-bond) ที่มีความแข็งแรงค่อนข้างมาก (Ou *et al.*, 1996; พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002; Pasbakhsh *et al.*, 2009) ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ยากกว่าเขม่าดำ สำหรับในกรณีที่ผสมซิลิกาสูงเกินไปในยางในปริมาณสูง (มากกว่า 45 phr) มีโอกาสที่ทำให้กลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของซิลิกาเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกา เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (filler-filler network) ซึ่งโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมนี้ทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงขึ้น ถึงแม้ว่าสูตรยางที่ใช้ได้ผสม PEG เพื่อลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนภายในเนื้อยางแล้วก็ตาม

1.2 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์

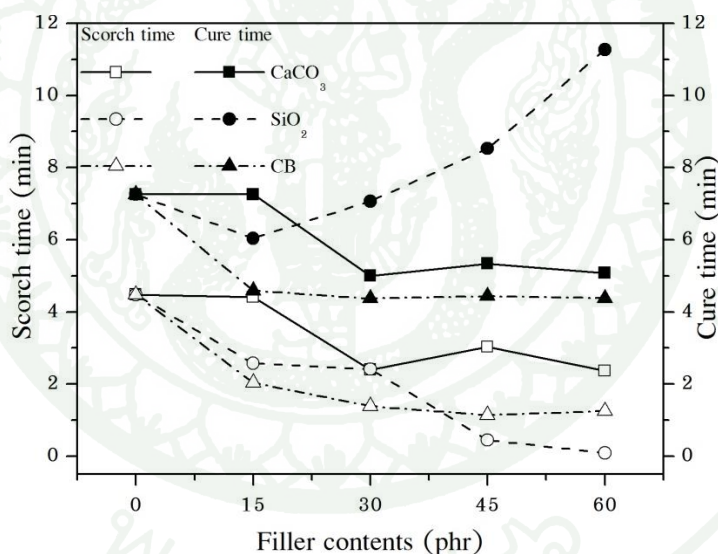
เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ซึ่งคงรูปด้วยกำมะถัน (sulphur vulcanization system) ทั้งระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization system, CV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization system, EV) ดังแสดงในภาพที่ 61 พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากใช้เวลาในการบดผสมเท่ากัน การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลยางหรือการขาดของสายโซ่โมเลกุลจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 61 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

1.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์

ผลการทดสอบเวลาเริ่มคงรูป (scorch time, t_{s2}) และเวลาคงรูป (optimum cure time, t_{c90}) ดังแสดงในภาพที่ 62 พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยาง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเซมาดำ ส่งผลให้เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวภายในเนื้อยางของสารตัวเติมมีความแตกต่างกัน เป็นผลมาจากอนุภาคของเซมาดำมีขนาดเล็ก ทำให้มีการกระจายตัวในเนื้อยางคอมพาวนด์ได้ดี อีกทั้งเซมาดำมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บางกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยางได้ดี ซึ่งได้แก่ คาร์บอกซิล (carboxyl) ควิโนน (quinone) และฟีนอลิก (phenolic) (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989) และนอกจากนี้เซมาดำยังมีการนำความร้อนสูง (high thermal conductivity) (Barnett, 1934; Kohjiya *et al.*, 2006; Nozu *et al.*, 2008) เมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับความร้อนจึงสามารถแพร่กระจายความร้อนภายในยางคอมพาวนด์ได้ดี และเกิดกระบวนการวัลคาไนเซชันได้อย่างรวดเร็ว



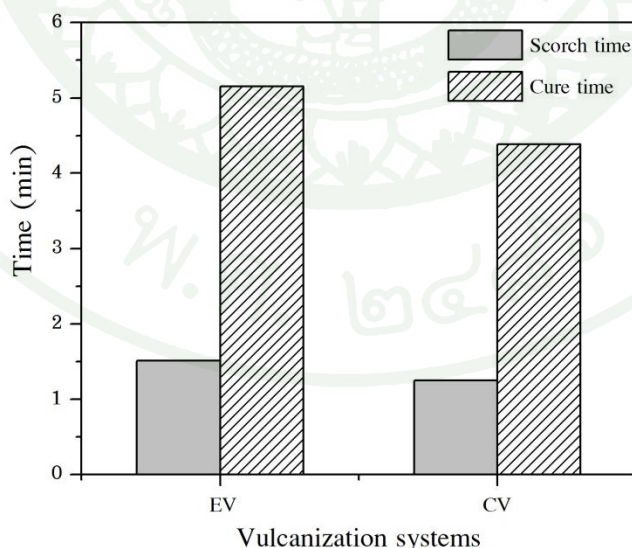
ภาพที่ 62 เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน

กรณีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กเช่นเดียวกับเซมาดำพบว่า เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อผสมซิลิกาในปริมาณ 15 และ 30 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากการบดผสมซิลิกาได้ใช้ PEG เพื่อป้องกันการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาไว้ที่ผิวของซิลิกา อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มการผสมซิลิกาในปริมาณ 45 และ 60 phr พบว่า เวลาเริ่มคงรูปลดลงอย่างมาก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิ-

ลิกาในปริมาณสูงมีปริมาณ PEG ไม่เพียงพอ ซิลิกาจึงรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นเครือข่ายของสารตัวเติม และสารเคมีต่างๆ เกิดการแตกตัวและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ไม่ได้เป็นตัวแทนของยางคอมพาวนด์ทั้งหมด และเมื่อพิจารณาเวลาการขึ้นรูปของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณสูง พบว่า เวลาการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเหตุผลที่ปริมาณ PEG ไม่เพียงพอตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาไว้ที่ผิวของซิลิกา ซึ่งส่งผลให้เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดกระบวนการการขึ้นรูปสมบูรณ์ช้าลง (Ciesielski, 1999; Leblance, 2002; Rodgers and Waddell, 2005; Hewitt, 2007)

1.4 อิทธิพลของระบบการขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติการขึ้นรูปของยางคอมพาวนด์

ภาพที่ 63 แสดงเวลาเริ่มการขึ้นรูปและเวลาการขึ้นรูปของยางคอมพาวนด์ที่บดผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ซึ่งใช้ระบบการขึ้นรูปแบบ CV และระบบการขึ้นรูปแบบ EV พบว่า ยางคอมพาวนด์ ที่ใช้ระบบการขึ้นรูปแบบ EV มีเวลาเริ่มการขึ้นรูปและเวลาการขึ้นรูปที่ช้ากว่าระบบการขึ้นรูปแบบ CV ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากยางที่ขึ้นรูปด้วยระบบ EV ซึ่งใช้สารตัวเร่ง คือ CBS ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มที่ต้องการระยะเวลาในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ที่เรียกว่า “Delayed action” (สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ต้องการความร้อนเพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นเอมีนและ MBT ก่อนที่ MBT จะเข้าไปเร่งปฏิกิริยาการขึ้นรูป) ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาการขึ้นรูปและเวลาในการขึ้นรูปที่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น (พงษ์ธร, 2550)

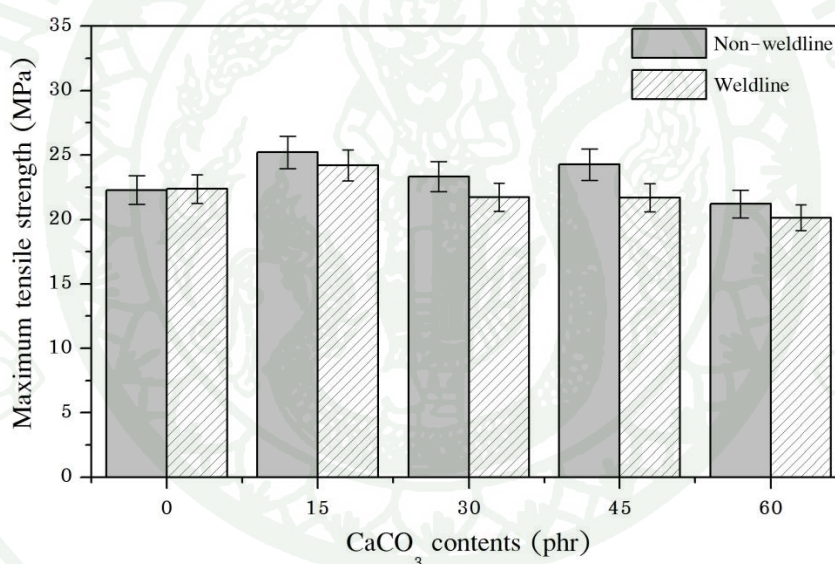


ภาพที่ 63 สมบัติการขึ้นรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการขึ้นรูปแบบ EV และ CV

2. ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

2.1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

ภาพที่ 64 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งพบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ รวมถึงไม่มีอันตรกิริยากับเนื้อยาง แคลเซียมคาร์บอเนตจึงทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989)



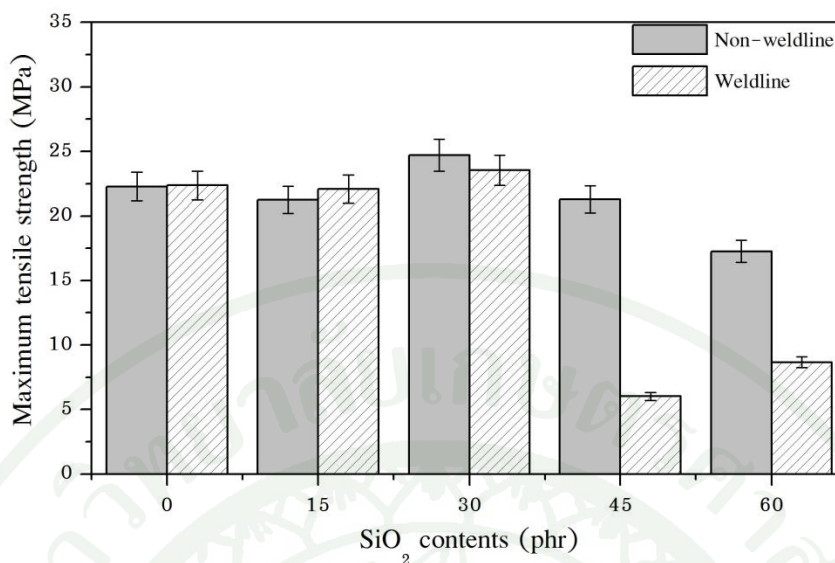
ภาพที่ 64 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากยางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนืดมูนีค่อนข้างต่ำ ยางจึงสามารถไหลภายในแม่พิมพ์อัดยางได้ดีและรวดเร็ว ทำให้เกิดการแพร่ข้ามระหว่างสายโซ่โมเลกุล (intermolecular diffusion) และการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุล (molecular entanglement) บริเวณหน้าสัมผัสที่สมบูรณ์ รวมถึง

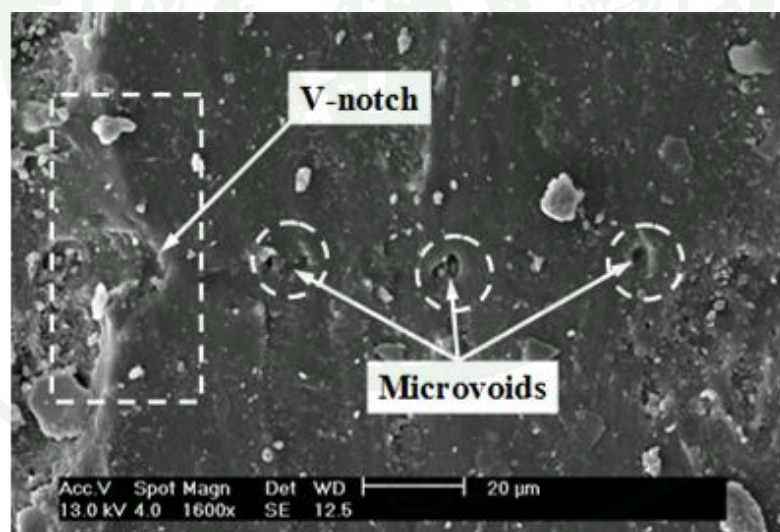
ความหนืดมุนีต่ำทำให้ร่องบากตัววี (V-notch) ที่ผิวชิ้นงานยางมีขนาดเล็ก จึงไม่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานลดลงมากนัก

2.2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณซิลิกาที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงในชิ้นงานยาง ดังแสดงในภาพที่ 65 พบว่า ที่ปริมาณการผสม 0 ถึง 30 phr ความแข็งแรงของชิ้นงานยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติในการเสริมแรงของซิลิกา อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาเป็น 45 และ 60 phr พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานยางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ปริมาณการผสมสูง ๆ ซิลิกาซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิว ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ยาก รวมทั้งสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสารตัวเติม (agglomeration of filler) ภายในเนื้อยาง (Hofmann, 1989; Donnet, 1998; Choi *et al.*, 2004; Teh *et al.*, 2004; Sae-oui *et al.*, 2007; Pasbakhsh *et al.*, 2009) และเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า ที่ปริมาณการผสมต่ำกว่า 30 phr ค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากที่ปริมาณดังกล่าวมีเนื้อยางธรรมชาติในปริมาณมาก ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีสมบัติการยึดติดกัน (tack property) ที่ดี (พงษ์ธร, 2550; วราภรณ์, 2552) และยังคงมีสมบัติความเป็นอีลาสติคค่อนข้างสูง ทำให้รอยประสานมีความแข็งแรงสูงเช่นเดียวกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาสูงขึ้นเป็น 45 phr และ 60 phr ความแข็งแรงรอยประสานลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติการยึดติดกันของยางคอมพาวนด์มีค่าลดลง รวมทั้งที่ปริมาณการผสมดังกล่าวยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูง (Seadan *et al.*, 2002) ทำให้เวลาที่ยางไหลมาประสานกันภายในแม่พิมพ์ช้ากว่ายางที่มีความหนืดต่ำ เวลาในการคงรูปที่บริเวณหน้าสัมผัสจึงลดลง ส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางที่ไม่สมบูรณ์และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่ดี รวมทั้งยางคอมพาวนด์ที่มีค่าความหนืดสูงนั้นทำให้ปรากฏร่องบากตัววีบนผิวชิ้นงานยางที่ชัดเจนมากขึ้น และมีอากาศตกค้างระหว่างหน้าสัมผัสของรอยประสาน ดังแสดงในภาพที่ 66 นอกจากนี้ที่บริเวณรอยประสานมีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตั้งฉากกับทิศทางการรับแรง (Ersoy and Nugay, 2003) (เกิดขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติก) ประกอบกับการผสมซิลิกาในปริมาณสูงทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติคของชิ้นงานยางลดลงอย่างมาก เหตุผลที่กล่าวข้างต้นทำให้ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าลดลง



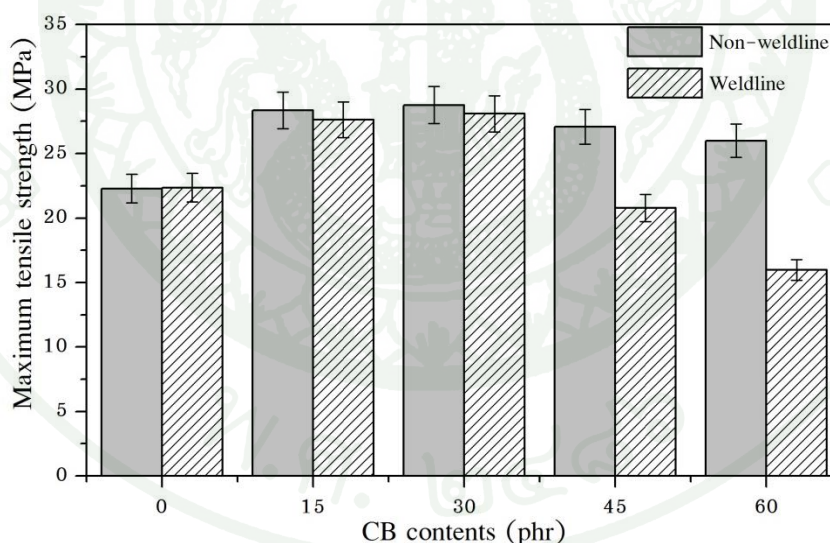
ภาพที่ 65 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผสมซิลิกาในปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 66 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยประสานที่แสดงให้เห็นร่องบากรูปตัววีและโพรงอากาศขนาดเล็ก

2.3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยาง ที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

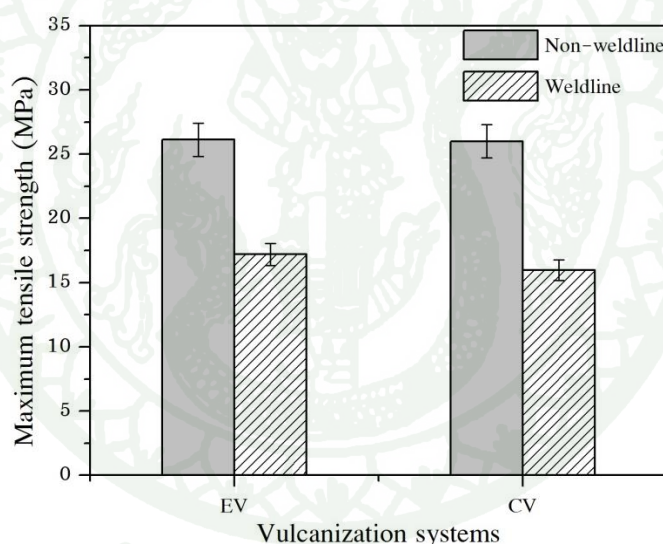
ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานยาง ดังแสดงในภาพที่ 67 พบว่า ชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นที่ปริมาณ 0 ถึง 30 phr เนื่องจากเขม่าดำที่ปริมาณดังกล่าวนี้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำเป็น 45 และ 60 phr ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้ว่าเขม่าดำเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง แต่เนื่องจากบดผสมเขม่าดำในปริมาณมากนั้น อาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเขม่าดำภายในเนื้อยางคอมพาวนด์ และเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสานที่ปริมาณการผสมเขม่าดำ 0 ถึง 30 phr พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงไม่แตกต่างจากชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากที่ปริมาณสารตัวเติมดังกล่าวยังคงมีเนื้อยางในปริมาณมาก ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีสมบัติการยึดติดที่ดี (Seadan *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำสูงขึ้นเป็น 45 และ 60 phr พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในชิ้นงานยางผสมซิลิกา



ภาพที่ 67 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน

2.4 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอย- ประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

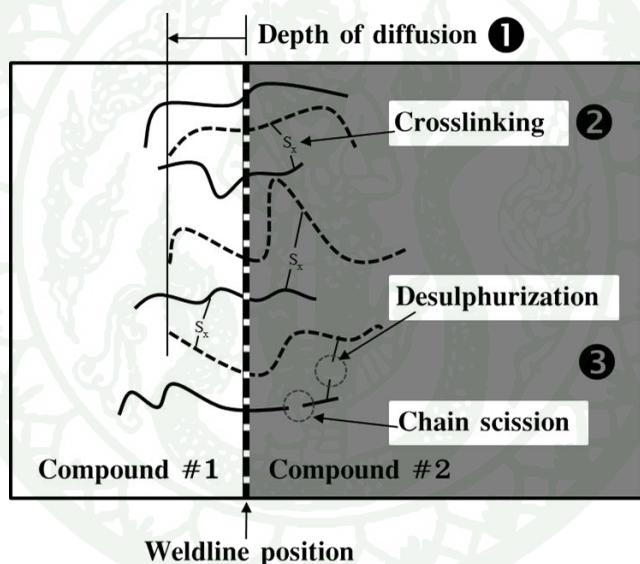
การศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสาน ได้ใช้ชิ้นงานยางผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr เนื่องจากการบดผสมเขม่าดำสามารถทำได้ง่ายกว่าการบดผสมซิลิกา และที่ปริมาณการบดผสมดังกล่าวสามารถสังเกตผลของความแข็งแรงรอยประสานได้ชัดเจน จากผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 68 พบว่า ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสาน พบว่า ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากสาเหตุดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



ภาพที่ 68 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน
เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

เมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสานซึ่งใช้ระบบการคงรูปแบบที่แตกต่างกัน พบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีค่าความแข็งแรงรอยประสานต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ทั้งนี้สามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองสภาวะ ดังแสดงในภาพที่ 69 กล่าวคือ ในขณะที่ยางไหลมาสัมผัสกันภายในแม่พิมพ์ 1) เกิดการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (molecular diffusion) 2) การเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล (crosslinking) ที่แพร่ข้าม และ 3) เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ซึ่งได้แก่ การตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission)

และการสลายตัวของพันธะกำมะถัน (desulphurization) โดยยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปทั้งสองแบบใช้เงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน ดังนั้นสาเหตุของความแข็งแรงรอยประสานที่แตกต่างกัน มาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพันธะกำมะถัน ซึ่งในกรณีของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ที่มีพันธะเชื่อมขวางระหว่างกำมะถันและกำมะถัน (S-S) มีพลังงานพันธะที่ต่ำกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถัน (C-S) (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989; Rooj *et al.*, 2011) ส่งผลให้พันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยประสานของยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีโอกาสเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และนอกจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีสาเหตุมาจากเวลาเริ่มคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV สั้นกว่ายางคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการสัมผัสกันภายในแม่พิมพ์

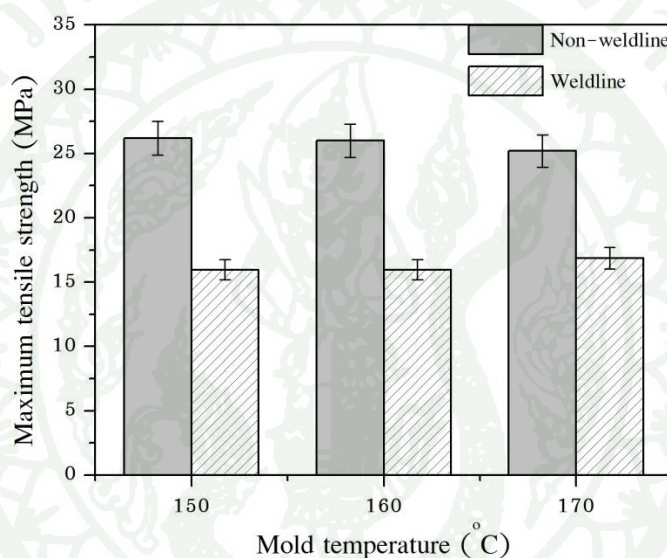


ภาพที่ 69 แบบจำลองแสดงสภาวะที่เกิดขึ้น ณ บริเวณรอยประสาน

2.5 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

ภาพที่ 70 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางธรรมชาติที่มีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงสายโซ่โมเลกุลเกิดการตัดขาดออกจากกันได้ง่าย นอกจากนี้ระบบการคงรูปที่ใช้เป็นแบบ CV ซึ่งพันธะ

ระหว่างสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (poly-sulphedric) ซึ่งไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง จึงเกิดการสลายตัวของกัมมะถันที่เชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล และหากพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสานเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานยางลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ซึ่งมีสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบผลต่างของค่าความต้านทานต่อแรงดึงระหว่างชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ผลต่างของค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแพร่ข้ามผ่านหน้าสัมผัสได้ดี ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปสั้นลงและชิ้นงานยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

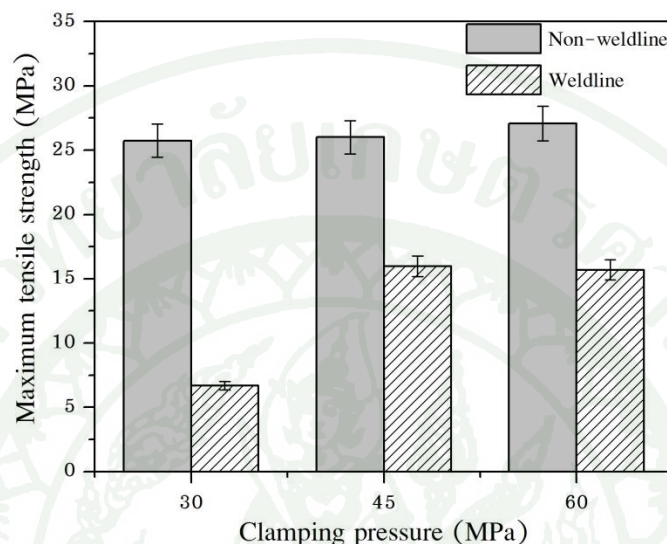


ภาพที่ 70 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน

2.6 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการคงรูปเท่ากับ 30 MPa 45 MPa และ 60 MPa ดังแสดงในภาพที่ 71 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันใช้เพียงพอสำหรับการอัดขึ้นรูปยางคอมพาวนด์ให้สามารถไหลได้เต็มแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสานที่ความดันคงรูป 30 MPa พบว่า มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานอย่างชัดเจน เนื่องจากแรงดันที่ใช้คงรูปมีค่าต่ำทำให้บริเวณหน้าสัมผัสที่ประสานกันภายในแม่พิมพ์เกิดการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลได้ไม่ดี และมีอากาศตกค้างที่บริเวณผิวสัมผัส รวมทั้ง

การใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่ำ ทำให้ปรากฏร่องบากตัววีชัดเจนที่บริเวณผิวชิ้นงาน เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นบริเวณรอยประสานซึ่งเมื่อชิ้นงานยางได้รับแรงดึง นอกจากนี้ การใช้แรงดันต่ำทำให้ยางคอมพาวนด์ไหลภายในแม่พิมพ์ช้าลง เวลาการสัมผัสกันบริเวณหน้าสัมผัสสั้นกว่าที่แรงดันปิดแม่พิมพ์สูง



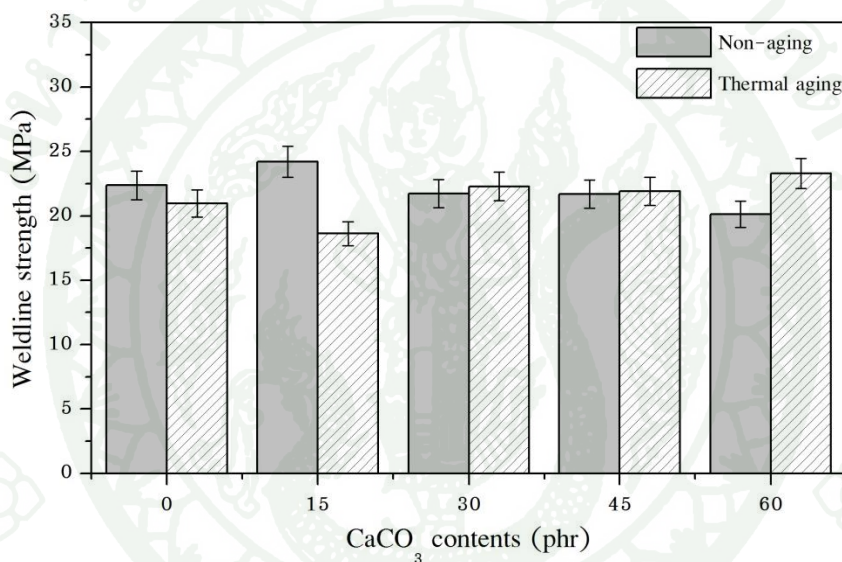
ภาพที่ 71 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

หากพิจารณาใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์เท่ากับ 45 MPa อากาศที่บริเวณร่องบากตัววี (ซึ่งเป็นส่วนที่อากาศไม่สามารถขับออกได้) เกิดการอัดตัวเนื่องจากแรงดันที่สูงขึ้น ทำให้ร่องบากตัววีมีขนาดเล็กลงและมีอากาศตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัสลดลง รวมถึงการใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์สูง ทำให้เกิดการแพร่ข้ามและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์เท่ากับ 60 MPa พบว่า มีค่าความแข็งแรงรอยประสานไม่แตกต่างจากชิ้นงานยางที่ใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์เท่ากับ 45 MPa เนื่องจากร่องบากตัววีมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้คาดว่ามีสาเหตุมาจาก เป็นขีดจำกัดของอากาศที่สามารถอัดตัวได้ที่บริเวณรอยประสาน

2.7 อิทธิพลจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

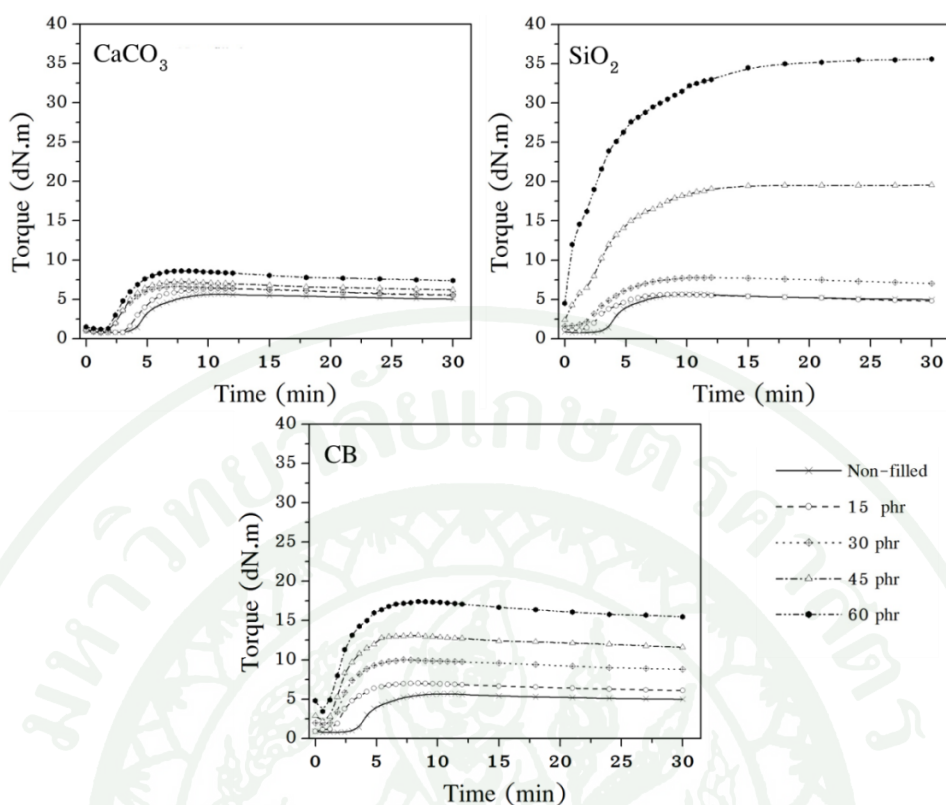
ผลการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ของชิ้นงานยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในภาพที่ 72 พบว่า ชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม และชิ้นงานยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 15 phr เมื่อผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทำให้ความ

แข็งแรงรอยประสานมีค่าลดลง เนื่องจากชิ้นงานยางมีเนื้ออย่างธรรมชาติปริมาณสูง ซึ่งมีโอกาสเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการบ่มเร่ง โดยเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล รวมถึงระบบการคงรูปที่ใช้เป็นระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งมีโอกาสเกิดการสลายตัวของพันธะกำมะถัน (พงษ์ธร, 2550) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสาน พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการนำความร้อนและมีการกระจายความร้อนที่ต่ำ ทำให้ยางไม่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ MDR ที่แสดงให้เห็นว่ายางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดปรากฏการณ์ Reversion เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 73

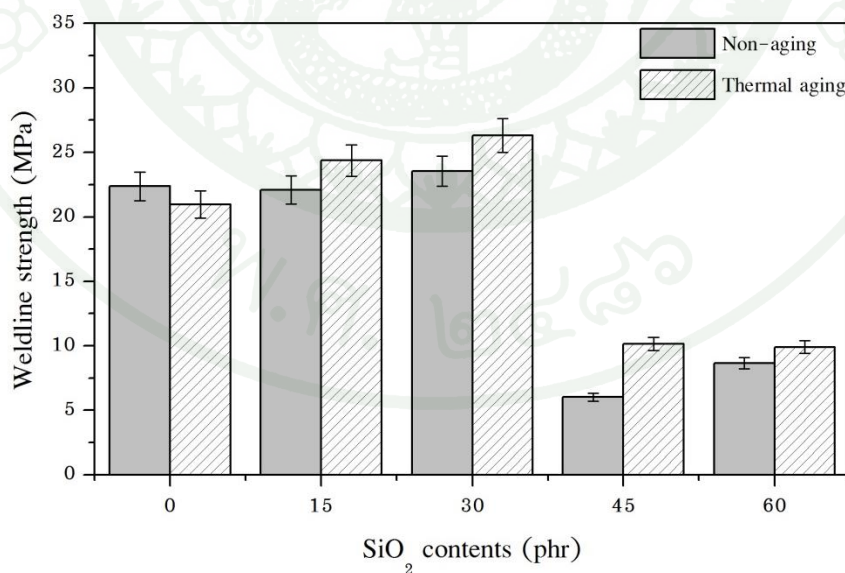


ภาพที่ 72 ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน

ผลการศึกษาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสมซิลิกาทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 74 พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าเพิ่มขึ้น ภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งและสารกระตุ้นไวท์ผิว ทำให้กำมะถันสามารถเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลยางได้น้อยลง เป็นผลให้มีกำมะถันหลงเหลือภายในระบบค่อนข้างมาก ประกอบกับยางธรรมชาติมีปริมาณพันธะคู่สูง (พงษ์ธร, 2547) ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานยางไปบ่มเร่งด้วยความร้อน ส่งผลให้บริเวณรอยประสานเกิดการเชื่อมขวางต่อเนื่อง (post cured) โดยสามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบ MDR ของยางผสมซิลิกามีแนวโน้มเกิดปรากฏการณ์ Marching (ดังแสดงในภาพที่ 73)

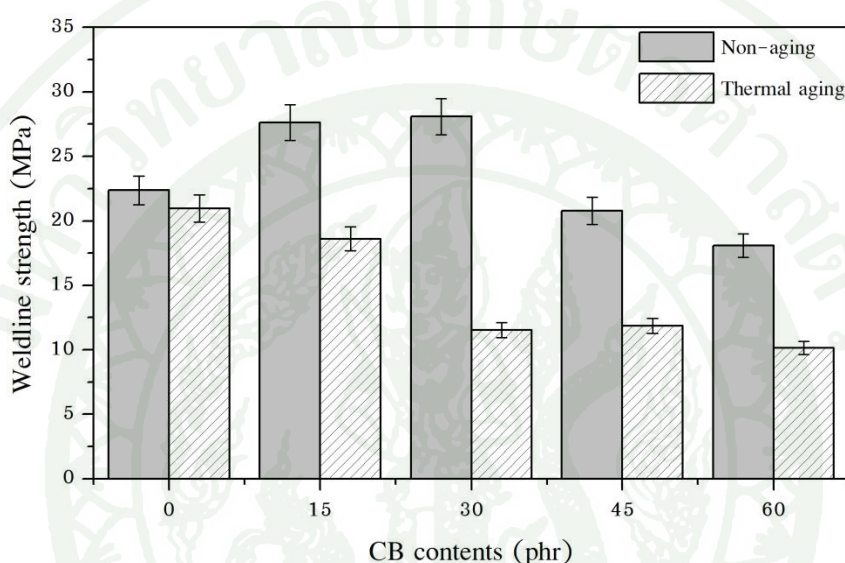


ภาพที่ 73 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง MDR ของยางคอมพาวด์เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน และใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 150°C



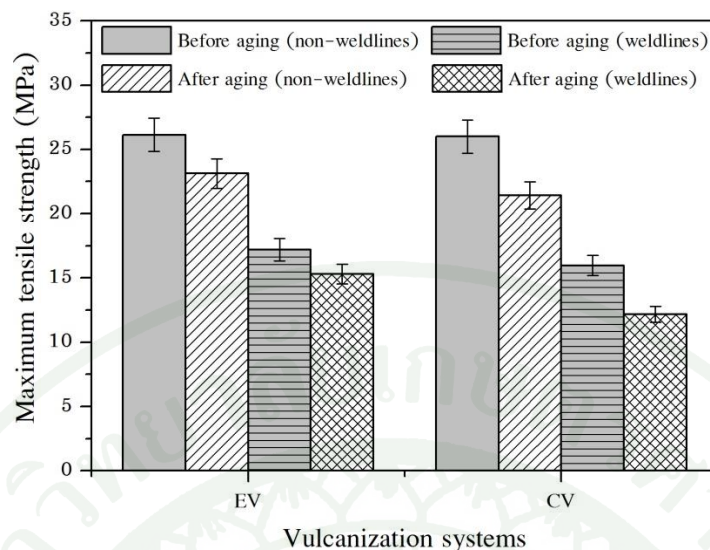
ภาพที่ 74 ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 75 พบว่า ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยร้อน ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของยางธรรมชาติที่ไม่ทนต่อความร้อน รวมทั้งปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถนำความร้อนและแพร่กระจายความร้อนได้ดี ส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โดยสามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบ MDR ที่แสดงให้เห็นการเกิดปรากฏการณ์ Reversion อย่างชัดเจน (ดังแสดงในภาพที่ 73)



ภาพที่ 75 ความแข็งแรงรอยประสานก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน

ภาพที่ 76 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีแนวโน้มลดลงมากกว่าชิ้นงานที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานยางที่มีรอยประสานซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิก (polysulphidic) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยเกิดการตัดขาดสายโซ่โมเลกุลยาง รวมถึงการสลายตัวของพันธะกำมะถัน (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989)

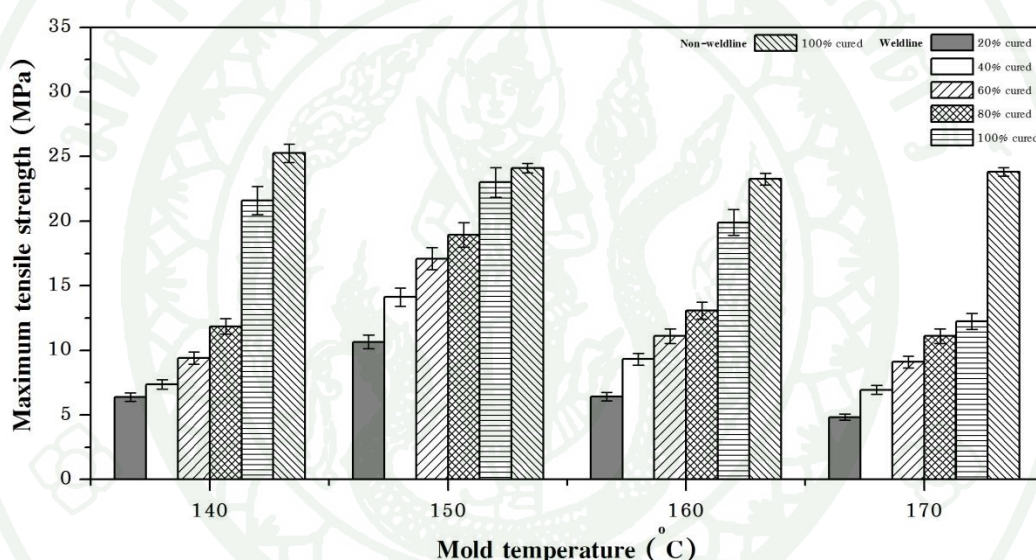


ภาพที่ 76 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดก่อนและภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

2.8 อิทธิพลของระดับการคงรูปและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

ในการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปและอุณหภูมิแม่พิมพ์ ได้ใช้ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr ดังแสดงในภาพที่ 77 ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น มีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2 ถึง 2.3 นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระดับการคงรูปเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางและกำมะถันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูปที่เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานยางมีสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ดีขึ้น (Sezna and DiMauro, 1984; Deng and Isayev, 1991; Gent, 2001; Nichetti, 2004) และหากพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่า ค่าความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 140°C เป็น 150°C ในขณะที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 150°C ถึง 170°C ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า กลไกการประสานที่บริเวณหน้าสัมผัสในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปยาง (ดังแสดงในภาพที่ 68) มี 3 กระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ การแพร่ข้าม การเชื่อมขวาง และการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ดังที่ได้

กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4 ซึ่งความลึกของการแพร่ข้าม (depth of diffusion) ปริมาณการเชื่อมขวาง และปริมาณการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคงรูป โดยอิทธิพลจากความลึกของการแพร่ข้าม และปริมาณการเชื่อมขวางที่บริเวณหน้าสัมผัส ทำให้รอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ทำให้ความแข็งแรงรอยประสานลดลง โดยอุณหภูมิในช่วง 140°C ถึง 150°C ซึ่งชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้น มีสาเหตุมาจากอิทธิพลของความลึกการแพร่ข้ามและปริมาณการเชื่อมขวางมีอิทธิพลที่เหนือกว่าอิทธิพลจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 150°C ถึง 170°C ที่บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนซึ่งมีอิทธิพลเหนือกว่าความลึกการแพร่ข้ามและปริมาณการเชื่อมขวาง โดยเกิดการขาดกันของสายโซ่โมเลกุล และการสลายตัวของพันธะกำมะถัน



ภาพที่ 77 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้ระดับการคงรูปต่าง ๆ กัน

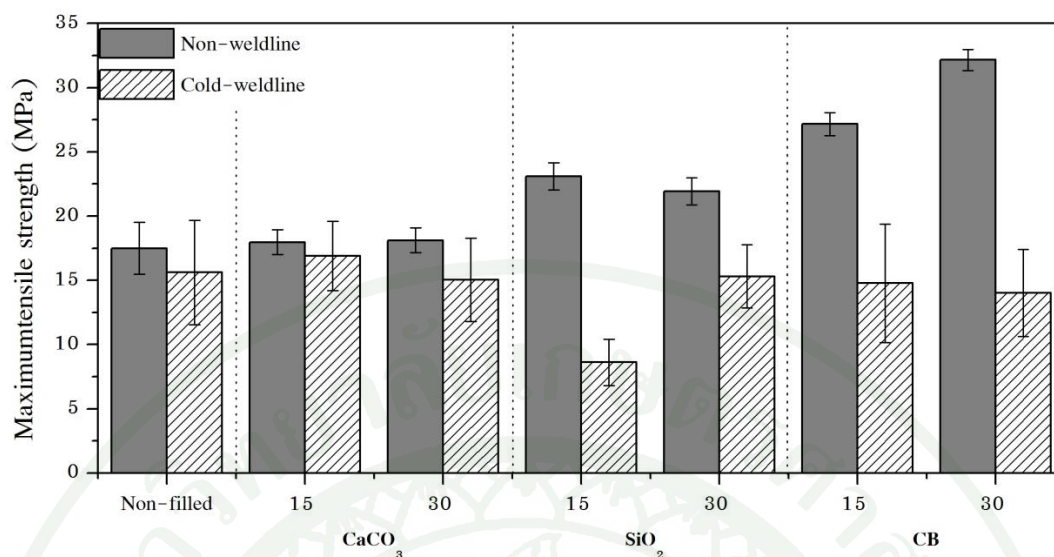
3. ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานยางทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปต้องใช้ยางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดมูนนี้ต่ำกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป เนื่องจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้น ยางคอมพาวนด์ต้องไหลผ่านส่วนประกอบของแม่พิมพ์ ที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็ก (สปรู ทางวิ่งทางเข้า และเข้าสู่แม่พิมพ์) ส่วนใหญ่แล้วยางคอมพาวนด์ต้องใช้ระยะทางการไหลมากกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป โดยเครื่องฉีดขึ้นรูปยางปกติสามารถฉีดยางได้ที่ความหนืดมูนนี้ประมาณ

60 ML1+4(100°C) ดังนั้นในส่วนนี้จึงได้ใช้ยางคอมพาวด์ที่ผสมสารตัวเติม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในระดับ 0 ถึง 30 phr (พิจารณาจากความหนืดมูนีของยางคอมพาวด์ที่ผสมซิลิกา 30 phr ซึ่งมีค่าความหนืดมูนีสูงที่สุด) และนอกจากนี้แม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่มีรอยประสานได้ 2 ลักษณะ คือ รอยประสานแบบเย็น และรอยประสานแบบร้อน (ดังแสดงในภาพที่ 39) ซึ่งชิ้นงานยางที่มีรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูปนั้นเป็นรอยประสานแบบเย็นทั้งหมด อย่างไรก็ตามในส่วนของการฉีดขึ้นรูปหัวข้อที่ 3 นี้ ใช้คำว่ารอยประสานแบบเย็นและแบบร้อน เนื่องจากการเปรียบเทียบความแข็งแรงรอยประสานทั้ง 2 แบบ

3.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

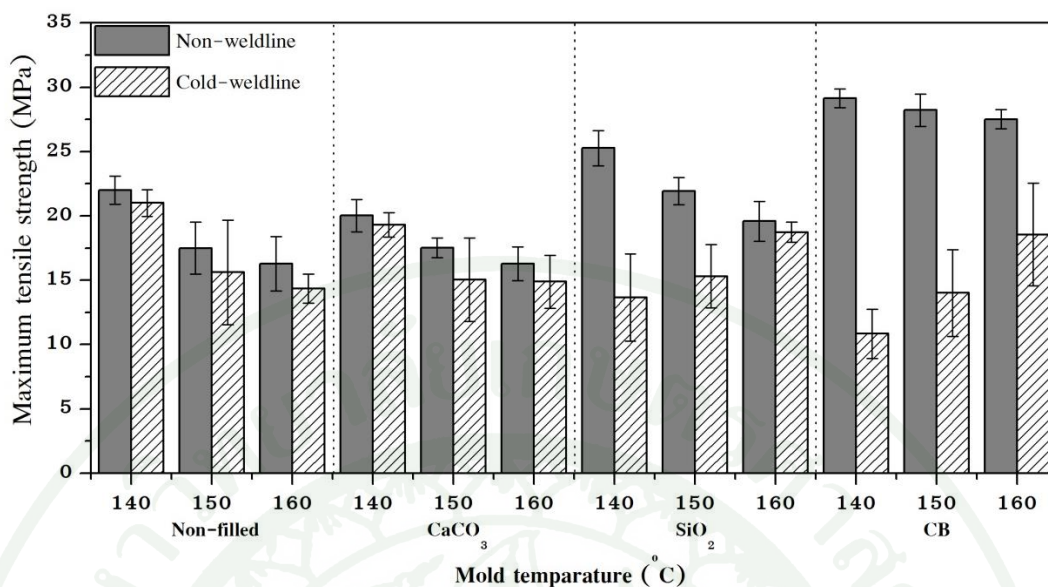
จากภาพที่ 78 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในยางคอมพาวด์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานแบบเย็น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989) และเมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็น พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากความหนืดของยางคอมพาวด์ไม่สูงมาก ยางคอมพาวด์จึงสามารถไหลภายในแม่พิมพ์ได้ดี ถึงแม้ว่ามีระยะทางการไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดมากก็ตาม (ระยะทางการไหลมากกว่าการไหลภายในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป) เมื่อพิจารณาชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ดังสาเหตุที่กล่าวไปแล้วในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (หัวข้อที่ 2.2 และ 2.3) ในขณะที่ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็นมีค่าต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยในกรณีของชิ้นงานยางที่ผสมซิลิกา พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณการผสมซิลิกาเท่ากับ 15 phr ถึง 30 phr ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้เวลาในการคงรูปเพิ่มสูงขึ้น ยางที่ไหลมาประสานไม่เกิดการคงรูปก่อนการสัมผัสกัน และใช้เวลาสัมผัสกันภายในแม่พิมพ์ที่ยาวนานขึ้น สำหรับกรณีของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณการผสมเขม่าดำ ทำให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากเวลาเริ่มคงรูปสั้นลงตามปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 78 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในปริมาณต่าง ๆ กัน

3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

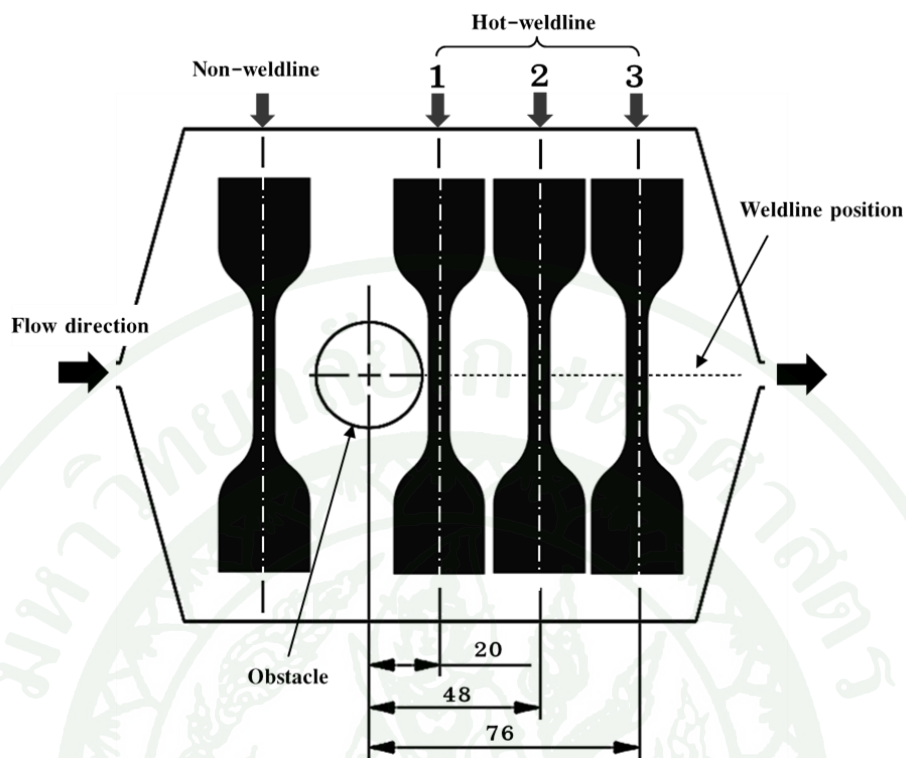
ภาพที่ 79 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางธรรมชาติที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV (Blow and Hepburn, 1982; Hofmann, 1989) และเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีรอยประสานผสมซิลิกา พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาใช้เวลาคงรูปที่สูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำ รวมทั้งการเกิดปรากฏการณ์ Marching (ดังแสดงในภาพที่ 73) ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์ไม่เกิดการคงรูปบางส่วนก่อนการสัมผัสกันสำหรับชิ้นงานยางผสมเขม่าดำนั้น พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีค่าความแข็งแรงรอยประสานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นงานยางผสมซิลิกา โดยมีสาเหตุมาจากสมบัติของเขม่าดำที่สามารถนำความร้อนและแพร่กระจายความร้อนได้ดี ส่งผลให้ที่บริเวณรอยมีประสานมีการเชื่อมขวางที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์



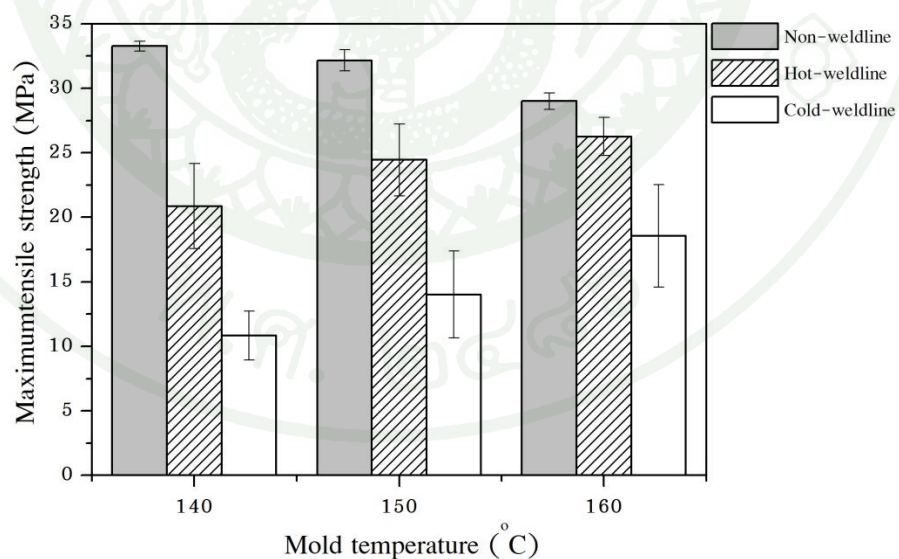
ภาพที่ 79 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน

3.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานแบบร้อนและรอยประสานแบบเย็น

ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานแบบเย็นและแบบร้อนในตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 80 โดยใช้ยางคอมพาวนด์ที่ผสมเข้ามาดำในปริมาณ 30 phr และได้เปรียบเทียบกับความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่ตำแหน่งหน้าสิ่งกีดขวาง ซึ่งเป็นชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 81 พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งรอยประสานแบบเย็นและรอยประสานแบบร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความถี่การแพร่ข้ามระหว่างหน้าสัมผัสและปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาความแข็งแรงรอยประสาน พบว่า ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อนมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็น ซึ่งมีสาเหตุมาจากชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็นปรากฏร่องบากตัววีนผิวชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อนไม่ปรากฏร่องบากตัววีนผิวชิ้นงาน นอกจากนี้รอยประสานแบบเย็นมีโอกาสดที่เกิดอากาศตกค้างระหว่างผิวสัมผัสได้มากกว่าชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อน



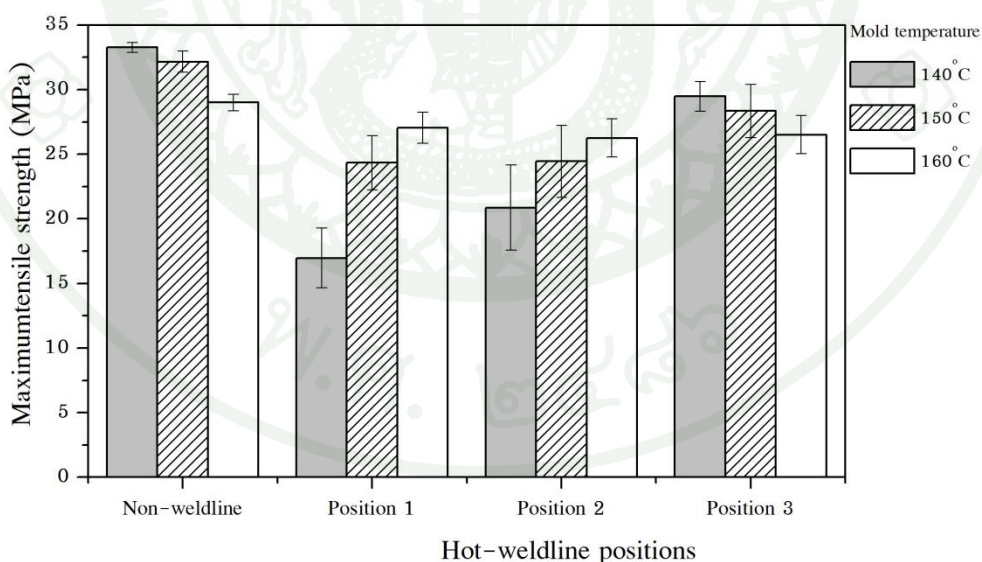
ภาพที่ 80 ตำแหน่งของชิ้นงานยางทดสอบเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง



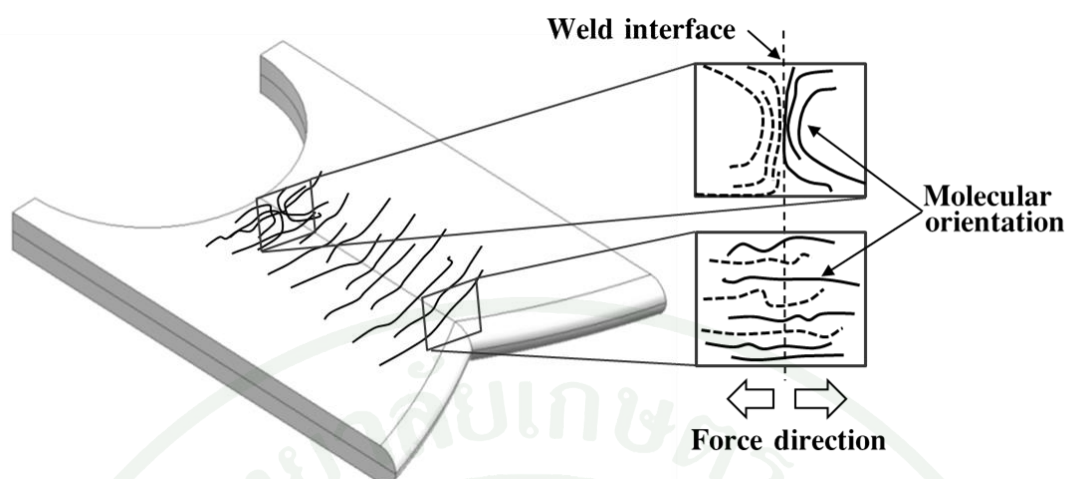
ภาพที่ 81 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็นและแบบร้อนเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

3.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานแบบร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ หลังสิ่งกีดขวาง

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงสูงสุดของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ 30 phr ณ ตำแหน่ง ๆ หลังสิ่งกีดขวาง ดังแสดงในภาพที่ 82 พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าต่ำที่ตำแหน่งใกล้กับสิ่งกีดขวาง และความแข็งแรงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อระยะห่างจากสิ่งกีดขวางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 140 และ 150°C ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ตำแหน่งใกล้กับสิ่งกีดขวาง (ตำแหน่งที่ 1) มีลักษณะที่ตั้งฉากกับทิศทางการรับแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 83 ในขณะที่ตำแหน่งห่างจากสิ่งกีดขวาง (พิจารณาตำแหน่งที่ 2 และ 3) สายโซ่โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันอีกครั้ง (recombination of molecular chain) (Fisa and Rahmani, 1991; Yamada *et al.*, 2005) และจัดเรียงตัวขนานกับทิศทางการรับแรงดึงในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 83 และพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ตำแหน่ง 2 และ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงเกิดการแพร่ข้ามผ่านผิวสัมผัสได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 160°C ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางในตำแหน่งที่ 3 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน



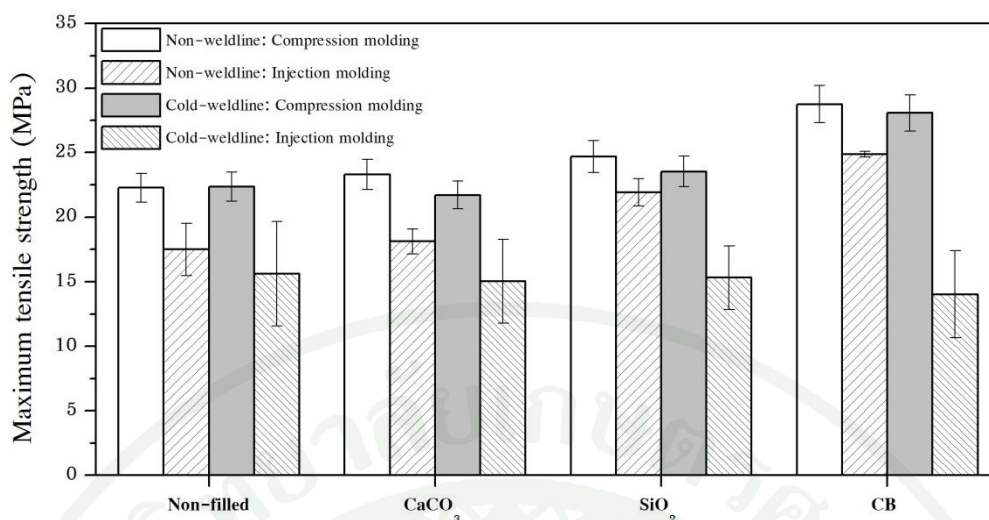
ภาพที่ 82 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 83 การจัดเรียงตัวของสายโพลิอิมิดที่ตำแหน่งต่างๆ หลังสิ่งกีดขวาง

3.5 ผลการเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ภาพที่ 84 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมและผสมสารตัวเติมในปริมาณ 30 phr จากผลการทดสอบพบว่า ชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดมีระยะการไหลมากกว่าแม่พิมพ์อัด ทำให้ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลเกิดการสะสมความร้อน จากความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวแม่พิมพ์และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งยางคอมพาวนด์มีโอกาสเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า ชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดมีความแข็งแรงรอยประสานต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น ทำให้ขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลภายในแม่พิมพ์เกิดการคงรูปบางส่วนที่ผิวหน้าการไหลก่อนการสัมผัสกัน โดยผลกระทบนี้ปรากฏชัดเจนมากขึ้นในกรณีชิ้นงานยางผสมเซมาดำ ซึ่งมีสาเหตุมาจากเซมาดำมีค่าการนำความร้อนสูง ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่สูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา



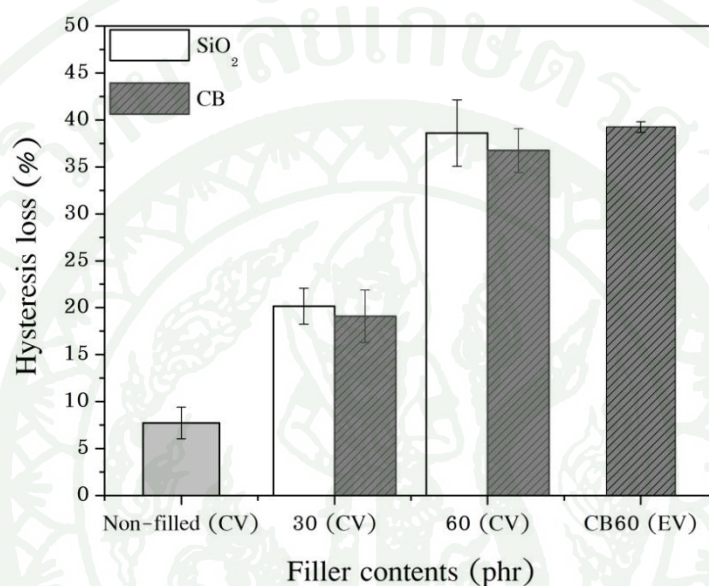
ภาพที่ 84 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมในปริมาณ 30 phr เมื่อผ่านกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูป

4. ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุความล้าในชิ้นงานยางเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

4.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่ออายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน

การทดสอบอายุความล้าของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกาและเขม่าดำ ซึ่งจากผลการทดสอบอายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม พบว่า ชิ้นงานยางไม่เกิดความเสียหาย ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย และเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายใน (internal friction) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมาก (Robert, 1988; Bauman, 2008) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก ค่าฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ในภาพที่ 85 (ฮิสเทอรีซิส คือ ความแตกต่างของพลังงานที่วัสดุดูดซับไว้ในขณะที่ยืดตัวและพลังงานที่ปลดปล่อยในขณะที่วัสดุคืนตัว ซึ่งสามารถวัดได้โดยการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์) ดังนั้นจึงนำเสนอผลการทดสอบความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำในปริมาณ 30 และ 60 phr ดังแสดงในภาพที่ 86 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการบดผสมซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสารตัวเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตัวเติมประเภทเสริมแรง สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้มีค่าฮิสเทอรีซิสสูง ดังแสดงในภาพที่ 84 ซึ่งเมื่อชิ้นงานยางได้รับแรงดึงในขณะทดสอบความล้า ค่าฮิสเทอรีซิส (พลังงานที่ชิ้นงานยางดูดซับไว้) เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งเมื่อรับภาระกระทำซ้ำ ๆ เป็นระยะเวลา

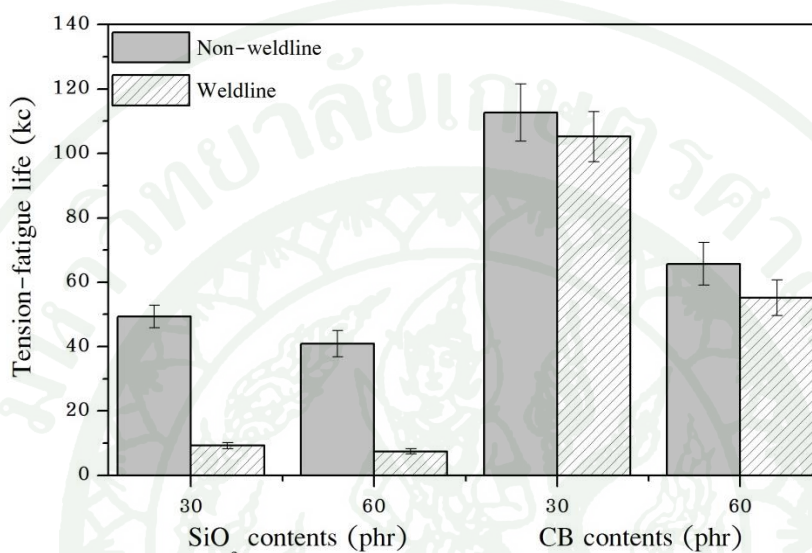
นาน จะเกิดเป็นความร้อนสะสมภายใน (heat build-up) ส่งผลให้ชิ้นงานยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Robert, 1988) นอกจากนี้รอยแตกขนาดเล็กของชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่ายางที่ไม่ผสมสารตัวเติม เนื่องจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่มีความเป็นอีลาสติกสูงกับสารตัวเติมที่เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (มีความยืดหยุ่นต่ำมาก) โดยเมื่อได้รับความเค้น รอยแตกขนาดเล็กสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายที่บริเวณดังกล่าว (Ismail *et al.*, 1999; Mars and Fatemi, 2002)



ภาพที่ 85 การสูญเสียฮิสเตอร์ิซิสของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำ

เมื่อเปรียบเทียบอายุความล้าของชิ้นงานยางผสมเขม่าดำและซิลิกา แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางผสมซิลิกามีอายุความล้าที่ต่ำกว่าชิ้นงานยางผสมเขม่าดำมาก คำอธิบายนี้คล้ายคลึงกันกับคำอธิบายในกรณีของชิ้นงานยางผสมซิลิกาที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง คือ บริเวณผิวซิลิกามีพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรง ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันสูงและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนภายในชิ้นงานยาง ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมลดลง (Ismail *et al.*, 1999) และในกรณีของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า มีอายุความล้าแบบดึงยืดต่ำกว่าชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ซึ่งมีคำอธิบายเช่นเดียวกับชิ้นงานยางที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ ที่บริเวณรอยประสานมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยางในขณะทดสอบอายุความล้า และมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ และนอกจากนี้ที่บริเวณผิวของรอยประสานปรากฏเป็นร่องบากตัววี ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความเค้นหนาแน่นและเกิดการขยายตัวของรอยแตกจากบริเวณดังกล่าวได้ง่าย และเมื่อพิจารณาอายุความล้าที่ลดลงระหว่างชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสาน พบว่า ชิ้นงานยางที่

ผสมซิลิกาที่มีค่าลดลงอย่างมากที่ปริมาณการผสม 60 phr โดยลดลงประมาณ 80% (พิจารณาจากภาพที่ 86) เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากค่าความหนืดของยางคอมพาวด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการสัมผัสกันลดลง เป็นสาเหตุให้เกิดการประสานกันที่ไม่สมบูรณ์ และการเพิ่มปริมาณซิลิกายังทำให้ชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกได้อย่างรวดเร็ว

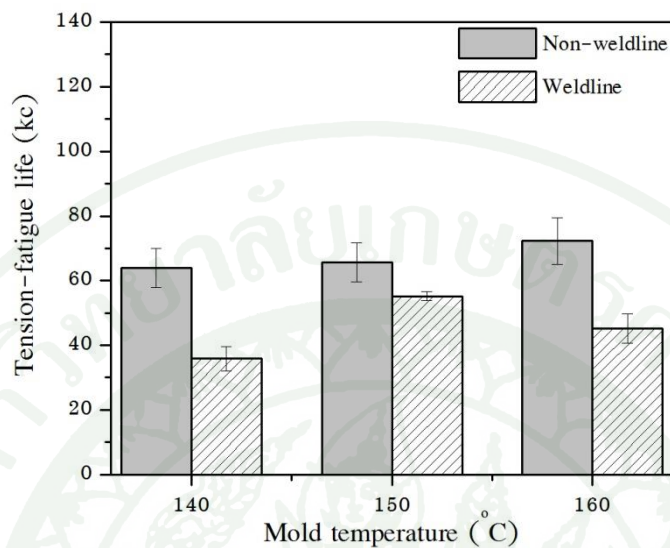


ภาพที่ 86 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาและเขม่าดำ

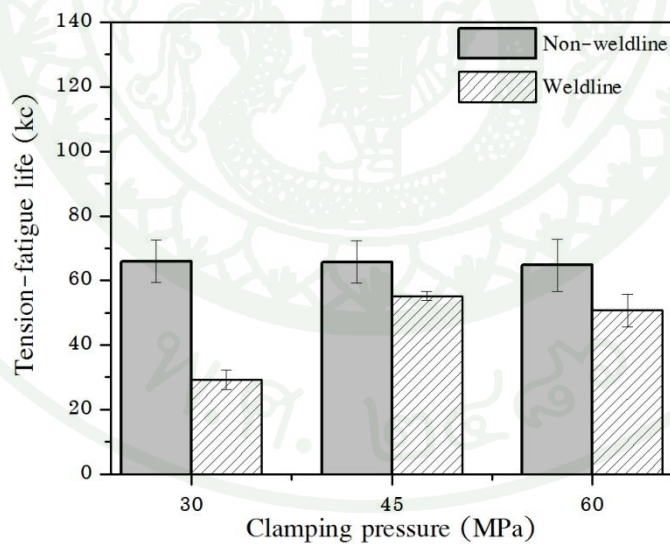
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่ออายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่มีและไม่มีรอยประสาน

ภาพที่ 87 และ 88 แสดงอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการผลิตที่มีต่ออายุความล้าของชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน ในขณะที่ผลการทดสอบชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วง 140°C ถึง 150°C ทำให้มีอายุความล้าเพิ่มขึ้นประมาณ 60% และการเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ในช่วง 30 MPa ถึง 45 MPa ทำให้ชิ้นงานยางมีอายุความล้าเพิ่มขึ้นถึง 100% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์และแรงดันปิดแม่พิมพ์สูง ทำให้เกิดการแพร่ข้ามและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่ดีขึ้น รวมถึงร่องบากตัวเว็บชิ้นงานยางมีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วง 150°C ถึง 160°C และแรงดันปิดแม่พิมพ์ในช่วง 45 MPa ถึง 60 MPa ไม่ส่งผลต่ออายุความล้า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากที่อุณหภูมิสูงยางคอมพาวด์อาจเกิดการ

เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และในกรณีของการใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์สูงทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถอัดตัวได้ (compressibility)



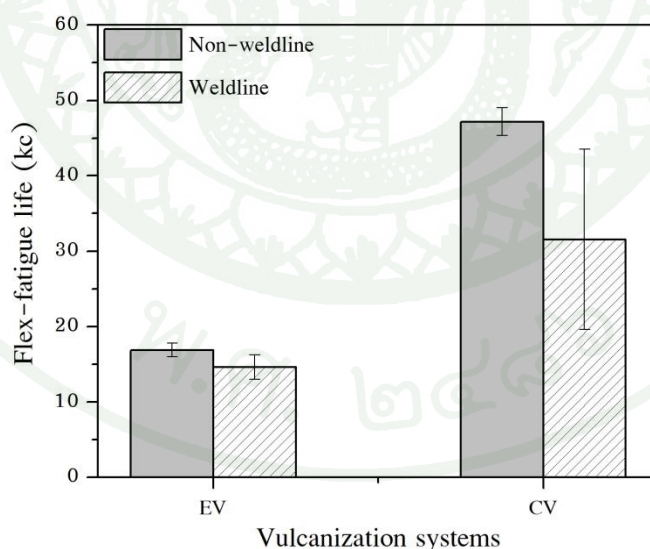
ภาพที่ 87 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน



ภาพที่ 88 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

4.3 อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่ออายุความล้าแบบหักงอของในชิ้นงานยางทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

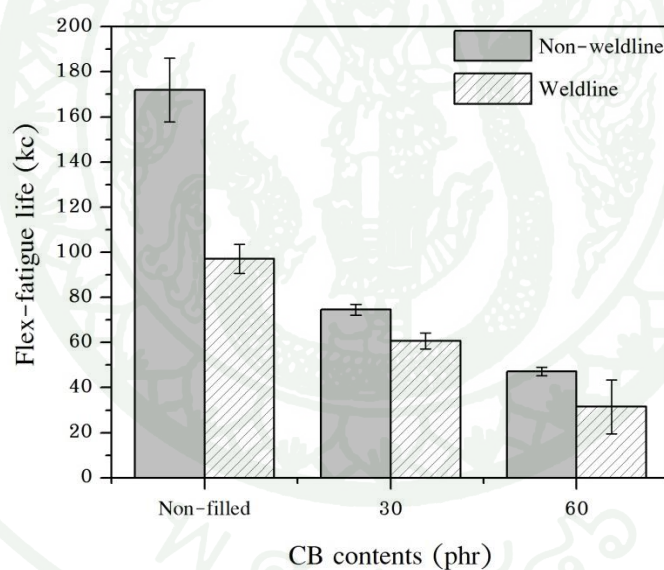
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอายุความล้าแบบหักงอ ตามมาตรฐาน ASTM D430 ของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 89 พบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีอายุความล้าสูงกว่าชิ้นงานยางที่ผ่านระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งมีสาเหตุมาจากพันธะเชื่อมขวางภายในชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งมีความยาวของพันธะเชื่อมขวางมากกว่าพันธะเชื่อมขวางของชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นแบบโมโนหรือไดซัลฟิดิก (mono-di sulfedic) ดังนั้นเมื่อได้รับการกระแทกสลับชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV สามารถถ่ายเทพลังงานผ่านพันธะเชื่อมขวางที่มีความยาวมากกว่าได้ดี (สามารถพิจารณาได้จากค่าฮีสเตอร์ซิสในภาพที่ 85) และเมื่อพิจารณาอายุความล้าที่แตกต่างกันระหว่างชิ้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสาน พบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีอายุความล้าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่อายุความล้าของชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีระยะเวลาเริ่มคงรูปที่สั้นกว่าชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV เป็นสาเหตุให้ยางคอมพาวด์ที่ไหลมาประสานกันอาจเกิดการคงรูปก่อนการสัมผัสกัน ซึ่งส่งผลให้อายุความล้าแตกต่างจากชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสานกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 89 อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

4.4 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่ออายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางทั้งที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

จากผลการศึกษาอายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 90 พบว่า ชิ้นงานยางไม่ผสมสารตัวเติมที่ไม่มีรอยประสาน มีอายุความล้าแบบหักงอสูงที่สุด ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.1 และหากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ พบว่า อายุความล้าแบบหักงอลดลงตามปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานยางที่เพิ่มปริมาณการผสมสารตัวเติม มีโอกาสเกิดรอยแตกขนาดเล็กที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารตัวเติมและยางมากขึ้น (Ismail *et al.*, 1999; Mars and Fatemi, 2002) นอกจากนี้ชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรงมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นสูงในขณะรับแรงดึง เนื่องจากแรงเสียดทานภายในยางที่เพิ่มขึ้น (สอดคล้องกับค่าการสูญเสียฮีสเทอรีซิสในภาพที่ 88) รวมถึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อยางในขณะทดสอบและเกิดการขยายตัวของรอยแตกอย่างรวดเร็ว

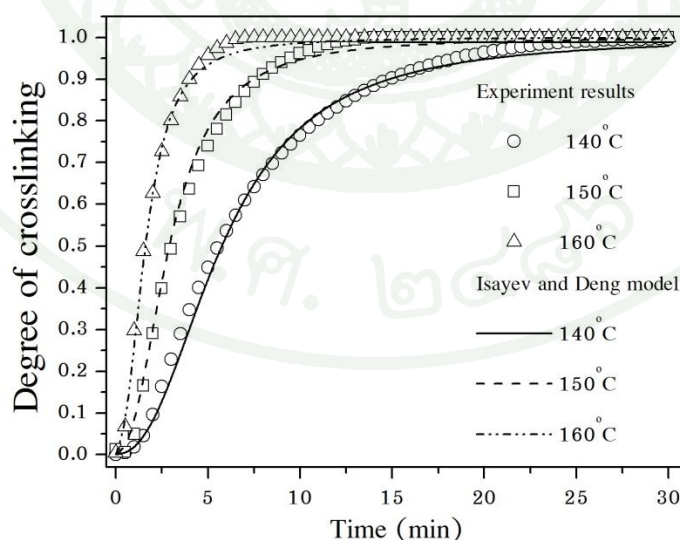


ภาพที่ 90 อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

5. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

5.1 การพัฒนาแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชั้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของชั้นงานยางที่มีและไม่มีรอยประสานในหัวข้อที่ 2.8 ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่รายงานว่า สมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของชั้นงานยางเพิ่มขึ้นตามระดับการคงรูป (Sezna and DiMauro, 1984; Deng and Isayev, 1991; Gent, 2001; Nichetti, 2004) งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายความแข็งแรงรอยประสาน โดยพัฒนามาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูปที่พัฒนาขึ้นโดย Isayev and Deng (1988) ซึ่งขึ้นอยู่กับ 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาที่ใช้ในการคงรูป โดยใช้ร่วมกับข้อมูลจากผลทดสอบความแข็งแรงรอยประสานของชั้นงานยางผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ไม่ผ่านการคงรูป (0% cure) และคงรูปเต็มที่ (100% cure) สำหรับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชั้นงานยางอัดขึ้นรูป เริ่มต้นโดยการนำผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง MDR ที่ใช้อุณหภูมิการคงรูปเท่ากับ 140°C 150°C และ 160°C นำไปคำนวณระดับการคงรูปด้วยสมการที่ 46 แล้วนำข้อมูลมาพล็อตกราฟเวลาและระดับการคงรูป ดังแสดงในภาพที่ 91 จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n และ $K(t)$ ในสมการที่ 13 และ 12 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

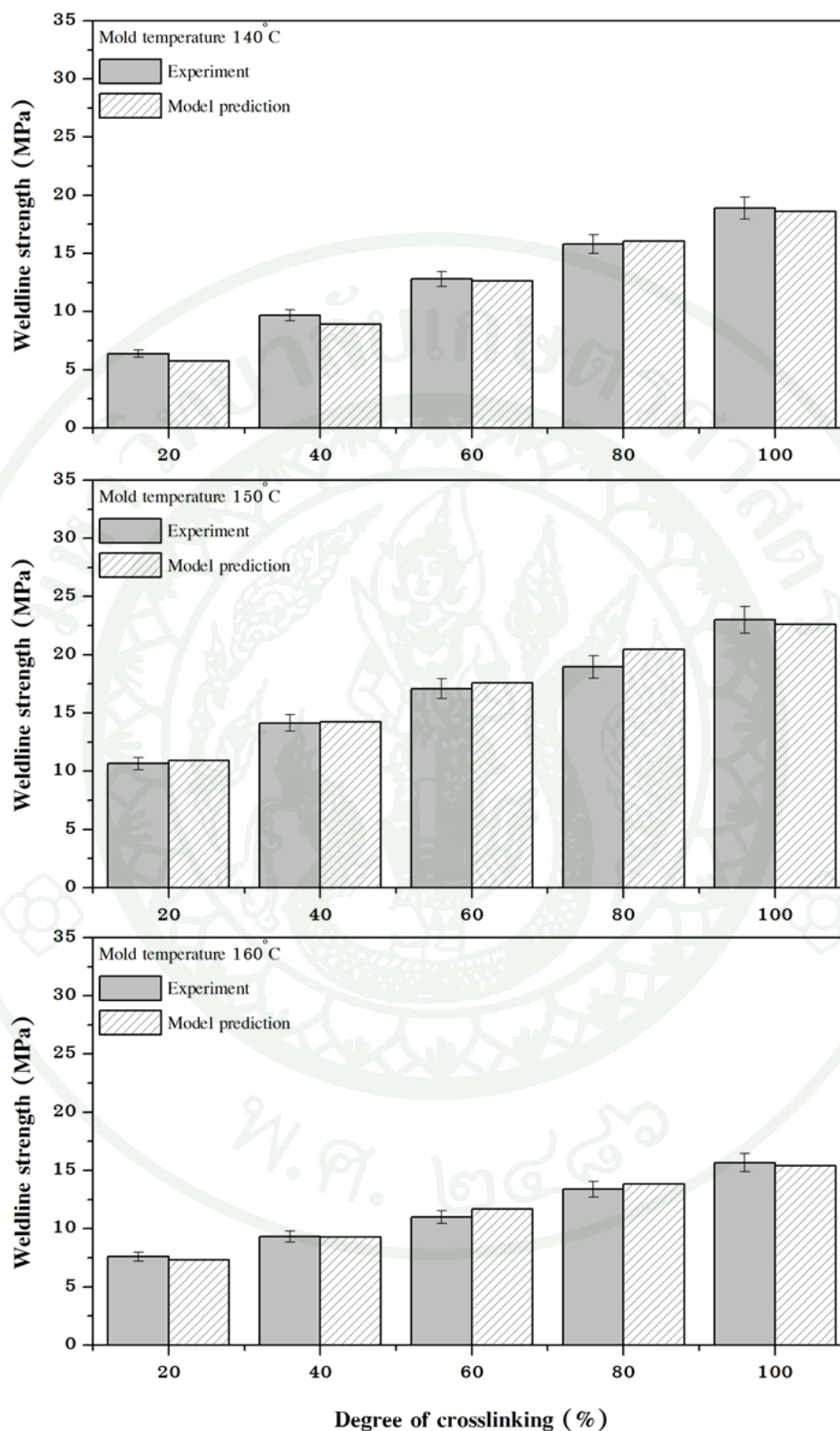


ภาพที่ 91 ผลการทำนายระดับการคงรูปโดยใช้แบบจำลอง Isayev and Deng

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน

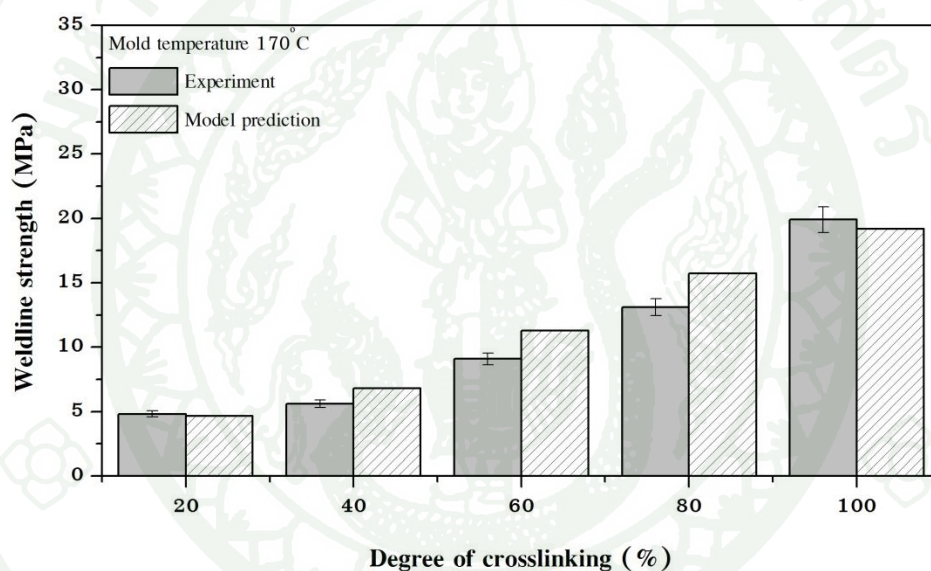
Mold temperature ($^{\circ}\text{C}$)	140	150	160
n	2.3159	2.3159	2.3159
$K(t)$	0.01839	0.07657	0.36825
K_0	4.2389×10^8	4.2389×10^8	4.2389×10^8
E_0/R	-3348	-3348	-3348
$\sigma_w(t_{100}, T)$	18.91	23.00	19.90
$\sigma_w(t_{20}, T)$	6.38	10.66	6.42

นำค่าจากตารางที่ 2 ไปแทนในสมการที่ 47 สำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยาง โดยผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 92 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายความแข็งแรงรอยประสานและผลที่ได้จากการทดสอบจริง เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วง 140°C ถึง 160°C ซึ่งได้พิจารณาเฉพาะความแข็งแรงรอยประสานที่ระดับการคงรูปในช่วง 20% ถึง 80% เนื่องจากความแข็งแรงรอยประสานที่ระดับการคงรูปเท่ากับ 100% ถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความแข็งแรงรอยประสานได้ดี เนื่องจากระดับการคงรูปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงรอยประสาน รวมถึงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูปที่พัฒนาโดย Isayev and Deng (1988) สามารถทำนายกระบวนการคงรูปได้ดี และนอกจากนี้ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 170°C โดยอาศัยผลการทดสอบความแข็งแรงรอยประสานที่ระดับการคงรูปเท่ากับ 100% ร่วมกับการใช้ค่าคงที่ต่างๆ จากตารางที่ 2 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้ทำนายความแข็งแรงรอยประสานนอกช่วงของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง MDR จากผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 93 เมื่อพิจารณาในช่วงระดับการคงรูป 40% ถึง 80% พบว่า ผลการทำนายความแข็งแรงรอยประสานด้วยแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้อสมมติฐานของแบบจำลองที่แตกต่างจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง โดยสามารถสรุปได้ 3 ประการคือ แบบจำลองกำหนดเงื่อนไขให้อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง (isothermal condition) ซึ่งในขั้นตอนของการทดสอบจริงนั้น ช่วงเริ่มต้นยางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต้อง) ในขณะที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 170°C หลังจากนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวแม่พิมพ์เข้าสู่ยางคอมพาวนด์ ส่งผลให้ระดับการคงรูปของชิ้นงานยางจากการทดสอบจริงมีค่าต่ำกว่าจากแบบจำลอง



ภาพที่ 92 ผลการเปรียบเทียบทำนายความแข็งแรงรอยประสานที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบจริงเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

ประการที่สอง แบบจำลองกำหนดให้การสัมผัสกันของยางคอมพาวนด์ที่บริเวณรอยประสานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ (perfect bonding) แต่ในการทดสอบจริงยางคอมพาวนด์ซึ่งมีความหนืดสูงเกิดการไหลภายในแม่พิมพ์มาประสานกันทำผลให้มีอากาศตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัส (ดังแสดงในภาพที่ 66) พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจากการทดสอบจริงจึงมีค่าน้อยกว่าจากแบบจำลอง ประการที่สาม ในแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและการคงรูปก่อนกำหนดของยางคอมพาวนด์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ในแบบจำลองจนพลศาสตร์นั้นเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเพียงอย่างเดียว แต่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ในการทดสอบทำให้ชิ้นงานยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และมีโอกาสเกิดการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการสัมผัสกัน เหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ความแข็งแรงรอยประสานที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่าต่ำกว่าผลจากการทำนายด้วยแบบจำลอง



ภาพที่ 93 ผลการทำนายความแข็งแรงรอยประสานที่ใช้เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 170°C

5.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

แบบจำลองที่พัฒนาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในหัวข้อที่ 5.1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานยางได้ อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดทางด้านตัวแปรที่ใช้ในการทำนาย (อุณหภูมิแม่พิมพ์และเวลาที่ใช้ในการคงรูป) การพัฒนาแบบจำลองแบบสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานได้เพิ่มตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน คือ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ในปริมาณ 0 ถึง 30 phr) ที่ใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปในช่วงระหว่าง 140°C ถึง 160°C ซึ่งแบบจำลองที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง แบบจำลองการถดถอยแบบพหุนามกำลังสอง และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

5.2.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

แบบจำลองการถดถอยนิยมนำมาใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลของสิ่งที่สนใจศึกษา (response variable) กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เชื่อว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งที่ศึกษา (independent variables) ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยประสานกับตัวแปรที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน โดยแบบจำลองถดถอยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง แบบจำลองการถดถอยแบบพหุนามกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 47 และ 48 ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองสามารถหาได้โดยการเขียนฟังก์ชันความสัมพันธ์ในรูปแบบของโปรแกรมย่อยที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User Define Subroutine, UDS) ด้วยโปรแกรม Origin 8.0 จากนั้นใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอย ดังแสดงในสมการที่ 49 และ 50

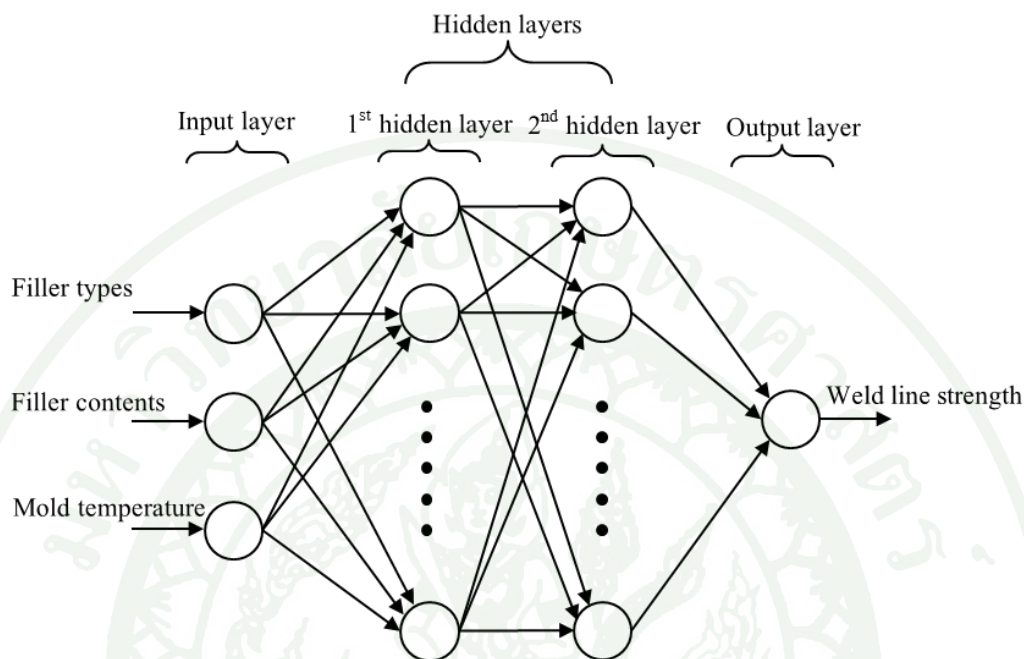
$$\sigma_w = 31.5120 - 0.2370T - 0.0463C - 0.0918Mt \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \sigma_w = & 311.9672 - 15.801T - 2.2273C - 3.4146Mt - 0.0323TC + 0.0837TMt \\ & + 0.0157CMt + 0.8742T^2 - 0.0037C^2 + 0.0097Mt^2 \end{aligned} \quad (50)$$

5.2.2 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสานในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสาน โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของเครือข่ายประสาทเทียมขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียม ตัวอย่างเช่น อัตราการเรียนรู้ และจำนวนรอบการฝึกหัด เป็นต้น โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรนำเข้าสำหรับแบบจำลอง คือ ชนิดของสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ) ปริมาณสารตัวเติม (0 ถึง 30 phr) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (140 ถึง 160°C) ดังแสดงในภาพที่ 94 และได้พัฒนาแบบจำลองโดยการศึกษาอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม และจำนวนรอบการฝึกหัดที่ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากที่สุด จากนั้นได้ศึกษาจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ตามลำดับ โดยในแต่ละขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมนี้ได้ใช้วิธีการทาง

สถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อเลือกสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม



ภาพที่ 94 สถาปัตยกรรมของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน

- การกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม

การเริ่มต้นพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมได้กำหนดสถาปัตยกรรมอย่างง่ายที่มี 1 ชั้นซ่อน (one hidden layer) โดยใช้จำนวนตัวแปรนำเข้า 3 ตัวแปร (ชนิดและปริมาณสารตัวเติม และอุณหภูมิแม่พิมพ์) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 5 นิวรอน (ซึ่งเป็นค่ากลางของจำนวนนิวรอนที่คำนวณได้จากสมการที่ 51 และ 52) และมีตัวแปรส่งออก 1 ตัวแปร (ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยาง) ในการหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE) แบบฟูลแฟคทอเรียล (full factorial design) ที่มี 3 ระดับ คือ อัตราการเรียนรู้ เท่ากับ 0.01 0.05 และ 0.09 และจำนวนรอบการฝึกหัด เท่ากับ 1,000 3,000 และ 5,000 รอบ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ (3 replications) ดังแสดงในตารางที่ 3

$$\text{Minimum neurons} = \frac{\text{input} + \text{output}}{2} \quad (51)$$

$$\text{Maximum neurons} = 2(\text{input}) + 1 \quad (52)$$

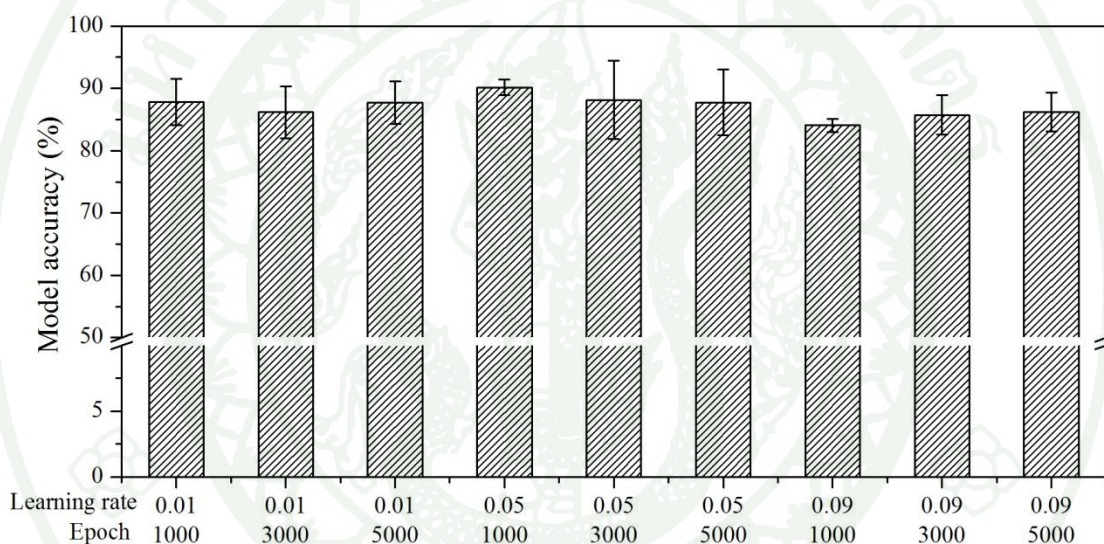
ตารางที่ 3 แผนการทดลองเพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม

Variables	Conditions		
Respond variable	Model accuracy (%)		
Variables	Levels		
Learning rate	0.01	0.05	0.09
Epoch	1,000	3,000	5,000
Controlled variables	Controlled values		
Number of inputs	3		
Number of neurons in hidden layer	5		
Transfer function in hidden layer	Log-sigmoid		
Transfer function in output layer	Linear		
Replication s	3 replications		
Analysis method	Analysis Of VAriant (ANOVA)		
	Standard Deviation (S.D.)		

ตารางที่ 4 แสดงอิทธิพลของอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่มีต่อความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพบว่า มีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่าอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบ รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร ไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถเลือกค่าใดค่าหนึ่งเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้ อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 95 พบว่า ที่อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.05 และจำนวนรอบเท่ากับ 1,000 ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากที่สุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าต่ำที่สุด จึงถูกเลือกเพื่อนำไปพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมต่อไป

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสม

Sources	Df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Learning rate	2	50.51	50.51	25.26	1.71	0.209
Epoch	2	2.49	2.49	1.24	0.08	0.920
Learning rate*epoch	4	20.66	20.66	5.17	0.35	0.841
Error	18	265.85	265.85	14.77		
Total	26	339.51				



ภาพที่ 95 ความแม่นยำของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเมื่อผันแปรอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัด

- การกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1

ในการหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ของเครือข่ายประสาทเทียม ได้ใช้อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.05 และจำนวนรอบฝึกหัดเท่ากับ 1,000 รอบ ซึ่งได้จากผลการทดลองที่ผ่านมา โดยกำหนดช่วงของจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนได้จากสมการที่ 51 และ 52 ซึ่งอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 นิวรอน และออกแบบแผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5

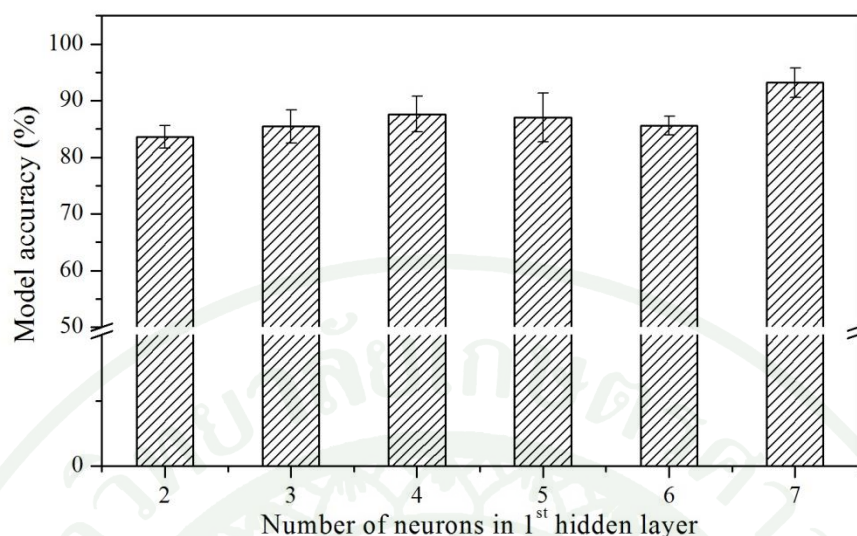
ตารางที่ 5 แผนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1

Variables	Conditions
Respond variable	Model accuracy (%)
Variables	Levels
Number of neurons in 1 st hidden layer	2-7 neurons
Controlled variables	Controlled values
Number of inputs	3
Learning rate	0.05
Epochs	1,000
Transfer function in hidden layer	Log-sigmoid
Transfer function in output layer	Linear
Replications	3 replications
Analysis method	Analysis Of VAriant (ANOVA) Standard Deviation (S.D.)

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าแต่ละจำนวนนิวรอนต่างๆ ในชั้นซ่อนที่ 1 ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียม โดยจากภาพที่ 96 พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนนิวรอนส่งผลให้ความแม่นยำของแบบจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่จำนวนนิวรอนเท่ากับ 7 นิวรอน แบบจำลองมีความแม่นยำสูงที่สุด ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1

Sources	Df	Ss	Ms	F	P-value
Number of neurons in 1 st hidden layer	5	163.77	32.75	3.84	0.026
Error	12	102.46	8.54		
Total	17	266.23			



ภาพที่ 96 ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน

- การกำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2

การคำนวณหาช่วงของจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ใช้สมการที่ 51 และ 52 เช่นเดียวกับการคำนวณช่วงของจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 โดยนำจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 มาเป็นตัวแปรนำเข้าสำหรับชั้นซ่อนที่ 2 ซึ่งได้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ในช่วง 4 ถึง 12 นิวรอน โดยมีแผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 โดยเมื่อพิจารณาค่า P-value จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าจำนวนนิวรอนที่เพิ่มขึ้นในชั้นซ่อนที่ 2 ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถเลือกจำนวนนิวรอนใดๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้ อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 97 พบว่า จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 เท่ากับ 12 นิวรอน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงแบบจำลองมีเสถียรภาพมากที่สุด

ตารางที่ 7 แผนการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2

Variables	Conditions
Respond variable	Model accuracy (%)
Variables	Levels
Number of neurons in 2 nd hidden layer	4-15 neurons

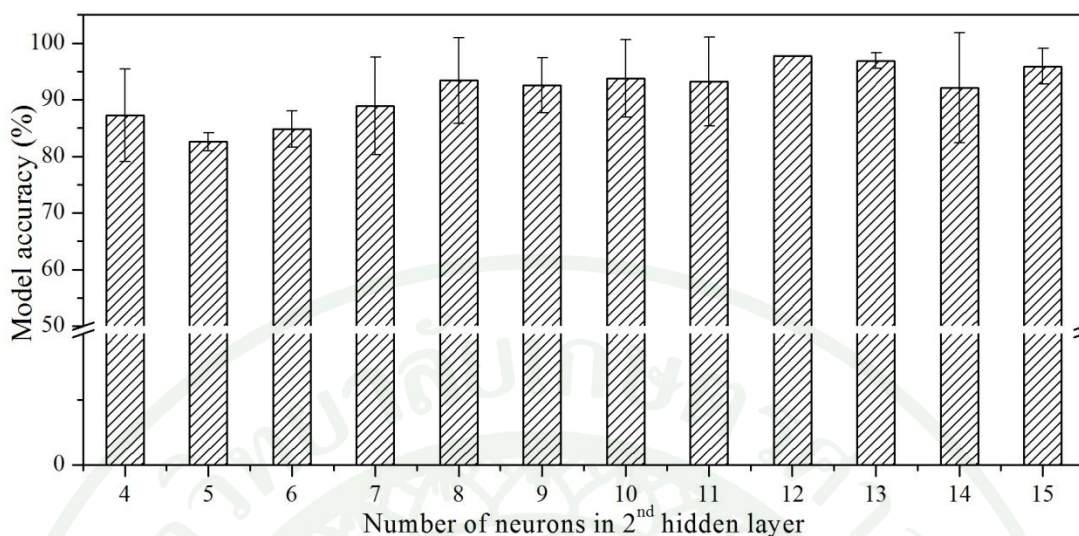
ตารางที่ 7 (ต่อ)

Variables	Conditions
Controlled variables	Controlled values
Number of inputs	3
Learning rate	0.05
Epoch	1,000
Number of neurons in 1 st hidden layer	7 neurons
Transfer function in hidden layer	Log-sigmoid
Transfer function in output layer	Linear
Replication	3 replications
Analysis method	Analysis Of VAriant (ANOVA) Standard Deviation (S.D.)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2

Sources	Df	Ss	Ms	F	P-value
Number of neurons 2 nd hidden layer	11	749.8	68.2	1.82	0.106
Error	24	898.5	37.4		
Total	35	1648.3			

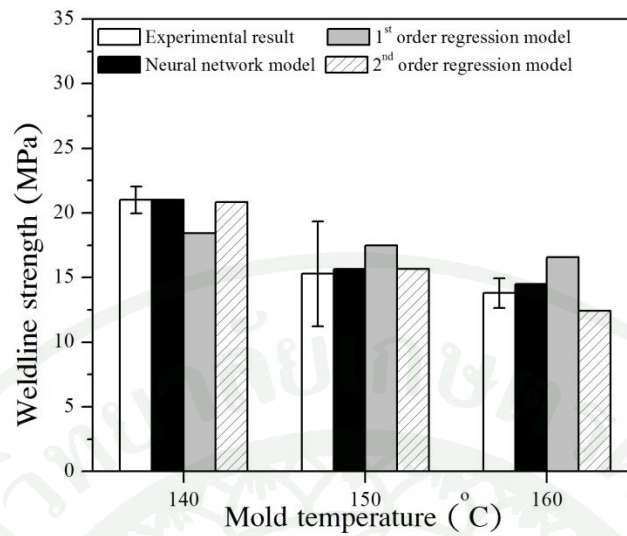
จากผลการทดลองเพื่อหาสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำที่ปริมาณ 0 ถึง 30 phr พบว่า ได้ปัจจัยที่เหมาะสม ดังนี้คือ อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.05 จำนวนรอบการฝึกหัดเท่ากับ 1,000 รอบ โดยมีรูปแบบของเครือข่ายประสาทเทียม 3-7-12-1 มีความแม่นยำเท่ากับ 97.75%



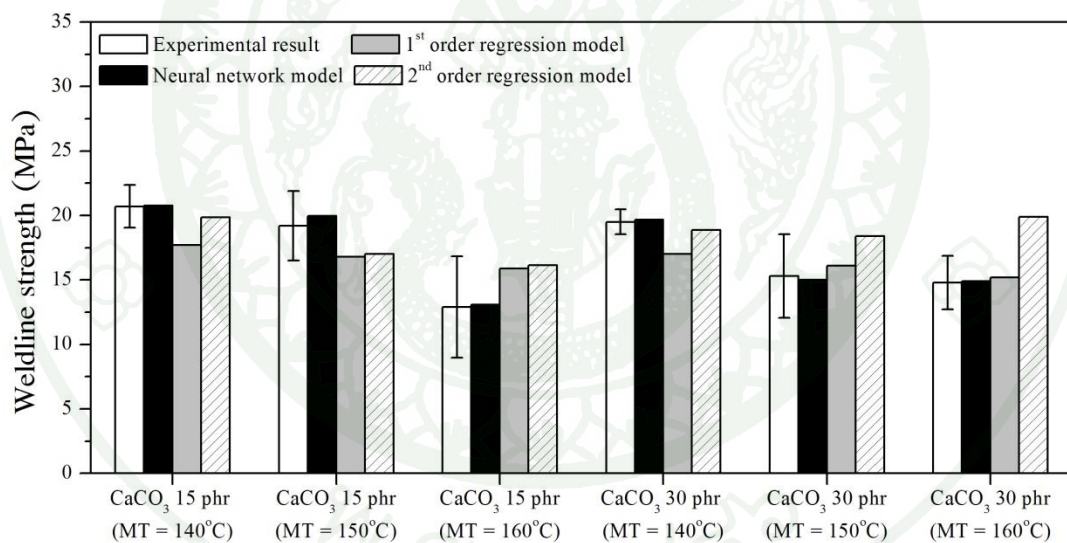
ภาพที่ 97 ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน

5.2.3 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองการถดถอยและแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

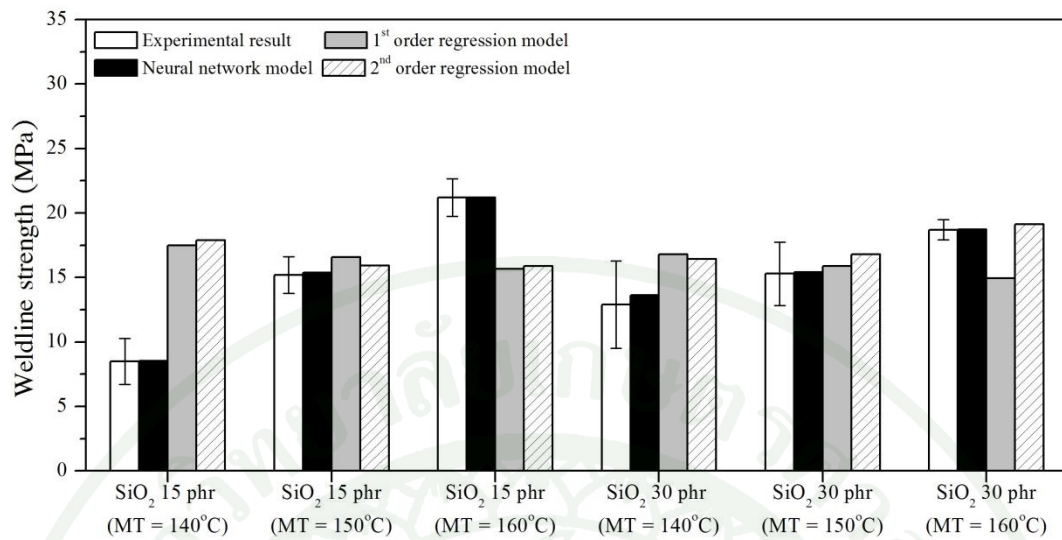
แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง และแบบพอลิโนเมียลกำลังสอง รวมทั้งแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ถูกนำมาเปรียบเทียบกันโดยใช้ข้อมูลทดสอบ (test data) โดยพบว่า มีความแม่นยำ 80.89% 83.92% และ 97.75% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 98 ถึง 101 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเมื่อนำมาเขียนในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า มีพจน์ของค่าคงที่ต่าง ๆ มากกว่าแบบจำลองการถดถอย ส่งผลให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี



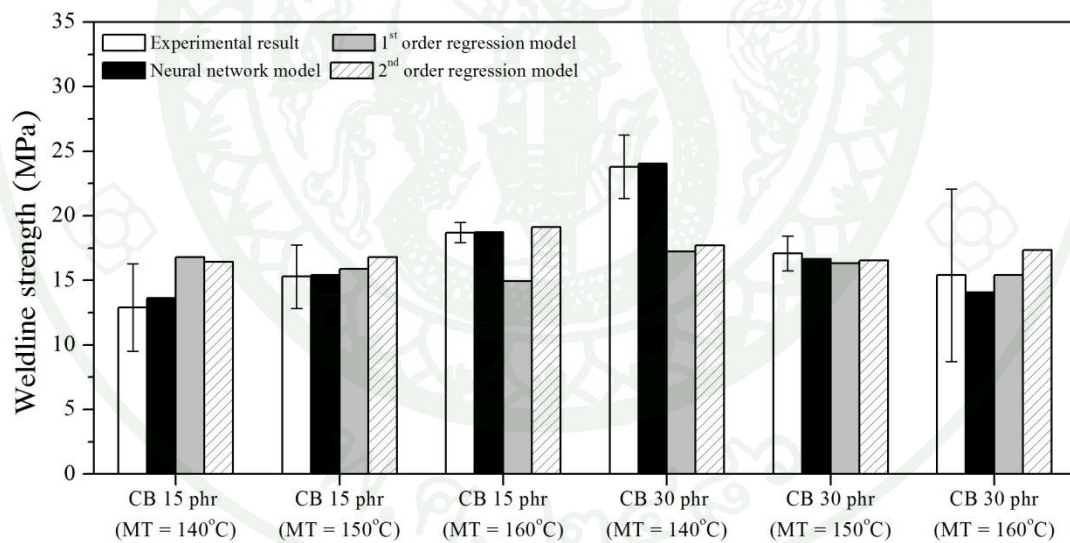
ภาพที่ 98 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางไม่ผสมสารตัวเติมที่ได้จากแบบจำลองต่างๆ



ภาพที่ 99 ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 100 ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 101 ผลการใช้แบบจำลองทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

6. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสาน

ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ กำหนดวัสดุ รวมถึงกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในการใช้งานยังคงมีข้อจำกัด ด้านรูปแบบของกระบวนการผลิตซึ่งส่วนใหญ่แล้วเน้นไปที่กระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานยังเป็นการใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปแทบทั้งสิ้น และที่สำคัญต้นทุนของโปรแกรมสำเร็จรูปค่อนข้างสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายตำแหน่งรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีความรวดเร็วและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

6.1 การใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป

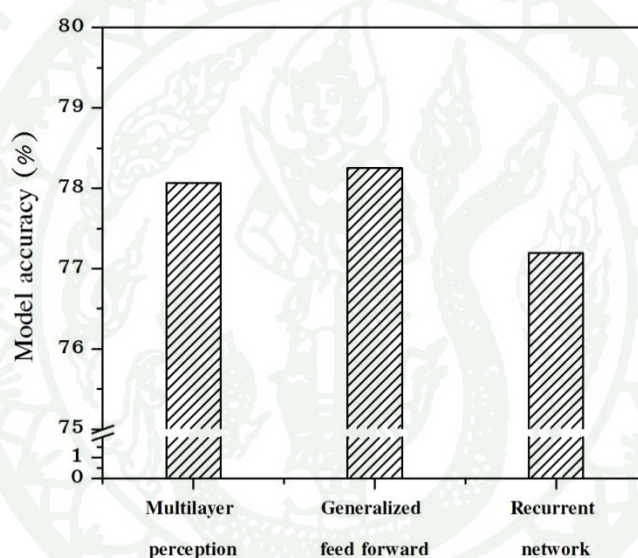
ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายตำแหน่งการเกิดรอยประสานในชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปได้กำหนดแผนการพัฒนาแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 9 โดยผลการศึกษาสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 102 พบว่าสถาปัตยกรรมแบบ Generalized feed forward ให้ความแม่นยำมากกว่าแบบอื่น จึงได้เลือกใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 9 แผนการทดลองเพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายตำแหน่งการเกิดรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป

Variables	Conditions		
Respond variables	Levels		
Architecture types	1. Multilayer perception	2. Generalized feed forward	3. Recurrent network
Learning rate	0.01–0.15		
Epoch	1,000–20,000		
Number of hidden layers	1–3		
Number of neurons in hidden layer	22–49		

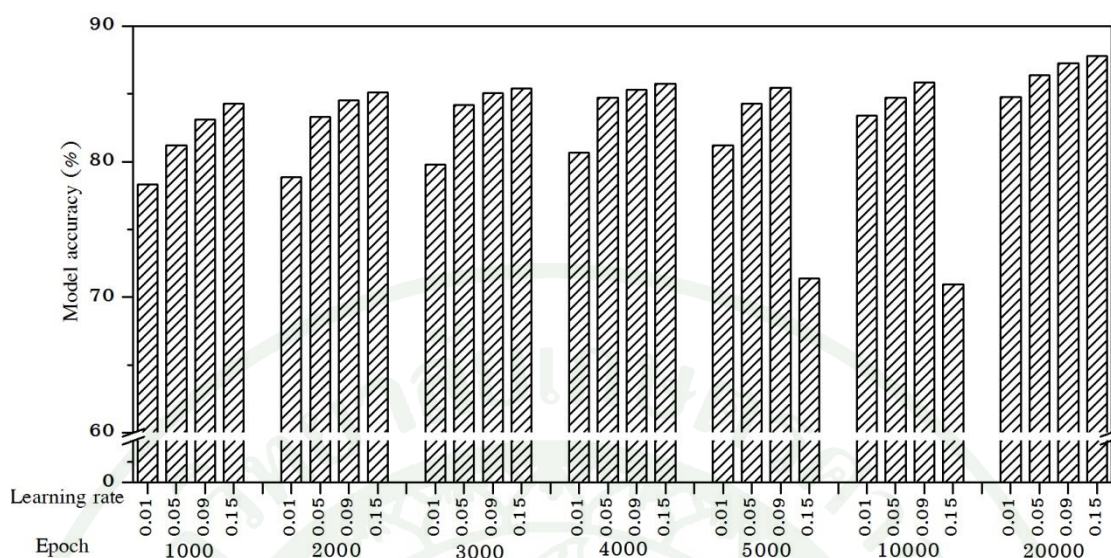
ตารางที่ 9 (ต่อ)

Variables	Conditions
Controlled variables	Controlled values
Number of inputs	24
Number of outputs	20
Transfer function in hidden layer	Log-sigmoid
Transfer function in output layer	Linear
Analysis method	Model accuracy (%)

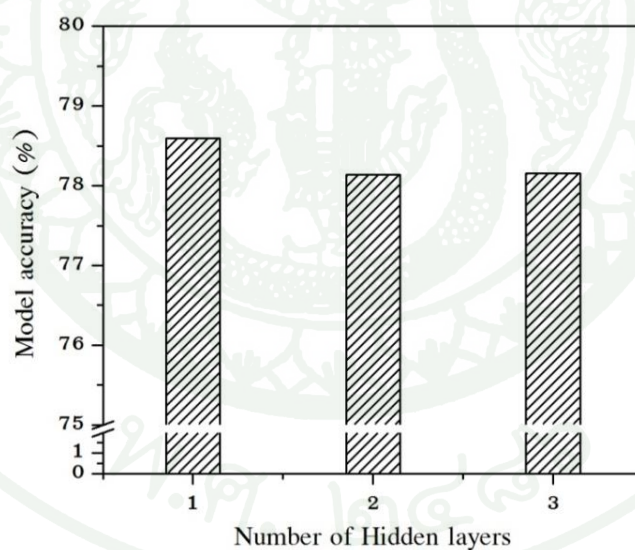


ภาพที่ 102 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์เพื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในภาพที่ 103 พบว่าจำนวนรอบการฝึกหัดที่ 20,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.15 ให้ค่าที่เหมาะสมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสาน และจากผลการวิเคราะห์จำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 104 พบว่า เมื่อจำนวนชั้นซ่อนเพิ่มสูงขึ้น ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงได้ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน

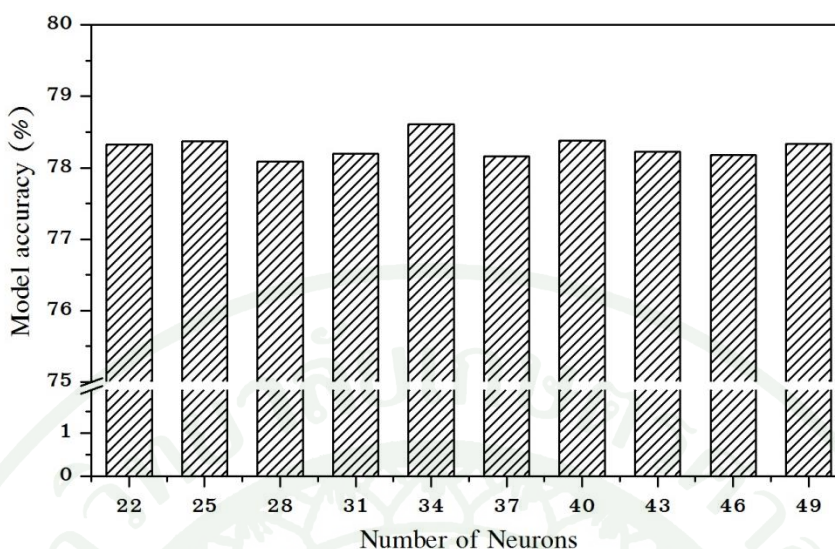


ภาพที่ 103 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียม



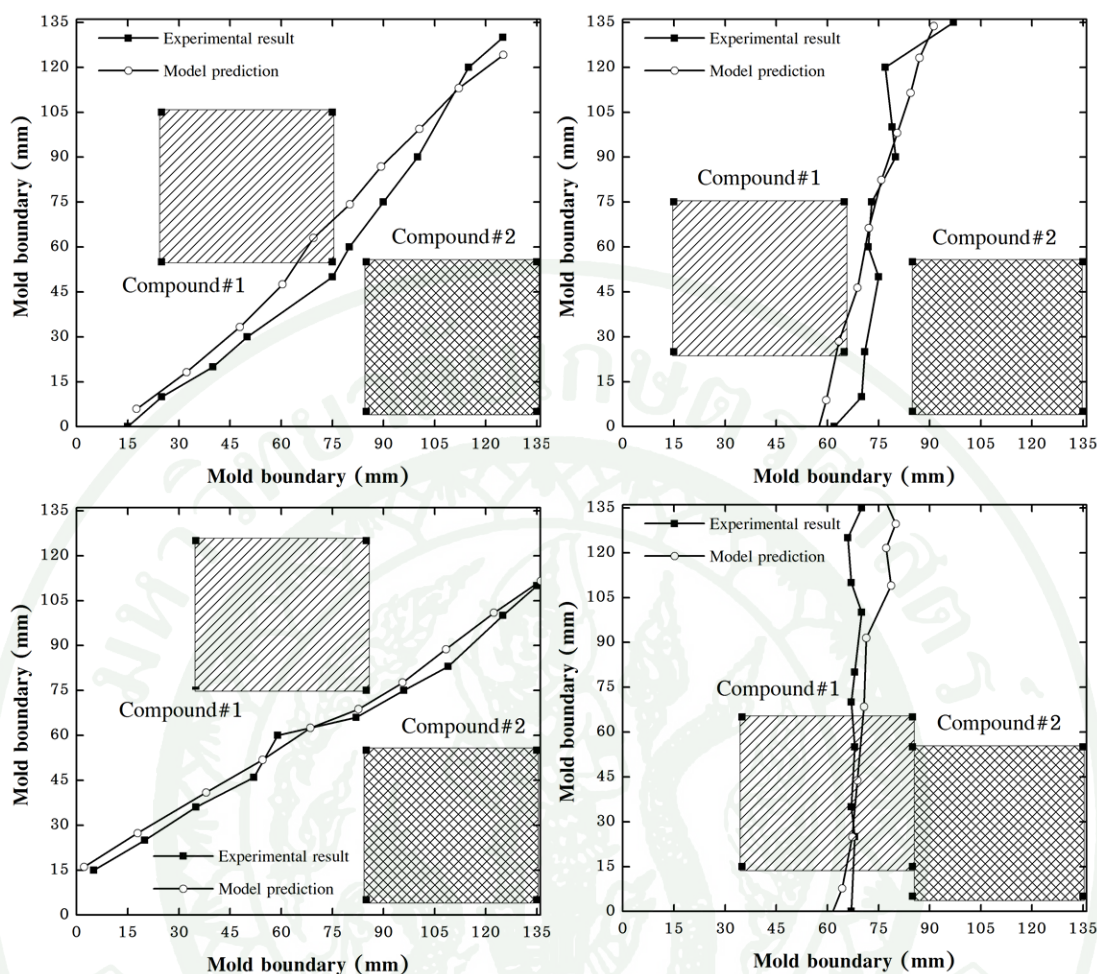
ภาพที่ 104 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม พบว่า จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 34 ให้ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมมากกว่าจำนวนอื่น ดังแสดงในภาพที่ 105



ภาพที่ 105 ผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม

หากพิจารณาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม พบว่า สถาปัตยกรรมแบบ Generalized feed forward ที่มีชั้นซ่อน 1 และจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 34 (24-34-20) ให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากที่สุด โดยผลทดสอบการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในภาพที่ 106 ทั้งนี้ผลที่ได้พบว่า การทำนายจากเครือข่ายประสาทเทียมยังมีผลที่แตกต่างจากกระบวนการอัดขึ้นรูปจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ขอบเขตของแม่พิมพ์ ขอบเขตของชิ้นงานเริ่มต้น และตำแหน่งของรอยประสาน มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมาก ซึ่งทำให้จำนวนรูปแบบการฝึกหัดที่นำมาใช้ ไม่เพียงพอต่อการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ตำแหน่งของรอยประสานด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ยังคงมีข้อดีในด้านความเร็วในการวิเคราะห์ ซึ่งแตกต่างจากการใช้โปรแกรมจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์

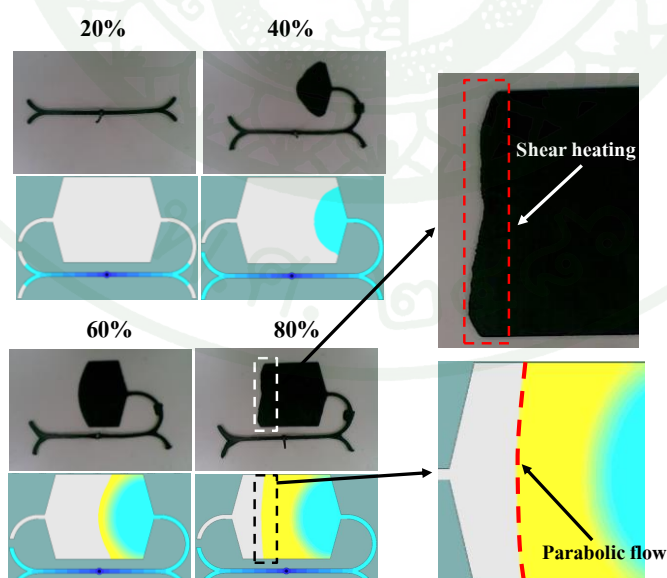


ภาพที่ 106 ผลทดสอบการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

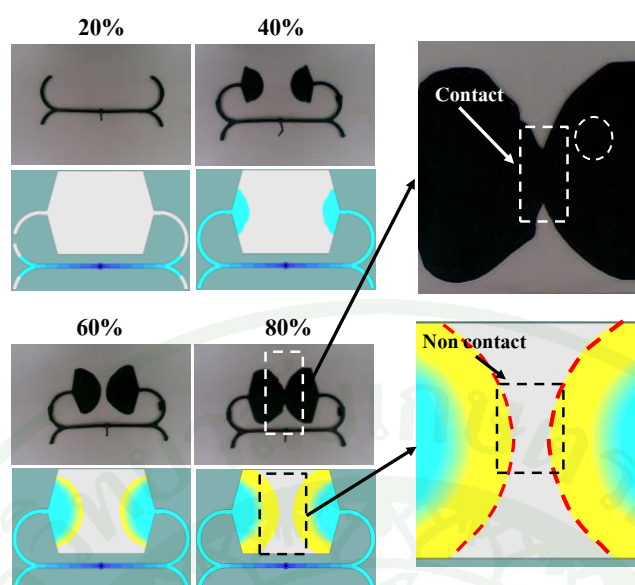
6.2 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับทำนายตำแหน่งรอยประสานและลักษณะการไหลภายในแม่พิมพ์

จากการเปรียบเทียบการไหลภายในแม่พิมพ์ระหว่างผลการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พบว่า การไหลภายในแม่พิมพ์มีรูปร่างและระยะทางการไหลของยางภายในแม่พิมพ์ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางและเวลาในการไหลเพิ่มขึ้น การพัฒนารูปแบบการไหล (flow development) ในกระบวนการฉีดจริง เริ่มมีความแตกต่างจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหล ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 107 ที่ปริมาตรการเติมในแม่พิมพ์เท่ากับ 80% ผลที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปจริงนั้น ปรากฏรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตร (asymmetric flow) เนื่องจากยางคอมพาวนด์ไหลเสียดสีกับผนังแม่พิมพ์

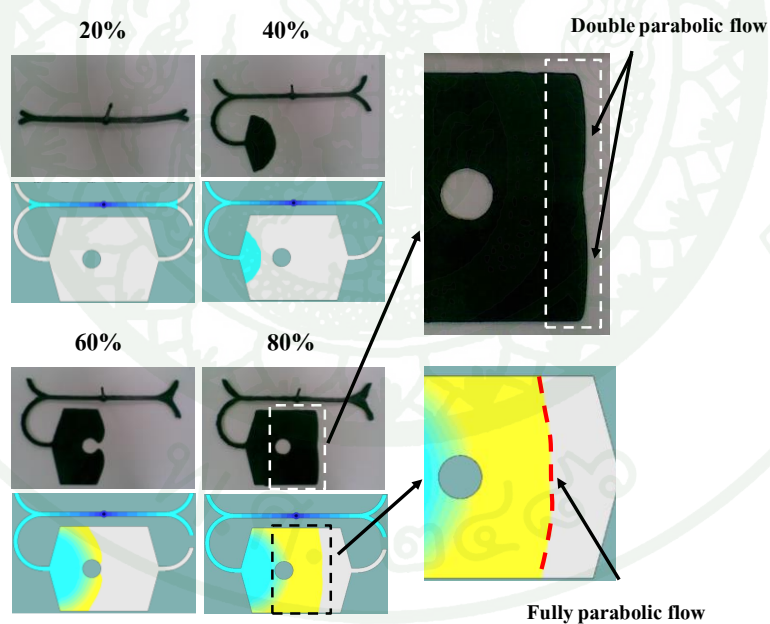
ทำให้เกิดความร้อนเนื้อที่ผนัง ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์ที่บริเวณผนังมีความหนืดลดลง และสามารถไหลได้เร็วกว่ายางบริเวณส่วนกลางของแม่พิมพ์ ในขณะที่ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีรูปแบบการไหลที่สมมาตร (parabolic flow) ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้การถ่ายเทความร้อนพอลิเมอร์หลอมเหลว และแม่พิมพ์ขณะเกิดการไหลภายในแม่พิมพ์เป็นค่าคงที่ (isothermal) และเมื่อพิจารณาภาพที่ 108 ที่ปริมาตรการเติมในแม่พิมพ์เท่ากับ 80% และภาพที่ 109 ที่ปริมาตรการเติมในแม่พิมพ์เท่ากับ 60% พบว่า กระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงมีการพัฒนารูปแบบการไหลที่รวดเร็วกว่าโปรแกรมวิเคราะห์การไหล เนื่องจากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีการกำหนดค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของยางคอมพาวนด์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์และยาง (heat transfer coefficient) เป็นค่าคงที่ตลอดกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งค่าเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง กล่าวคือ เมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับอุณหภูมิจากผิวแม่พิมพ์จะเกิดปฏิกิริยาโครงสร้าง และเริ่มแยกตัวจากผนังจนเกิดเป็นช่องว่าง ขนาดเล็ก (micro gap) ระหว่างยางและแม่พิมพ์ (พิจารณาภาพที่ 110 ประกอบ) ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นยางคอมพาวนด์ที่ไหลในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริงจึงมีถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าค่าที่ได้จาก โปรแกรมวิเคราะห์การไหล ทำให้ยางมีการพัฒนารูปแบบการไหลที่ช้ากว่า และนอกจากนี้ในโปรแกรมยังได้กำหนดให้ไม่มีการเลื่อนตัวที่ผนัง (no slip at wall) แต่ในขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลในแม่พิมพ์เกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (Malkin *et al.*, 1993) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากยางคอมพาวนด์เกิดชั้นคงรูปที่ผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์ ทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 110



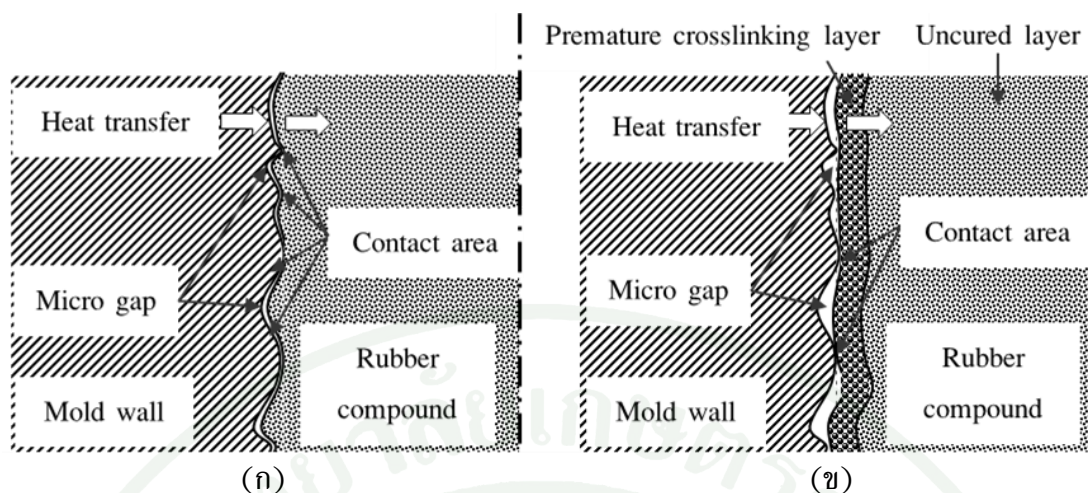
ภาพที่ 107 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากการฉีดขึ้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน



ภาพที่ 108 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากการฉีด
ชั้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบเย้น



ภาพที่ 109 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากการฉีด
ชั้นรูปจริงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสานแบบร้อน



ภาพที่ 110 สาเหตุที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและเกิดการเลื่อนตัวที่ผนัง (ก) ยางคอม-พาวนด์ที่ยังไม่เกิดการคงรูป และ (ข) การเกิดชั้นคงรูปที่ผิวสัมผัสกับแม่พิมพ์

7. การพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกเพื่ออธิบายคุณลักษณะความเค้น-ความเครียดในขณะที่ยางรับแรงดึง

ในการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกได้ใช้ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (แบบดึงแกนเดียว) ของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน ซึ่งผสมเขม่าดำ 30 phr และฉีดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 150°C เริ่มต้นโดยการนำข้อมูลการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 59(ก) เพื่อหาค่าพลังงานความเครียด (W) ด้วยสมการที่ 40 ซึ่งเป็นสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการหาค่าพลังงานความเครียด โดยค่าของพลังงานความเครียดที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 59(ข) จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนการยืดตัว ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) และอินวาเรียนท์ของความเครียด (I_1, I_2) โดยใช้สมการที่ 23 และ 26 ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (back propagation neural network) ที่มี 1 ชั้นซ่อน (one hidden layer) ในการหาฟังก์ชันพลังงานความเครียด โดยกำหนดให้อินวาเรียนท์ของความเครียดลำดับที่ 1 (I_1) และอินวาเรียนท์ของความเครียดลำดับที่ 2 (I_2) เป็นตัวแปรนำเข้า และพลังงานความเครียดเป็นตัวแปรส่งออก สำหรับอินวาเรียนท์ของความเครียดลำดับที่ 3 (I_3) ไม่ได้นำมาพิจารณาเนื่องจากผู้วิจัยกำหนดให้ยางคงรูปเป็นวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ จากสมการที่ 17 ในกรณีที่พลังงานความเครียดเป็นตัวแปรตามและอินวาเรียนท์ของความเครียดเป็นตัวแปรต้น สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 53

$$W = \frac{w_{11}^0}{1 + e^{-(I_1 W_{11}^h + I_2 W_{21}^h + B_1^h)}} + b^0 \quad (53)$$

นำข้อมูลอินวาเรียนท์ของความเครียดและพลังงานความเครียดมาฝึกหัดด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ทำให้ได้ค่าถ่วงน้ำหนัก และไบแอส ดังแสดงในสมการที่ 54

$$W = \frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} - 5.4154 \quad (54)$$

นำสมการที่ 53 มาหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 เทียบกับ I_1 และ I_2 ซึ่งได้ผลดังสมการที่ 55 และ 56

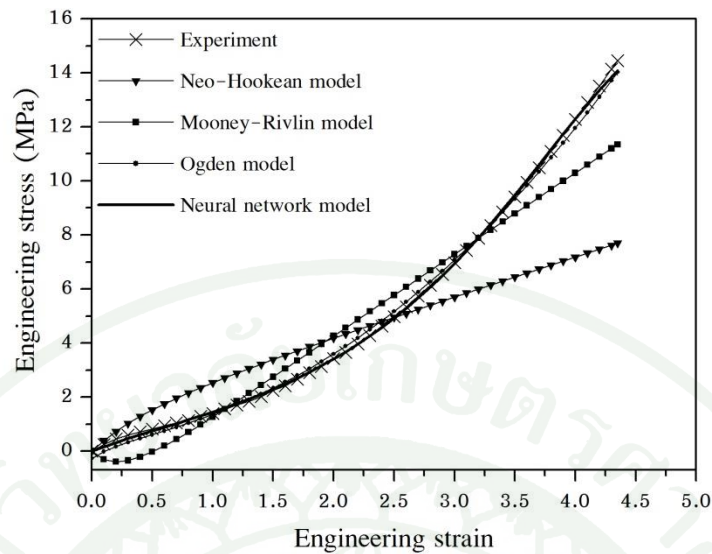
$$\frac{\partial U}{\partial I_1} = 0.091 \left(\frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \left(1 - \frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \quad (55)$$

$$\frac{\partial U}{\partial I_2} = 0.0332 \left(\frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \left(1 - \frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \quad (56)$$

นำสมการที่ 55 และ 56 ไปแทนค่าในสมการที่ 31 ทำให้ได้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายความเค้นแบบดิ่งแกนเดียว ดังสมการที่ 57

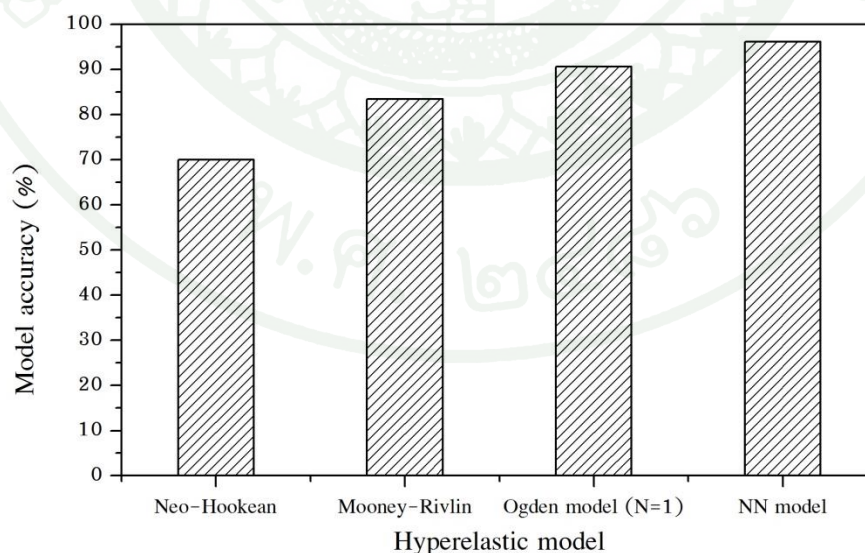
$$\sigma_U = 2 \left(\lambda_U - \frac{1}{\lambda_U^2} \right) \left(\frac{0.091 \left(\frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \left(1 - \frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right)}{\lambda_U} + \frac{1}{\lambda_U} 0.0332 \left(\frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \left(1 - \frac{63.5217}{1 + e^{-(0.091I_1 + 0.0332I_2 + 2.5394)}} \right) \right) \quad (57)$$

จากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากเครือข่ายประสาทเทียม (สมการที่ 30) ถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ แบบจำลอง Neo-Hookean แบบจำลอง Mooney-Rivlin และแบบจำลอง Ogden ซึ่งหาค่าคงที่ต่างๆ ของฟังก์ชันพลังงานความเครียดโดยการเขียนเป็นโปรแกรมย่อยที่กำหนดโดยผู้ใช้โปรแกรม Origin 8.0 ผลที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 111



ภาพที่ 111 การเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในขณะที่ทดสอบดึงแบบแกนเดียวและผลการทำนายด้วยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

จากภาพที่ 111 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Neo-Hookean และแบบจำลอง Mooney-Rivlin มีความแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงค่อนข้างมาก ในขณะที่แบบจำลอง Ogden และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดสอบจริง โดยมีความแม่นยำเท่ากับ 90.60% และ 96.10% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 112



ภาพที่ 112 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกทั่วไปและแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากเครือข่ายประสาทเทียม

จากการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่ผ่านมาข้างต้นได้ใช้สมการที่ 40 ในการหาค่าพลังงานความเครียด คือ $w = \sum_{i=1}^I \frac{1}{2} (\sigma_U^i + \sigma_U^{i-1}) (\varepsilon_U^i - \varepsilon_U^{i-1})$ ซึ่งอาจทำให้ได้รับข้อมูลเบื้องต้นที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากการคำนวณโดยการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ส่งผลให้การคำนวณในช่วงที่มีการเปลี่ยนเส้นโค้งสูงเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งได้แก่ สมการพหุนาม และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในสมการที่ 58 และ 59 ตามลำดับ

$$\sigma_U = a_1 + a_2 \varepsilon + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon^3 + a_5 \varepsilon^4 \quad (58)$$

$$\sigma_U = \frac{w_{11}^o}{1 + e^{-(\varepsilon w_{11}^h + b_1^h)}} + \frac{w_{12}^o}{1 + e^{-(\varepsilon w_{12}^h + b_1^h)}} + b^o \quad (59)$$

สมการที่ 58 และ 59 ถูกนำมาคำนวณค่าคงที่ต่างๆ แล้วหาอินทิกรัลตลอดความยาวของกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 60 และ 61 ซึ่งทำให้ได้ค่าพลังงานความเครียด จากนั้นนำค่าพลังงานความเครียดไปสร้างความสัมพันธ์กับอินวาเรียนท์ของความเครียด (I_1, I_2) ด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

$$W = \int_0^{\varepsilon_U} (a_1 + a_2 \varepsilon + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon^3 + a_5 \varepsilon^4) d\varepsilon \quad (60)$$

$$W = \int_0^{\varepsilon_U} \left(\frac{w_{11}^o}{1 + e^{-(\varepsilon w_{11}^h + b_1^h)}} + \frac{w_{12}^o}{1 + e^{-(\varepsilon w_{12}^h + b_1^h)}} + b^o \right) d\varepsilon \quad (61)$$

อนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ได้จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเทียบกับ $\lambda_1 (\partial W / \partial \lambda_1)$ คือ แบบจำลองที่ใช้ทำนายความเค้นแบบดิงแกนเดียว นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยการสร้างฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการยืดตัวในแนวแกนต่างๆ ($W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$) ด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (ซึ่งมีพื้นฐานเช่นเดียวกับแบบจำลอง Ogden) แล้วหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 เทียบกับ λ_1 เช่นเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 62 จากนั้นแทนด้วยค่าคงที่ต่างๆ จากตารางที่ 10 โดยความแม่นยำของแบบจำลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 11

$$\sigma_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = \frac{w_{11}^h w_{11}^o}{1 + e^{-(\lambda_1 w_{11}^h + \lambda_2 w_{21}^h + \lambda_3 w_{31}^h + b_1^h)}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-(\lambda_1 w_{11}^h + \lambda_2 w_{21}^h + \lambda_3 w_{31}^h + b_1^h)}} \right) + \frac{w_{12}^h w_{21}^o}{1 + e^{-(\lambda_1 w_{12}^h + \lambda_2 w_{22}^h + \lambda_3 w_{32}^h + b_2^h)}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-(\lambda_1 w_{12}^h + \lambda_2 w_{22}^h + \lambda_3 w_{32}^h + b_2^h)}} \right) \quad (62)$$

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการที่ 62

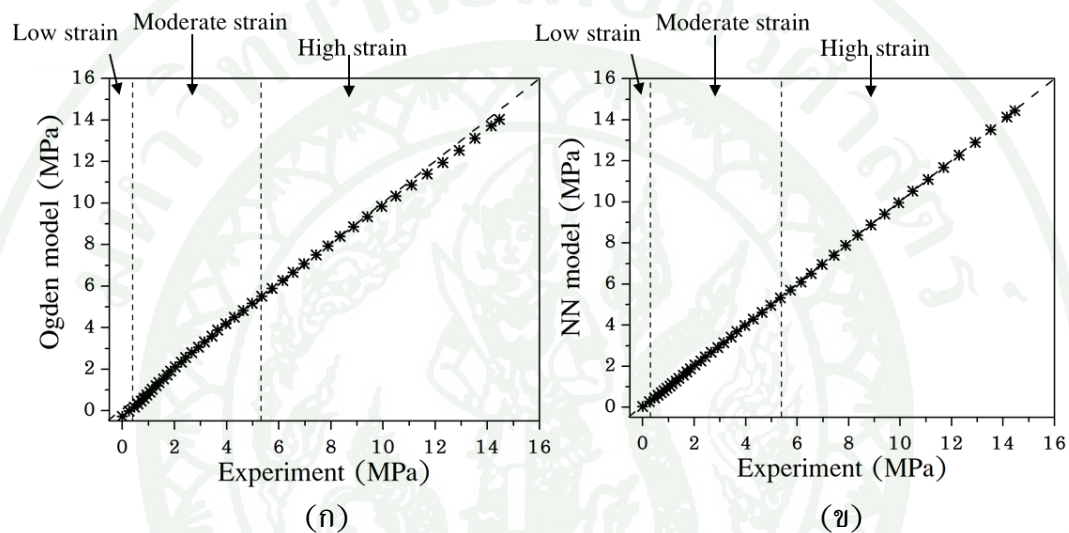
1 st term	Constants	2 nd term	Constants
w_{11}^h	0.7809	w_{12}^h	0.5593
w_{21}^h	-4.4218	w_{22}^h	0.6044
w_{31}^h	6.3806	w_{32}^h	1.3643
b_1^h	-6.2549	b_2^h	-0.0944
w_{11}^o	119.5112	w_{21}^o	22.1859

เมื่อพิจารณาความแม่นยำของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนาขึ้นจากการใช้ค่าพลังงานความเครียดซึ่งคำนวณได้จากสมการทั่วไป (สมการที่ 36) สมการพหุนาม (สมการที่ 60) และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (สมการที่ 61) แสดงให้เห็นว่า ทุกแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายความเค้นได้ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 11 ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูลจากการทดสอบที่นำมาใช้มีจำนวนมากพอ ส่งผลให้การประมาณค่าระหว่างช่วงข้อมูลมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง โดยผู้วิจัยคาดว่าหากข้อมูลไม่เพียงพอหรือมีจำนวนน้อยเกินไป จะส่งผลการใช้สมการทั่วไปเพื่อหาค่าพลังงานความเครียดเกิดความผิดพลาดได้

ตารางที่ 11 ความแม่นยำของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้พัฒนาขึ้นด้วยสมการที่ใช้หาค่าพลังงานความเครียดแบบต่างๆ

Calculation of strain energy by using:	General (Eq. 36)	Polynomial (Eq. 60)	Neural network (Eq. 61)	Neural network (Eq. 61)
Calculation of uniaxial stress by using:	$\sigma_U = 2 \left(\lambda_U - \frac{1}{\lambda_U^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_U} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right)$			$\sigma_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1}$
Model accuracy (%)	96.10	96.12	96.05	99.22

จากตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดและอัตราส่วนการยืดตัวในแนวแกนต่างๆ มีความแม่นยำสูงที่สุด โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้มีพื้นฐานเช่นเดียวกับแบบจำลอง Ogden ผู้วิจัยจึงได้นำผลการทำนายความเค้นที่เกิดขึ้นในขณะยืดตัวไปเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Ogden ดังแสดงในภาพที่ 113(ก) และ (ข) ซึ่งพบว่า แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความเค้นได้ดีทั้งที่ความเครียดต่ำ (ความเครียด 0 ถึง 0.30) และความเครียดสูง (ความเครียด 2.50 ถึง 4.35)



ภาพที่ 113 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลอง (ก) แบบจำลอง Ogden และ (ข) แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่พัฒนามาจากเครือข่ายประสาทเทียม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสมบัติเชิงกลแบบสถิตย์และเชิงพลวัตของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ทั้งกระบวนการอัดและกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวนด์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงระบบการคงรูปแบบ EV และ CV ปัจจัยที่มาจากกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์ รวมถึงอิทธิพลจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยสมบัติเชิงกลที่ศึกษา คือ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และอายุความล้าของชิ้นงานยาง และได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานและทำนายตำแหน่งที่เกิดรอยประสาน รวมถึงพัฒนาแบบจำลองคอนสตีติวทีฟเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุยางในขณะรับแรงดึง ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสาน พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงรอยประสาน ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน และพบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV มีความแข็งแรงรอยประสานสูงกว่าชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV โดยมีสาเหตุมาจากเวลาเริ่มคงรูปยางใช้ระบบการคงรูปแบบ CV ที่เกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าแบบ EV และเมื่อพิจารณาปัจจัยจากกระบวนการผลิต แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์และแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานที่มีรอยประสานไปผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า ชิ้นงานยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความแข็งแรงรอยประสานไม่แตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน ส่วนชิ้นงานยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงรอยประสานลดลง ในขณะที่ชิ้นงานยางผสมซิลิกามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และปัจจัยที่ได้ศึกษาทั้งกระบวนการอัดและกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมถึงอุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่า ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามในกระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถสังเกตเห็นความแข็งแรงรอยประสานที่ลดลงได้ชัดเจนกว่า เนื่องจากมีระยะทางการไหลของยางคอมพาวนด์ที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาลักษณะรอยประสานแบบเย็นและแบบร้อนของชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่า รอยประสานแบบร้อนมีความแข็งแรงสูงกว่ารอยประสานแบบเย็น โดยรอยประสานแบบร้อนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างจากสิ่งกีดขวางภายในแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น

2. ผลการศึกษาอายุความล้าของชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกา และเขม่าดำ ทำให้อายุความล้ามีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ร่องบากตัววีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและค่าฮีสเทอรีซิสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสาร

ตัวเต็ม หากพิจารณาถึงอิทธิพลของระบบการคงรูปที่ต่างกัน พบว่า ชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ CV มีอายุความล้ามากกว่าชิ้นงานยางที่ใช้ระบบการคงรูปแบบ EV เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟด์ของระบบการคงรูปแบบ CV มีความยาวพันธะที่มากกว่าพันธะเชื่อมขวางแบบมอโนหรือไดซัลไฟด์ของระบบการคงรูปแบบ EV ทำให้ชิ้นงานยางมีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานได้ดี และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และแรงดันปิดแม่พิมพ์ แสดงให้เห็นว่า อายุความล้าของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับชิ้นงานยางที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

3. จากผลการศึกษาถึงระดับการคงรูปของชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระดับการคงรูป ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของระบบการคงรูปยาง เพื่อใช้ในการทำนายความแข็งแรงรอยประสาน ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้มีตัวแปรที่พิจารณา 2 ตัวแปร คือ เวลาที่ยางสัมผัสกัน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทำนายความแข็งแรงรอยประสานที่อุณหภูมิสูง (170°C) มีค่าสูงกว่าผลการทดลองจริง ซึ่งมีสาเหตุมาจาก สมมติฐานของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น กล่าวคือ ในแบบจำลองนั้นวัสดุยางที่เกิดรอยประสานต้องมีการสัมผัสกันที่สมบูรณ์ และมีอุณหภูมิคงที่ตลอดกระบวนการขึ้นรูป โดยในทางปฏิบัติที่บริเวณหน้าสัมผัสอาจมีอากาศตกค้าง หรือมียางที่คงรูปบางส่วนก่อนการสัมผัสกัน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการขึ้นรูปนั้น อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ยางอยู่ภายในแม่พิมพ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ ชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมทั้งอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง แบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลกำลังสอง และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งให้ผลการทำนายที่มีความแม่นยำ 80.89% 83.92% และ 97.75% ตามลำดับ โดยพบว่า แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อนำแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมาเขียนในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า มีพจน์ของค่าคงที่ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ซึ่งมีจำนวนมากกว่าค่าคงที่ของแบบจำลองการถดถอย ส่งผลให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานสามารถสรุปได้ 2 สาเหตุหลัก ๆ คือ อุณหภูมิของยางคอมพาวนด์ในขณะยางที่ไหลมาประสานกัน และเวลาที่ยางคอมพาวนด์สัมผัสกันภายในแม่พิมพ์ โดยต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ชิ้นงานยางไม่เกิดการคงรูปก่อนการสัมผัสกัน รวมทั้งไม่เกิด

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ดังนั้นหากมีปัจจัยอื่นที่มีส่วนสนับสนุนปัจจัยดังกล่าวข้างต้น จะทำให้ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

4. ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายตำแหน่งการเกิดรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งผลที่ได้พบว่า ตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมยังคงมีความแตกต่างจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของตำแหน่งรอยประสานที่มีหลายตัวแปรเกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น ขอบเขตของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของยางคอมพาวนด์ จึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากเพื่อใช้ในการฝึกหัดเครือข่ายประสาทเทียม เพื่อให้สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ และงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง อย่างไรก็ตามยังคงมีความต่างของรูปแบบการไหล ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างจากความเป็นจริง ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์และยางมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการคงรูป และกำหนดค่าการนำความร้อนของยางคอมพาวนด์เป็นค่าคงที่ รวมถึงการกำหนดให้ยางคอมพาวนด์ที่ติดผนังแม่พิมพ์ไม่มีการเคลื่อนที่

5. จากผลการพัฒนาแบบจำลองคอนสติติวทีฟของยางคงรูปที่มีรอยประสาน และผสมเขม่าดำในปริมาณ 60 phr โดยได้นำเสนอแบบจำลองพลังงานความเครียดที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของอินวาเรียนต์ของความเครียด ($W = f(I_1, I_2)$) และเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั่วไปที่นิยมใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้แก่ แบบจำลอง Neo-Hookean แบบจำลอง Mooney-Rivlin และแบบจำลอง Ogden พบว่า มีความแม่นยำ 57.71% 65.88% 90.23% ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำ 96.10% นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองพลังงานความเครียดที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนการยืดตัว ($W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$) ซึ่งมีพื้นฐานเช่นเดียวกับแบบจำลอง Ogden โดยมีความแม่นยำเท่ากับ 99.22%

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษากลไกการยึดเกาะทั้งกายภาพ (physically bonding) และการยึดเกาะทางเคมี (chemically bonding) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันในขณะขึ้นรูปชิ้นงานยาง ซึ่งความรู้ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมและกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตได้ง่ายยิ่งขึ้น

2. ควรขยายผลการวิจัยเกี่ยวกับอายุความล้าของชิ้นงานยางเพื่อหาแนวทางการออกแบบชิ้นงานยางที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ต้องอาศัยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งและขนาดของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จากนั้นนำไปออกแบบแม่พิมพ์ทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหนาแน่นและอายุความล้าของชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าแนวทางนี้สามารถนำไปประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานยางที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้

3. จากผลการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบดึงแกนเดียว (uniaxial test) แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่ใช้งานจริงชิ้นงานยางมักมีภาระแบบหลายแกน (multi-axial loading) ซึ่งผู้วิจัยมีความคิดเห็นว่าควรศึกษาและพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมที่อยู่ในสภาวะต่าง ๆ ด้วยแบบจำลองเดียว และนอกจากนี้แบบจำลองโดยส่วนใหญ่แล้วเน้นไปที่วัสดุยางซึ่งมีข้อสมมติฐานที่กำหนดให้เป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ (incompressible material) อย่างไรก็ตามชิ้นงานยางบางประเภทมีความสามารถในการอัดตัวได้ (compressible material) หรือชิ้นงานยางที่ใช้ในสภาวะที่รับแรงดันสูงมาก ซึ่งควรมีการพัฒนาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่เหมาะสม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี.

_____. 2550. สารเคมียาง. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี.

วรภรณ์ ขจรไชยกูล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.

Akay, M., S. Ozden and T. Tansey. 1996. Prediction of process-induced warpage in injection molded thermoplastics. **Polymer Engineering and Science** 36 (13): 1839-1846.

Allen, Y.P., W.-H. Yang and D.C. Hsu. n.d. **Numerical Prediction of the Weld-line-Induced Strength Reduction for Injection-Molded Part**. CoreTech System Co.,Ltd. Available Source: <http://www.ansys.com/events/proceedings/2006/PAPERS/53.pdf>, June 10, 2008.

Barlow, F.W. 1993. **Rubber Compounding: Principles, Materials and Techniques**. Marcel Dekker, New York.

Barnett, C.E. 1934. Thermal properties of rubber compounds I. thermal conductivity of rubber and rubber compounding materials. **Industrial and Engineering Chemistry** 26 (3): 303-306.

Bauman, J.T. 2008. **Fatigue, stress, and strain of rubber components**. Hanser Publishers Munich, Germany.

Beaumont, J.P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook**. Hanser Publisher, Munich.

- Bergstrom, J.S. and M.C. Boyce. 2000. Large strain time-dependent behavior of filled elastomers. **Mechanics of Materials** 32:627–644.
- Blow, C.M. and C. Hepburn. 1982. **Rubber Technology and Manufacture**. Butterworths, London.
- Boyce, M.C. and E.M. Arruda. 2000. Constitutive models of rubber elasticity: A review. **Rubber Chemistry and Technology** 73: 504–523.
- Charlton, D.J., J. Yang and K.K. Teh. 1993. A Review of methods to characterize rubber elastic behavior for use in finite element analysis. **Rubber Chemical and Technology** 67: 481–503.
- Chen, C.-S., T.-J. Chen, R.-D. Chien and S.-C. Chen. 2007. Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded ABS parts. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 34: 448–455.
- Ching, P.C., M.T. Chuang, Y.H. Hsiao, Y.K. Yang and C.H. Tsai. 2009. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. **Expert Systems with Applications** 36 (7): 10752–10759.
- Choi, S.S., B.H. Park and H. Sonh. 2004. Influence of filler type and content on properties of styrene-butadiene rubber (SBR) compound reinforced with carbon black or silica. **Polymers for Advanced Technologies** 15 (3): 122–127.
- Chuayjuljit, S., A. Invittaya, N. Na-ranong and P. Potiyaraj. 2002. Effects of particle size and amount of carbon black and calcium carbonate on curing characteristics and dynamic mechanical properties of natural rubber. **Journal of Metals Materials and Minerals** 12 (1): 51–57.
- Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology, Shawbury.

- Clearfield, H.M., D.K McNamara and G.D. Davis. 1991. **Adhered Surface Preparation for Structural Adhesive Bonding**. Plenum Press, New York.
- Clements, H.H. 2007. **Bonding strength at solid-melt interface in a two-component injection moulding process**. Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Polymer Technology Group.
- Davis, B.A., P.J. Gramann, T.A. Osswald and A.C. Rios. 2003. **Compression Moulding**. Carl Hanser Verlag, Munich.
- Demuth, H. and M. Beale. 2001. **Neural Network Toolbox User's Guide**. 7th edition The MathWorks, Inc., Natick.
- Deng, J.S. and A.I. Isayev. 1991. Injection molding of rubber compounds—experimentation and simulation. **Rubber Chemistry and Technology** 64:296–324.
- Diani, J., B. Fayolle and P. Gilormini. 2009. A review on the Mullins effect. **European Polymer Journal** 45: 601–612.
- Donnet, J.B. 1998. Black and white fillers and tire compound. **Rubber Chemistry and Technology** 71 (3): 323–341.
- Ersoy, O.G. and N. Nugay. 2003. A new approach to increase weld line strength of incompatible blend composites: selective filler addition. **Polymer** 45: 1243–1252.
- Fellahi, S., A. Meddad, B. Fisa and B.D. Favis. 1995. Weldlines in injection-molded part: A review. **Advance in Polymer Technology** 14 (3): 169–195.
- Fisa, B. and M. Rahmani. 1991. Weldline strength in injection molded glass fiber-reinforced polypropylene. **Polymer Engineering and Science** 31: 1330–1336.

Gent, A. N. 2001. **Engineering with Rubber How to Design Rubber Components**. Hanser Publishers, Munich.

Guo, S., A. Ait-Kadib and M. Bousmina. 2004. A modified model predictions and experimental results of weld-line strength in injection molded PS/PMMA Blends. **Polymer** 45: 2911–2920.

Hagerman, E.M. 1973. Weld-line fracture in molded parts. **Plastic Engineering** 29: 67–69.

Hewitt, N. 2007. **Compounding Precipitated Silica in Elastomers**. William Andrew, New York.

Hofmann, W. 1989. **Rubber Technology Handbook**. Hanser Publishers, Munich.

Isayev, A.I. and J.S. Deng. 1988. Nonisothermal vulcanization of rubber compounds. **Rubber Chemistry and Technology** 61: 340–361.

Ismail, H., H. Anuar and Y. Tsukahara. 1999. Effect of palm oil fatty acid on curing characteristic, reversion and fatigue life of various natural rubber compounds. **Polymer International**. 48: 607–613.

Johnson, P.S. 2001. **Rubber Processing: An Introduction**. Carl Hanser Verlag, Munich.

Kamal, M.R. and S. Sourour. 1973. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure. **Polymer Engineering and Science** 13 (1): 59–64.

Kazmer, D.O. n.d. **Exploiting Melt Compressibility to Achieve Improved Weld Line Strengths**. University of Massachusetts Amherst. Available Source: kazmer.uml.edu/Staff/Archive/1998JPRCP_Weld_Strength.pdf, January 24, 2008.

- Kenig, A., A. Ben-David, M. Omer and A. Sadeh. 2001. Control of properties in injection molding by neural networks. **Artificial Intelligence** 14: 819–823.
- Kim, J.K., J.H. Song, S.T. Chung and T.H. Kwon. 1997. Morphology and mechanical properties of injection molded articles with weld-lines. **Polymer Engineering and Science** 37 (1): 228–241.
- Kim S.-G. and N.P. Suh. 1986. Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers. **Polymer Engineering and Science** 36: 1200–1207.
- Kima, H.S., J.S. Son and Y.T. Imc. 2003. Gate location design in injection molding of an automobile junction box with integral hinges. **Journal of Materials Processing Technology** 140 (1): 110–115.
- Kinloch, A.J. 1990. **Adhesion and Adhesives: Science and Technology**. Chapman and Hall, London.
- Kohjiya, S., A. Katoh, T. Suda, J. Shimanuki and Y. Ikeda. 2006. Visualisation of carbon black networks in rubbery matrix by skeletonisation of 3D-TEM image. **Polymer** 47 (10): 3298–3301.
- Kroon, M. 2010. A constitutive model for strain-crystallising rubber-like materials. **Mechanics of Materials** 42: 873–885.
- Kühnert, I., V. Stoll and G. Mennig. 2005 Sequential injection molding: the influence on weldlines. *In The 21st annual meeting of the polymer processing society (PPS), Germany.*
- Leblanc, J.L. 2002. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. **Progress in Polymer Science** 27(4): 627–687.
- Lee, L.H. 1991. **Adhesive Bonding**, Plenum Press, New York.

- Liu, S.-J., J.-Y. Wu and J.-H. Chang. 2001. Design of experiments to optimize the weldline strength in injection molded thermoplastics. *In The Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*, United States.
- Ludwig, H.-C., G. Fischer and H. Becker. 1995. A quantitative comparison of morphology and fiber orientation in push-pull processed and conventional injection molded parts. *Composites Science and Technology* 53 (2): 235-239.
- Malguarnera, S.C. 1982. Weld Lines in Polymer Processing. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 18 (1): 1-45.
- Malkin, A.Y., A.V. Baranov and M.E. Vickulenkova. 1993. Experimental estimation of wall slip for filled rubber compounds. *Rheological Acta* 32 (2): 150-155.
- Malloy, R.A. 1994. **Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction**. Hanser Verlag, Munich.
- Mark J.E., B. Erman and F.R. Frederick. 1994. **Science and technology of rubber**. Academic press, New York.
- Mars, W.V. and A. Fatemi. 2002. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *International Journal of Fatigue* 24: 949-961.
- Martin, H.T., D.B. Howard and B. Mark. 1995. **Neural Network Design**. PWS Publishing Company, Boston.
- Mekhilef, N., A. Ait-Kadi and A. Ajji. 1995. Weld Lines in Injection-Moulded Immiscible Blends: Model Predictions and Experimental Results. *Polymer* 36: 2033-2042.

- Merah, N., M. Irfan-ul-Haq and Z. Khana. 2004. Effects of injection molding weld on fatigue crack resistance of CPVC at different temperatures. **Journal of Materials Processing Technology** 155–156: 1261–1265.
- Miller, K. 2004. **Testing elastomers for hyperelastic material models in finite element analysis**. Available Source: <http://www.axelproducts.com/pages/hyperelastic.html>, Mar 21, 2012.
- Morelli, C.L., J.A. Sousa. and A.S. Pouzada. 2007. Assessment of weld line performance of PP/Talc moldings produced in hot runner injection molds. **Journal of Vinyl and Additive Technology** 13 (3): 159–165.
- MSC. Software. 2010. **Nonlinear finite element analysis of elastomers**. Available Source: <http://www.mssoftware.com>, Mar 21, 2012.
- Nguyen-Chung, T. 2004. Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics. **Rheologica Acta** 43 (3): 240–245.
- Nichetti, D. 2004. Determination of mechanical properties of silica compounds using a curing kinetic model. **European Polymer Journal** 40: 2401–2405.
- Nozu, S.H., H. Tsuji, M. Itadani, W. Fujiwara and K. Ohnishi. 2008. Study of cure process of thick solid rubber. **Journal of Materials Processing Technology** 201 (1–3): 720–724.
- Ou, Y.-C., Z.-Z. YU, A. Vidal and J.B. Donnet. 1996. Effects of alkylation of silicas on interfacial interaction and molecular motions between silicas and rubbers. **Journal of Applied Polymer Science** 59: 1321–1328.
- Overton, L. n.d. **Flow Orientation and Weld Lines–They can Contribute to the Success or Failure of a Part**. Engineering Design: A Global View of Dupont Polymers. Available Source: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/americas/processing/DCI384.pdf>, January 24, 2008.

Packham, D.E. 2005. **Handbook of Adhesion**. John Wiley & Sons, New York.

Pasbakhsh, P., H. Ismail, M.N.A. Fauzi and A.A. Bakar. 2009. The partial replacement of silica or calcium carbonate by halloysite nanotubes as fillers in ethylene propylene diene monomer composites. **Journal of Applied Polymer Science** 113: 3910–3919.

Pacharaphun, S. 2006. **Characterization and simulation of material distribution and fiber orientation in sandwich injection molded parts**. Ph.D. Thesis, Chemnitz University of Technology.

Pocius, A.V. 2002. **Adhesion and Adhesives Technology**. Hanser Publishers, New York.

Reis, R.L., A.M. Cunha and M.J. Bevis. 1998. Shear controlled orientation injection molding of polymeric composites with enhanced properties. *In Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference*, United States.

Rios, A., B. Davis, and P. Gramann. n.d. **Computer aided engineering in compression moulding**. The Madison Group. Available Source: [http://www.madisongroup.com/Publications/Thermosets /cae.pdf](http://www.madisongroup.com/Publications/Thermosets/cae.pdf), January 23, 2008.

Robert, A.D. 1988. **Natural rubber science and technology**. Oxford University Press, New York.

Rodgers, B. and W. Waddell. 2005. **Science and Technology of Rubber**. Academic press, London.

Rooj, S., G.C. Basak, P.K. Maji and A.K. Bhowmick. 2011. New route for devulcanization of natural rubber and the properties of devulcanized rubber. **Journal of Polymers and the Environment** 19 (2): 382–390.

- Sadeghi, B.H.M. 2000. A BP-neural network predictor model for plastic injection moulding process. **Materials Processing Technology** 103: 411–416.
- Sae-oui, P., C. Sirisinha, T. Wantana and K. Hatthapanit. 2007. Influence of silica loading on the mechanical properties and resistance to oil and thermal aging of CR/NR blends. **Journal of Applied Polymer Science** 104 (5): 3478–3483.
- Seadan, M., P. Pongbhai, P. Thairaj and T. Watanakamtornkul. 2002. Weld-line strength of rubber in injection molding: Effect of injection factors and compound characteristics. **Rubber chemistry and technology** 75: 83–92.
- Selden, S. 1997. Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics. **Polymer Engineering and Science** 37 (1): 205–218.
- Sezna, J.A. and P.J. DiMauro. 1984. Processability testing of injection molding rubber compounds. **Rubber Chemistry and Technology** 57: 826–842.
- Shen, Y., K. Chandrashekhara, W. Breig and L.R. Oliver. 2004. Neural network based constitutive model for rubber material. **Rubber Chemistry and Technology** 77 (2): 257–277.
- Shoemaker, J. 2008. **Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers**. Hanser Publishers, Munich.
- Simcon kunststofftechnische Software GmbH. 2002. **Cadmould Rubber User's Manual**. Simcon. Herzogenrath, Germany.
- Teh, P.L., Z.A. Mohd Ishak, A.S. Hashim, J. Karger-Kocsis and U.S. Ishiaku. 2004. On the potential of organoclay with respect to conventional fillers (carbon black, silica) for epoxidized natural rubber compatibilized natural rubber vulcanizates. **Journal of Applied Polymer Science** 94 (6): 2438–2445.

Tomari, K., S. Tonogai and T. Harada. 1990. The V-notch at weld lines in polystyrene injection moldings. **Polymer Engineering and Science** 30: 931-936.

_____, T. Harada and Z. Maekawa. 1993. Fracture toughness of weldlines in thermoplastic injection molding. **Polymer Engineering and Science** 33: 996-1001.

Treloar, L.R.G. 1958. **The Physics of Rubber Elasticity**. 2nd edition Clarendon Press. Oxford, England.

Turng, L.S. and H. Kharbas. 2004. Effect of process conditions on the weld-line strength and microstructure of microcellular injection molded parts. **Polymer Engineering and Science** 43 (1): 157-168.

Wu, C.H. and W.J. Liang. 2005. Effects of geometry and injection-molding parameters on weld-line strength. **Polymer Engineering and Science** 45 (7): 1021-1030.

Yamada, K., K. Tomari, U.S. Ishiaku and H. Hamada. 2005. Evaluation of mechanical properties of adjacent flow weldline. **Polymer Engineering and Science** 45 (8): 1180-1186.

Yeung, V.W.S. and K.H. Lau. 1997 . Injection moulding C-MOLD CAE package process parameter design and quality function deployment: A Case Study of Intelligent Materials Processing. **Journal of Materials Processing Technology** 63 (1-4): 481-487.

Yung, K.S, C.W. Wu, Y.F. Yu and H.W Chung. 2008. Analysis for optimal gate design of thin-walled injection molding. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 35 (6): 728-734.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์และยางคงรูป

ตารางผนวกที่ ก1 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV และยางคอมพาวนด์ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ

Filler contents (phr)	Mooney viscosity		
	CaCO ₃	SiO ₂	CB
0	36.50	36.50	36.50
15	40.00	46.32	44.57
30	47.80	64.40	47.81
45	51.80	119.50	79.10
60	58.70	122.80	95.60
60 (EV)	–	–	94.02

ตารางผนวกที่ ก2 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์เมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV และยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Filler contents (phr)	Cure time (min)			Scorch time (min)		
	CaCO ₃	SiO ₂	CB	CaCO ₃	SiO ₂	CB
0	7.26	7.26	7.26	4.48	4.48	4.48
15	7.26	6.04	4.59	4.41	2.57	2.04
30	5.00	7.07	4.37	2.40	2.41	1.39
45	5.34	8.53	4.44	3.03	0.45	1.14
60	5.08	11.27	4.38	2.37	0.09	1.25
60 (EV)	–	–	5.15	–	–	1.51

ตารางผนวกที่ ก3 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	25.20	1.26	24.2	1.21
30	23.32	1.17	21.72	1.09
45	24.25	1.21	21.68	1.08
60	21.20	1.06	20.13	1.00

ตารางผนวกที่ ก4 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	21.25	1.06	22.08	1.10
30	24.70	1.24	23.54	1.18
45	21.28	1.06	6.02	0.30
60	17.26	0.86	8.67	0.43

ตารางผนวกที่ ก5 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่าง ๆ กัน

Filler content (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	28.36	1.42	27.63	1.38
30	28.76	1.44	28.08	1.40
45	27.08	1.35	20.775	1.04
60	26.00	1.30	15.97	0.80

ตารางผนวกที่ ก6 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

Clamping pressure (MPa)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
3	25.73	1.29	6.70	0.33
4.5	26.00	1.30	15.97	0.80
6	27.07	1.35	15.70	0.78

ตารางผนวกที่ ก7 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

Mold temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
150	26.20	1.31	15.97	0.80
160	26.00	1.30	15.97	0.80
170	25.20	1.26	16.87	0.84

ตารางผนวกที่ ก8 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

Filler content (phr)	Weldline strength (MPa)			
	Non-aging	SD	Thermal aging	SD
0	22.36	1.12	20.97	1.05
15	24.2	1.21	18.62	0.93
30	21.72	1.09	22.28	1.11
45	21.68	1.08	21.90	1.10
60	20.13	1.01	23.30	1.17

ตารางผนวกที่ ก9 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกา

Filler content (phr)	Weldline strength (MPa)			
	Non-aging	SD	Thermal aging	SD
0	22.36	1.12	20.97	1.05
15	22.08	1.10	24.36	1.22
30	23.54	1.18	26.30	1.32
45	6.02	0.30	10.14	0.51
60	8.67	0.43	9.90	0.50

ตารางผนวกที่ ก10 อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำ

Filler content (phr)	Weldline strength (MPa)			
	Non-aging	SD	Thermal aging	SD
0	22.36	1.12	20.97	1.05
15	27.63	1.38	18.60	0.93
30	28.08	1.40	11.53	0.58
45	20.78	1.04	11.86	0.59
60	18.10	0.91	10.16	0.51

ตารางผนวกที่ ก11 ความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานยางอัดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำ 60 phr ที่ระดับการคงรูปต่างๆ

Degree of crosslinking (%)	Weldline strength (MPa)							
	Mold temperature (°C)							
	140	SD	150	SD	160	SD	170	SD
20	6.38	0.32	10.66	0.53	7.60	0.38	4.83	0.24
40	9.68	0.48	14.13	0.71	9.33	0.47	5.60	0.28
60	12.80	0.64	17.10	0.86	11.00	0.55	9.10	0.46
80	15.80	0.79	18.95	0.95	13.40	0.67	13.10	0.66
100	18.91	0.95	23.00	1.15	15.67	0.78	19.90	1.00

ตารางผนวกที่ ก12 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ กัน

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	18.5	2.12	15.90	3.32
30	16.8	2.02	13.44	2.12

ตารางผนวกที่ ก13 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่างๆ กัน

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	23.34	0.80	13.90	2.71
30	21.29	0.62	14.74	0.85

ตารางผนวกที่ ก14 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ กัน

Filler content (phr)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	27.17	0.89	14.78	4.61
30	32.16	0.82	14.02	3.37

ตารางผนวกที่ ก15 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปทั้งมีและไม่มีรอยประสานแบบเย็นเมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

Mold temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	SD	Weldline strength (MPa)	SD
150	29.1	0.73	29.6	1.43
160	29.6	1.43	15.8	2.8
170	27.5	0.08	14.9	7.8

ตารางผนวกที่ ก16 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางฉีดขึ้นรูปทั้งมีและไม่มีรอยประสานแบบร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ หลังลึงก็ดขวาง

Position	140 °C		150 °C		160 °C	
	Tensile strength (MPa)	SD	Tensile strength (MPa)	SD	Tensile strength (MPa)	SD
NW	33.27	0.38	32.16	0.82	29.00	0.65
W1	16.97	2.32	24.34	2.10	27.05	1.20
W2	20.87	3.29	24.45	2.80	26.26	1.48
W3	29.48	1.16	28.35	2.05	26.52	1.48

ตารางผนวกที่ ก17 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ กัน

Filler content (phr)	Tension-fatigue life (kc)			
	Non-weldline	SD	Weldline	SD
SiO ₂ 30	49.34	3.45	9.21	0.92
SiO ₂ 60	40.84	4.08	7.44	0.74
CB 30	112.62	8.87	105.18	7.80
CB 60	65.72	6.57	55.19	5.52

ตารางผนวกที่ ก18 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr เมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

Clamping pressure (MPa)	Tensile strength		Weldline strength	
	(MPa)	SD	(MPa)	SD
30	65.96	6.60	29.25	2.93
45	65.72	6.57	55.19	1.48
60	64.75	8.01	50.77	5.08

ตารางผนวกที่ ก19 อายุความล้าแบบดึงยืดของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

Mold temperature (°C)	Tension-fatigue life (kc)			
	Non-weldline	SD	Weldline	SD
140	63.89	6.05	35.86	3.79
150	65.72	6.05	55.19	1.48
160	72.33	7.23	45.21	4.52

ตารางผนวกที่ ก20 อายุความล้าแบบหักงอของชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำเมื่อใช้ระบบการคงรูปแบบ EV และ CV

Filler content (phr)	Flex-fatigue life (kc)			
	Non weldline	SD	Weldline	SD
0	172.01	14.09	97.10	6.46
30	74.55	2.31	60.64	3.52
60	47.19	1.84	31.55	11.96
60 (EV)	16.88	0.90	14.62	1.62



```

function [beta,r,J,Sigma,mse,errorparam,robustw] = nlinmfit(x_cell, y_cell,
mdl_cell, beta0, options)
% ({x1,x2,x3},{y1,y2,y3},{f1,f2,f3},{s1,s2,s3,s4})
%f1=@(F,x)F(1)x1+F(3)x1.^2
%example
%f1=@(F,t)F(1).*t.^F(4)./(1+F(1).*t.^F(4))
%f2=@(F,t)F(2).*t.^F(4)./(1+F(2).*t.^F(4))
%f3=@(F,t)F(3).*t.^F(4)./(1+F(3).*t.^F(4))
%nlinmfit({t,t,t},{a140,a150,a160},{f1,f2,f3},{1,1,1,1})
    num_curves = length(x_cell);
    if length(y_cell) ~= num_curves || length(mdl_cell) ~= num_curves
        error('Invalid input to NLINMULTIFIT');
    end

    x_vec = [];
    y_vec = [];
    mdl_vec = '@(beta,x) [';
    mdl_ind1 = 1;
    mdl_ind2 = 0;
    for ii = 1:num_curves
        if length(x_cell{ii}) ~= length(y_cell{ii})
            error('Invalid input');
        end
        if size(x_cell{ii},2) == 1
            x_cell{ii} = x_cell{ii}';
        end
        if size(y_cell{ii},2) == 1
            y_cell{ii} = y_cell{ii}';
        end
        x_vec = [x_vec, x_cell{ii}];
        y_vec = [y_vec, y_cell{ii}];
        mdl_ind2 = mdl_ind2 + length(x_cell{ii});
        mdl_vec = [mdl_vec, sprintf('mdl_cell{%d}(beta,x{%d:%d}), ', ii,
mdl_ind1, mdl_ind2)];
        mdl_ind1 = mdl_ind1 + length(x_cell{ii});
    end
    mdl_vec = [mdl_vec(1:end-2), '];'];
    mdl_vec = eval(mdl_vec);

    if nargin == 4
        [beta,r,J,Sigma,mse] = nlinfit(x_vec, y_vec, mdl_vec, beta0);
    else
        [beta,r,J,Sigma,mse] = nlinfit(x_vec, y_vec, mdl_vec, beta0,
options);
    end
end

```

ภาพผนวกที่ ข1 Source code MATLAB สำหรับการคำนวณค่าคงที่ของแบบจำลอง
จลนพลศาสตร์กระบวนการควบรูป

```

%Neural network model for predicting the weldline strength of injection
molded parts
%load train data
load train_WS.txt;
load test_WS.txt;

type_train = train_WS(:,1)/(2*max(train_WS(:,1)));
content_train = train_WS(:,2)/(2*max(train_WS(:,2)));
MT_train = train_WS(:,3)/(2*max(train_WS(:,3)));
WS_train = train_WS(:,4);
input_train = [type_train content_train MT_train]';
output_train_WS = [WS_train]';

type_test = test_WS(:,1)/(2*max(test_WS(:,1)));
content_test = test_WS(:,2)/(2*max(test_WS(:,2)));
MT_test = test_WS(:,3)/(2*max(test_WS(:,3)));
WS_test = test_WS(:,4);
input_test = [type_test content_test MT_test]';
output_test_WS = [WS_test]';

%training parameter setup
% s is number of neuron in 1st hidden layer
s = 7;
%r is number of neuron in 2nd hidden layer
r = 15;
% t = number of neuron in output layer
t = 1;

net = newff(minmax(input_train),[s r t],{'logsig' 'logsig' 'purelin'});

net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.lr= .05;

net.trainParam.show = 1000;
net.trainParam.goal = 1e-30;
net.trainParam.min_grad=1e-30; %%Minimum performance gradient

%train
net_WS = train(net,input_train,output_train_WS);

%simulation
a = sim(net_WS,input_test);

%error calculation
e = a - output_test_WS;
error = sum(abs(e)./output_test_WS)/length(input_test)*100;
accuracy = 100-error

```

ภาพผนวกที่ ๒ ตัวอย่าง Source code MATLAB สำหรับการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

```

clc;
clear all;
%load train data
load Lamda_U.txt;

%L1 = Lamda_U(:,1); %Lamda1
%L2 = Lamda_U(:,2); %Lamda2
%L3 = Lamda_U(:,3); %Lamda3
%U = Lamda_U(:,4); %Strain energy
%Normalization datas
L1 = 0.6*(Lamda_U(:,1)- min(Lamda_U(:,1)))/(max(Lamda_U(:,1))-
min(Lamda_U(:,1)))+0.2;
L2 = 0.6*(Lamda_U(:,2)- min(Lamda_U(:,2)))/(max(Lamda_U(:,2))-
min(Lamda_U(:,2)))+0.2;
L3 = 0.6*(Lamda_U(:,3)- min(Lamda_U(:,3)))/(max(Lamda_U(:,3))-
min(Lamda_U(:,3)))+0.2;
U = 0.6*(Lamda_U(:,4)- min(Lamda_U(:,4)))/(max(Lamda_U(:,4))-
min(Lamda_U(:,4)))+0.2;

input_Li = [L1 L2 L3]';
output_U3 = [U]';

%training parameter setup
% s is number of neuron in 1st hidden layer
h = 3;
% t = number of neuron in output layer
t = 1;

net = newff(minmax(input_Li),[h t],{'logsig' 'purelin'});
net.trainParam.epochs = 10000;
net.trainParam.show = 1000;
net.trainParam.goal = 0;
net.trainParam.min_grad=1e-100; %%Minimum performance gradient
net.trainParam.mu_inc = 5;
net.trainParam.mu_max = 1e100;
net.trainParam.mu = 0.0005;
net.trainParam.lr= .01;

%train
net = train(net,input_Li,output_U3);
a_U3 = sim(net,input_Li);

% denormalization
L1i = (L1-0.2)/0.6*(max(Lamda_U(:,1))-min(Lamda_U(:,1)))+ min(Lamda_U(:,1));
L2i = (L2-0.2)/0.6*(max(Lamda_U(:,2))-min(Lamda_U(:,2)))+ min(Lamda_U(:,2));
L3i = (L3-0.2)/0.6*(max(Lamda_U(:,3))-min(Lamda_U(:,3)))+ min(Lamda_U(:,3));
a_U3i = (a_U3-0.2)/0.6*(max(Lamda_U(:,4))-min(Lamda_U(:,4)))+ min(Lamda_U(:,4));
output_U3i = (output_U3-0.2)/0.6*(max(Lamda_U(:,4))-min(Lamda_U(:,4)))+
min(Lamda_U(:,4));

w_input = net.iw{1,1}
w_hidden = net.lw{2,1}
b_hidden = net.b{1}
b_output = net.b{2}

error = sum(a_U3i-output_U3i).^2/length(input_Li)*100
accuracy = 100-error
x = (1:length(input_Li));
figure(1)
plot(x,output_U3i,'o',x,a_U3i)
title('Strain Energy')
legend('Experimental data','Neural network model')

```

ภาพผนวกที่ ๓3 ตัวอย่าง Source code MATLAB สำหรับการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเค้นในชิ้นงานยาง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 มกราคม 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	2546-2549 วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน 2543-2546 วศ.บ (วิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป) ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
ประวัติการทำงาน	2552-ปัจจุบัน นักวิจัย: กลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิต พลาสติกและยาง ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2551-2552 อาจารย์: สาขาเทคโนโลยีเครื่องจักรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2549-2551 นักวิจัย (พนักงานมหาวิทยาลัย): สถาบันค้นคว้า และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDipt) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	2552 - โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สัญญาเลขที่ TGIST-01-52-012 2547 - โครงการวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (TRF-MAG) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MRG475E029

ผลงานวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

งานวิจัยที่ตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

- 30 January 2014 – Accepted for publication in Progress in Rubber, Plastics & Recycling Technology: Flow properties and melt distortion in molten rubber compounds under capillary extrusion: effects of vulcanizing systems and fillers.
- 15 January 2014 – Accepted for publication in Polymer and Polymer Composite: Development of hyperelastic model for weldlines containing natural rubber molded part.
- 2013 – An investigation of weldline strength in injection molded rubber parts. Energy procedia. 34: 767-774.
- 2011 – Influence of thermal and oil aging on weldline strength of NR/EPDM and NR/NBR blends. Kasetsart Journal: Natural Science. 45: 909-916.

2011 – Effects of filler contents and processing parameters on the weldline strength of compression molded natural rubber. Journal of Polymer Engineering and Science. 51: 2353–2359.

ผลงานในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

2013 – Effect of weldline on fatigue life of natural rubber parts. 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium.

2013 – Development of hyperelastic model for weldlines containing natural rubber molded part. The 4th International Conference on Multi-Functional Materials and Structures.

2013 – Flow properties and melt distortion in molten rubber compounds under capillary extrusion. The 4th International Conference on Multi-Functional Materials and Structures.

2012 – An investigation of weldline strength in injection molded rubber parts. 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium.

2010 – Effect of processing parameters on the weld line strength of compression molded natural rubber. 12th International seminar on Elastomer.

2010 – Weld line strength of acrylonitrile butadiene rubber processed by compression molding technique. The International Conference on Materials Processing Technology.

ผลงานในงานประชุมวิชาการระดับชาติ

2013 – Investigation on parameter affecting fatigue life of natural rubber products. 51th Kasetsart University Annual Conference.

2013 – Investigation on peel strength of compression overmolded rubber parts. 51th Kasetsart University Annual Conference.

2011 – Determination of optimum gate for injection mold using neural network and genetic algorithm. 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.

2011 – A prediction of weld line location in compression rubber parts using neural network model. 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand.

2010 – An investigation of weldline strength in natural rubber blends. 1st Polymer Conference of Thailand.

2010 – Effect of curing system and carbon black content on temperature profiles during rubber compression molding process. The 6th Thailand Materials Science and Technology Conference.