



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

**ปริญญา**

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

**สาขา**

**ภาควิชา**

**เรื่อง** การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบ  
โอเวอร์โมลด์ดิ้ง

Investigation on Peel Strength of Compression Overmolded Rubber Parts

**นามผู้วิจัย** นางสาวณัฐนันท์ งามสะอาด

**ได้พิจารณาเห็นชอบโดย**

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing. )

**หัวหน้าภาควิชา**

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing. )

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

**วันที่** ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

**สิขสิขจิ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ่ง

Investigation on Peel Strength of Compression Overmolded Rubber Parts

โดย

นางสาวณัฐนันท์ งามสะอาด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐนันท์ งามสอาด 2556: การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง  
ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing. 108 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติในกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग ด้วยวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่เป็นยางธรรมชาติ โดยศึกษาปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวนด์ ได้แก่ ระดับการคงรูป ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ปัจจัยจากกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์และระยะทางการไหลของยางคอมพาวนด์ อีกทั้งยังศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง ด้วยเทคนิคการเพิ่มผิวสัมผัสและเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูปที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะลดลง เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยจากยางคอมพาวนด์พบว่า ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น และจากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต พบว่า แรงดันปิดแม่พิมพ์และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงในการยึดเกาะที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาสัมผัสและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และจากการลดระยะทางในการไหล ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะของยางคอมพาวนด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษานำทางการพัฒนาการยึดเกาะโดยการสร้างรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อความแข็งแรงยึดเกาะที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งศึกษาแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่า ความแข็งแรงในการยึดเกาะขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ และความเปราะบางที่ใกล้เคียงกันของวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณา คือ ระยะเวลาของการฉายรังสีที่นานเกินไป ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ทำให้ความต้านทานต่อการดึงลอกลดต่ำลง และผลจากการนำยางสังเคราะห์ ได้แก่ ยาง SBR และยาง NBR มาใช้เป็นวัสดุซ้อนทับ พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานขึ้นอยู่กับสมบัติการยึดติดกัน และความเข้ากันได้ระหว่างยางทั้งสองประเภท นอกจากนี้จากผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงยึดเกาะพบว่า ผลที่ได้มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง มีสาเหตุมาจาก สมมติฐานของแบบจำลองจะต้องมีการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ และชิ้นงานยางจะต้องมีอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาที่ยางสัมผัสกันซึ่งแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นจริง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Natanan Ngarmsa-ard 2013: Investigation on Peel Strength of Compression Overmolded Rubber Parts. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 108 pages.

The objective of this work was to investigate the bond strength of natural rubber part processed by compression overmolding. The influences of compound formulation and processing parameter such as degree of cure, filler type and content, mold temperature and clamping pressure were our main interest. Furthermore, in order to enhance the bond strength of compression overmolded rubber part, the increasing contact area by using the different surface pattern of substrate and the UV irradiation technique were employed. It can be seen that the bond strength decreased with the increasing degree of cure, while the increase of filler loading in substrate and overmolded rubber tended to increase the bond strength. Considering the effect of processing parameters, it was found that the bond strength increased with the increasing clamping pressure and mold temperature. As a result of the increasing contact area by using the different surface pattern of substrate materials, the bond strength significantly increased. However, from the results obtained by using the UV irradiation technique, the results suggested that the bond strength depends significantly not only on the polarity of material but also the compatibility between them. In addition, it should be noted that the degradation of substrate material can occurs during the long term exposure to UV irradiation treatment which resulting in the decrease of bond strength. It can be suggested that the peel strength of NR overmolded by SBR and NBR was not only depend on the tack property but also the compatibility between a pair of rubbers. In this work, the mathematical model has been developed by using kinetic model for vulcanization and extensively verified against the exiting experimental data. A satisfying agreement between the analytical and experimental results indicated that the proposed model can be employed as a valuable tool for the prediction of peel strength. However, the differences were observed which resulted from some parameters and assumptions made in the derivation of the equation, which could led to errors in the calculations.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำอย่างดียิ่งของคณาจารย์หลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พัทธพันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในทุกๆ ด้านและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาดังกล่าว มาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี รวมถึงอาจารย์วัลลภ หาญณรงค์ชัย ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษาที่เป็นแนวทางในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนขอเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบพระคุณสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร และสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (SPR) ประจำปี 2554 สัญญาเลขที่ RDG5250035

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว พี่นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing Research; PaRP-Group) และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน ตลอดจนคอยให้กำลังใจ งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและประเทศชาติได้เป็นอย่างดี หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นประโยชน์แก่ผู้ใดก็ตาม ข้าพเจ้าขอยกความดีให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัวของข้าพเจ้า ตลอดจนคณาจารย์ผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมทั้งผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ณัฐนันท์ งามสอาด

กันยายน 2556

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	51
สรุป	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง	86
ภาคผนวก ข สมบัติของยางก่อนการคงรูป	89
ภาคผนวก ค อิทธิพลของปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	91
ภาคผนวก ง อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	93
ภาคผนวก จ อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	95
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ ของยาง ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	97
ภาคผนวก ช การศึกษาสมบัติการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์	104
ภาคผนวก ซ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงยึดเกาะ	106
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	108

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตแต่ละช่วงความยาวคลื่น	26
2	พลังงานในการสลายพันธะภายในสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์	28
3	พลังงานการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	29
4	สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัย	36
5	ปัจจัยจากยางคอมพาวนด์	40
6	ปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์	40
7	ปัจจัยความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ	41
8	ระยะทางการไหลและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก	44
9	ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ	70
ตารางผนวกที่		
ข1	อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	90
ข2	อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	90
ค1	อิทธิพลของระดับการคงรูปของยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ	92
ค2	ชนิดและปริมาณสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	92
ง1	แรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมปริมาณ 30 phr	94
ง2	อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 30 phr และ 60 phr	94
ง3	ระยะทางการไหลที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ ปริมาณ 30 phr	94
จ1	อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	96

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ฉ1	ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด	98
ฉ2	ผลการทดสอบสมบัติความสามารถในการยึดออก	98
ฉ3	ผลการทดสอบค่ามอดูลัส	99
ฉ4	ผลทดสอบความแข็ง	99
ฉ5	สมบัติการบวมตัว	100
ฉ6	ค่ามูมสัมพัทธ์เฉลี่ย	100
ช1	อิทธิพลของชนิดยางที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	105
ช1	ความแข็งแรงยึดเกาะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	107
ช2	ความแข็งแรงยึดเกาะจากผลการทดลอง	107

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างยางธรรมชาติ	4
2	สูตรโครงสร้างของยางสไตรีนบิวตาไดอีน	5
3	สูตรโครงสร้างของยางไนไตรล์	6
4	โครงสร้างการเชื่อมขวาง	8
5	เครื่องบดผสมยาง	13
6	ส่วนประกอบของเครื่องมุนนี่	13
7	ตัวอย่างกราฟที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืดมุนนี่ของยาง	14
8	เครื่องทดสอบหาเวลาคงรูปของยาง	16
9	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง MDR และการคำนวณระยะเวลาในการคงรูปที่ระดับต่าง ๆ	17
10	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	18
11	กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป	19
12	กระบวนการฉีดขึ้นรูป	20
13	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ้ง	21
14	เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง	21
15	การอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งโดยออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการเชื่อมติดแบบเชิงกล	23
16	แรงวันเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ	23
17	การแพร่ข้ามของสายโซ่โพลิเมอร์ทำให้ผิวสัมผัสกลายเป็นเนื้อเดียวกัน	24
18	การกระตุ้นแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการกายภาพทางแสง	27
19	รายละเอียดของความยาวคลื่นที่ 300 nm ในสเปคตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	29
20	สายโซ่โพลิเมอร์ยาง	30
21	ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง ODR หรือ MDR	32
22	เครื่องอัดขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย	37
23	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้งที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	37
24	ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ้ง	38

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	39
26	ศึกษาระยะทางการไหล (flow length) ของวัสดุซ้อนทับ	41
27	(ก) เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต และ (ข) หลอดเมอร์คิวรี	42
28	แบบจำลองสามมิติของอินเลอร์ทภายในแม่พิมพ์	43
29	ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะที่มีลักษณะพื้นผิวยึดเกาะ แบบต่าง ๆ	43
30	เครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer	45
31	ลักษณะการหยดน้ำลงบนพื้นผิวตามมาตรฐาน ASTM D5946-04	46
32	เครื่องวัดมุมสัมผัส	46
33	เครื่องทดสอบความแข็ง	47
34	ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C)	48
35	ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ	49
36	การทดสอบสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ โดยใช้เครื่องทดสอบ อเนกประสงค์ของบริษัท Cometech รุ่น OC-506 BA	50
37	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะในการดึงลอก	50
38	ค่าความเหนียวของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมในชนิด และปริมาณต่าง ๆ กัน	52
39	(ก) เวลาเริ่มคงรูป และ (ข) เวลาคงรูป ของยางธรรมชาติที่ผสมสาร ตัวเติมในชนิด และปริมาณต่าง ๆ กัน	53
40	ลักษณะของวัสดุพื้นที่ระดับการคงรูป	54
41	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ระดับการคงรูป วัสดุพื้นต่าง ๆ	55
42	แบบจำลองกลไกการแทรกตัวที่หน้าสัมผัสในกระบวนการโอเวอร์- โมลด์	55
43	แบบจำลองชั้นการคงรูปของยางที่เกิดขึ้นบริเวณที่ชั้นผิวของวัสดุพื้น	55
44	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม ใน ชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน	57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ ใน ปริมาณ 30 phr ที่แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ	58
46	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ ใน ปริมาณ 30 และ 60 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	59
47	ระดับการคงรูปของยางผสมเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	59
48	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของวัสดุซ้อนทับที่ยังไม่เริ่มคงรูป ของ ยางผสมเขม่าดำ ในปริมาณ 30 phr ที่ระยะทางการไหลต่าง ๆ	60
49	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุ พื้นและวัสดุซ้อนทับของอินเลอร์รูปแบบต่าง ๆ	62
50	ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานที่ใช้อินเลอร์แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล เมื่อวางชิ้นงานให้มีระยะทางการไหล 11 mm	62
51	ผลการทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสาร ตัวเติมและผสมสารตัวเติมก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV	65
52	ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวของวัสดุพื้นยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสาร ตัวเติม ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่เวลาต่าง ๆ กัน	66
53	ชนิดของยางคูโอเวอร์โมลในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อ ความแข็งแรงยึดเกาะ	66
54	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย รังสี UV	67
55	พื้นผิววัสดุพื้นของยางไม่ผสมสารตัวเติม	68
56	คูโอเวอร์โมลที่ศึกษากรณีพื้นยางรองเท้าระหว่างวัสดุพื้นยางผสมซิลิกา และวัสดุซ้อนทับเป็นยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต	69
57	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกในกรณีศึกษาพื้นยางรองเท้า	69
58	กรณีศึกษาค่ามุมสัมผัสที่ใกล้เคียงกันระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ	70
59	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มีค่ามุม สัมผัสใกล้เคียงกันที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลาต่าง ๆ	71

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์	72
61	ผลการทำนายความแข็งแรงยึดเกาะที่อุณหภูมิต่ำ	75
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	รายละเอียดขนาดแม่พิมพ์	87
ก2	รายละเอียดส่วนประกอบแม่พิมพ์	87
ก3	รายละเอียดขนาด bottom plate	88
ก4	รายละเอียดขนาด top plate	88
ฉ1	ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม $\text{CaCO}_3$	101
ฉ2	ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม $\text{SiO}_2$	102
ฉ3	ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม CB	103

### คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ

ASTM	=	American society for testing and materials
CaCO <sub>3</sub>	=	calcium carbonate
SiO <sub>2</sub>	=	silica
CB	=	carbon black
ZnO	=	zinc oxide
CBS	=	N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide
ISO	=	International Organization for Standardization
M <sub>max</sub>	=	maximum torque
M <sub>min</sub>	=	minimum torque
NR	=	Natural Rubber
NBR	=	Acrylonitrile Butadiene Rubber
SBR	=	Styrene Butadiene Rubber
°C	=	degree celsius
ODR	=	Oscillating Disk Rheometer
MDR	=	Moving Die Rheometer
phr	=	parts per hundred of rubber
STR 5L	=	Standard Thai Rubber 5L
t <sub>scorch</sub>	=	scorch time
FTIR	=	Fourier Transform Infrared Spectrometer
hr.	=	hours
kPa	=	kilo pascal
min	=	minute
N	=	newton
N/m	=	newton per meter
N/m <sup>2</sup>	=	newton per square meter
nm	=	nanometer
UTM	=	Universal Testing Machine
UV	=	ultraviolet

## การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

### Investigation on Peel Strength of Compression Overmolded Rubber Parts

#### คำนำ

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตของภาคอุตสาหกรรมที่สำคัญทั้งในระดับภูมิภาคและในระดับโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ มีการลงทุนจากต่างชาติและสามารถสร้างรายได้เข้าประเทศปีละจำนวนมาก ทำให้ภาคอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น หรือมีสีสันทที่สวยงาม จึงจำเป็นต้องใช้อย่างต่างชนิดมาประกอบกัน รวมถึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิตและวัสดุศาสตร์มากขึ้น ทั้งในส่วนการพัฒนาสูตรยาง (rubber formulation) ที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น สำหรับในการผลิตช่วงล่างของรถยนต์ที่ต้องมีสมบัติทนทานต่อความร้อนและสภาพแวดล้อม เป็นต้น หรือการนำยางต่างชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกันเข้ามาผสมรวมกัน (rubber blend) (Chiu and Tsai, 2005) และในส่วนของการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่มีสีสันท หรือต้องการสมบัติในแต่ละส่วนของผลิตภัณฑ์ต่างกัน มีการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ (overmolding technique) (Todd, 2009) โดยข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถประยุกต์เข้ากับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศ ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (transfer molding) รวมถึงกระบวนการอัดรีดแบบอัดรีดร่วม (co-extrusion) สำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ แบ่งเป็นการขึ้นรูปวัสดุพื้น (substrate material) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ (overmolded material) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การใช้ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตาไดอีนเป็นหน้ายางรถยนต์ การใช้ยางธรรมชาติเป็นชั้นเสริมความแข็งแรงในท่อยาง หรือการใช้สีของยางที่แตกต่างกันในการเพิ่มความสวยงามของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันยังคงพบปัญหาเมื่อนำไปใช้งาน คือ ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงในการยึดเกาะต่ำ ทำให้เกิดการขาดหรือลอกออก (delamination) บริเวณที่ยางสัมผัสกัน จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามีการศึกษาปรับปรุงผลิตภัณฑ์ด้านเทอร์โมพลาสติกกันอย่างกว้างขวางทั้งการปรับปรุง หรือเตรียมวัสดุพื้นให้เหมาะสมในการผลิต การใช้ปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิด (Arzondo *et al.*, 2004; Venkataswam and Gu, 2006; Fabrin *et al.*, 2007; Dondero *et al.*, 2009) เป็นต้น ในขณะที่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์-

โพลีดีนที่เป็นวัสดุยางยังพบได้น้อยมาก โดยส่วนใหญ่ศึกษาเกี่ยวกับการยึดเกาะกันระหว่างยางกับโลหะ (Sasidharan *et al.*, 1999; Persson *et al.*, 2003) และการพัฒนาแนวทางในการปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุยางกับยางเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การนำเทคนิคการปรับปรุงสภาพพื้นผิว (surface modification) เข้ามาเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะซึ่งมีอยู่หลายเทคนิค เช่น การใช้สารเคมี (chemical treatment) เทคนิคพลาสมา (plasma treatment) (Romero-Sanchez and Martín-Martínez, 2005) เทคนิคโคโรน่า (corona treatment) (Oosterom *et al.*, 2006) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังคงไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากนัก เนื่องจากสิ้นเปลืองเวลาและพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้บางเทคนิคต้องใช้สารเคมีหรือวิธีการที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามแนวทางแก้ปัญหาในปัจจุบันยังคงใช้การลองผิดลองถูก (trial and error) ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทั้งในส่วนของเวลาและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยขาดองค์ความรู้ที่จำเป็นสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง ประกอบไปด้วยความรู้ในด้านการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสม (mold design) สมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุที่ใช้ (materials compatibility) และการปรับตั้งค่าในกระบวนการผลิต (processing parameter) ที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการยึดเกาะ ได้แก่ อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันปิดแม่พิมพ์ เป็นต้น รวมถึงศึกษาปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ที่มีผลต่อสมบัติการยึดเกาะ ซึ่งได้แก่ ระดับการคงรูป ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม รวมถึงศึกษาระยะทางการไหลของยาง นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของชนิดของยางที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก รวมไปถึงพัฒนาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะโดยใช้เทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ และเทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation, UV) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ไม่ต้องใช้สารเคมี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตของภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศรวมถึงใช้ในงานวิจัยในอนาคต

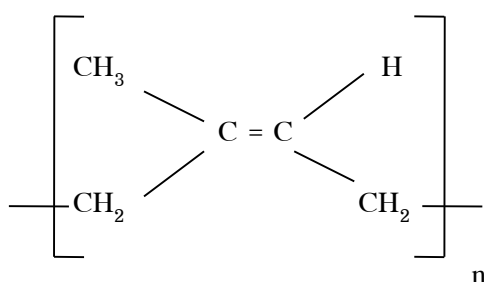
## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติการยึดเกาะระหว่างวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์
2. เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงหรือเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยเทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ และเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต
3. เพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยาง ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

## การตรวจเอกสาร

### 1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากได้มาจากต้นยางพารา ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ มีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยโมเลกุลของคาร์บอนและไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยใน 1 โมเลกุล ประกอบไปด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรงที่ตำแหน่ง Cis-1,4 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติอยู่ที่ 200,000 ถึง 500,000 กรัมต่อโมล มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง (วราภรณ์, 2552) และมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะสายโซ่โมเลกุลของยางบางส่วนเกิดการจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ จึงสามารถเกิดเป็นผลึก (crystallization) ตัวอย่างเช่น การเกิดผลึกเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) ในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $20^{\circ}C$  เป็นเวลานาน โดยอัตราการเกิดผลึกมากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-26^{\circ}C$  ซึ่งการเกิดผลึกนี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น ไม่สามารถนำยางไปผสมเข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้การเกิดผลึกของยางธรรมชาติยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับการยืดดึง (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป จากสภาพโปร่งแสง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) จากปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (พงษ์ธร, 2548) ตัวอย่างเช่น มีการต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) การทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) เพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางเป็นระเบียบตามทิศทางที่ได้รับแรงดึง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม และอัตราการยืดดึง เป็นต้น (Fuller and Fulton, 1990) นอกเหนือจากสมบัติดังกล่าวแล้ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเด่นในด้านความยืดหยุ่น (elasticity) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) และสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) รวมถึงความเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น



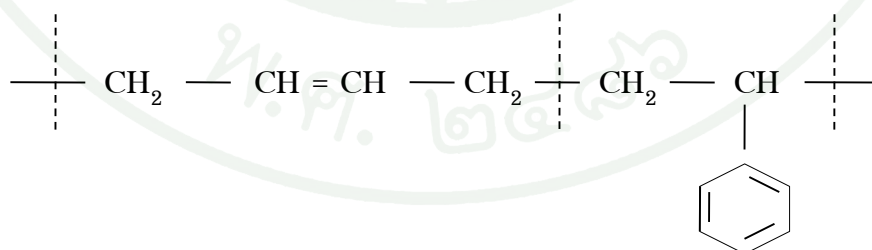
ภาพที่ 1 โครงสร้างยางธรรมชาติ

อย่างไรก็ตามโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลหลักของยางธรรมชาติมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว หรือพันธะคู่ (unsaturated or double bonds) อยู่มาก ดังนั้น จึงมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดด (aging properties) อีกทั้งองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน (benzene) เฮกเซน (hexane) และโทลูอีน (toluene) เป็นต้น แต่ทั้งนี้ยางธรรมชาติเริ่มมีการละลายลดลงเมื่อนำยางไปผ่านกระบวนการคงรูป เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ดังนั้นจึงเกิดเฉพาะเพียงการบวมตัวเท่านั้น

## 2. ยางสังเคราะห์

### 2.1 สไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

ยางสไตรีนบิวตาไดอีน เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมโคพอลิเมอร์ระหว่างมอนอเมอร์ของสไตรีน (styrene monomer) และบิวตาไดอีน (butadiene monomer) ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรซ์เซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน (random copolymer) รวมทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางสไตรีนบิวตาไดอีน จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่เกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง ทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดต่ำ ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล และเพิ่มอายุการใช้งานที่นานขึ้น



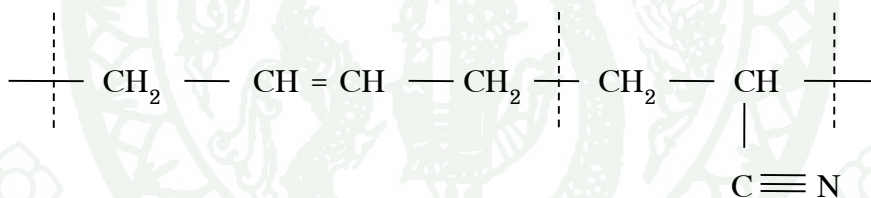
ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของยางสไตรีนบิวตาไดอีน

ยางสไตรีนบิวตาไดอีน มีคุณภาพสม่ำเสมอ สิ่งเจือปนน้อย ไม่จำเป็นต้องบดยาง (mastication) ให้นิ่มก่อนผสมสารเคมียาง เนื่องจากถูกสังเคราะห์มาให้น้ำหนักโมเลกุลไม่สูง รวมทั้งมีความหนืดไม่มากนัก อย่างไรก็ตามยางสไตรีนบิวตาไดอีน มีสมบัติความเหนียวติดกัน (tack property) ที่ต่ำ และเป็นยางประเภทไม่มีขั้ว (non-polar rubber) จึงนิยมนำไปบดผสมกับ

ยางธรรมชาติ เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น นอกจากนี้ยางสไตรีนบิวตาไดอีนไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือสารละลายไม่มีขั้ว อีกทั้งยังมีสมบัติต่อต้านความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดดเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ส่วนมากยางสไตรีนบิวตาไดอีน มีการนำไปใช้งานหลากหลาย ตัวอย่างเช่น ใช้ในการผลิตพื้นรองเท้า ผลิตภัณฑ์รวมถึงนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อของยานพาหนะขนาดเล็ก เป็นต้น

## 2.2 ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR)

ยางไนไตรล์ เป็นยางสังเคราะห์ที่เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างมอนอเมอร์ของอะไครโลไนไตรล์ (acrylonitrile monomer) และมอนอเมอร์ของบิวตาไดอีน (butadiene monomer) โครงสร้างโมเลกุลแบ่งเป็นสองส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งในส่วนของอะไครโลไนไตรล์จะประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันไซยาไนด์ (-CN) ทำให้ยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง จึงทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี ขณะที่ส่วนของบิวตาไดอีน จะเป็นส่วนที่ทำให้ยางมีสมบัติความยืดหยุ่นดี รวมถึงเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมขวางในปฏิกิริยาครูป



ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของยางไนไตรล์

ยางไนไตรล์ไม่สามารถตกผลึกได้ในขณะดึงยืด ส่งผลให้มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และสมบัติความต้านทานต่อแรงฉีกขาดต่ำ เมื่อนำไปใช้จึงต้องผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรงเพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และเนื่องจากยางไนไตรล์ ทนต่อความเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี อีกทั้งยางไนไตรล์ มีความเป็นขั้ว (polar rubber) จึงทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไม่มีขั้วอื่น ๆ ได้ดี อย่างไรก็ตามหากปริมาณอะไครโลไนไตรล์สูง สมบัติการกระด้างกระดอน อัตราการซึมผ่านของก๊าซ รวมถึงการยุบตัวเนื่องจากการอัด (compression set) ต่ำลงโดยทั่วไปแล้วยางไนไตรล์ ถูกนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ยกตัวอย่างเช่น ปะเก็นน้ำมัน สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน และพื้นรองเท้า เป็นต้น

### 3. สารเคมียาง

กระบวนการคงรูปยางหรือกระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) เป็นกระบวนการคงรูปที่มีการเชื่อมขวางเกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง โดยมีสารเคมีเป็นตัวช่วยให้เกิดการคงรูป เพื่อแปรรูปยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก ดังนั้นในการนำยางไปใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents) สารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) สารกระตุ้น (activator) และสารตัวเติม (filler) เป็นต้น ตามอัตราส่วนและลำดับการผสม จากนั้นยางที่ได้จะเรียกว่า ยางคอมพาวนด์ ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน โดยสารเคมียางสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

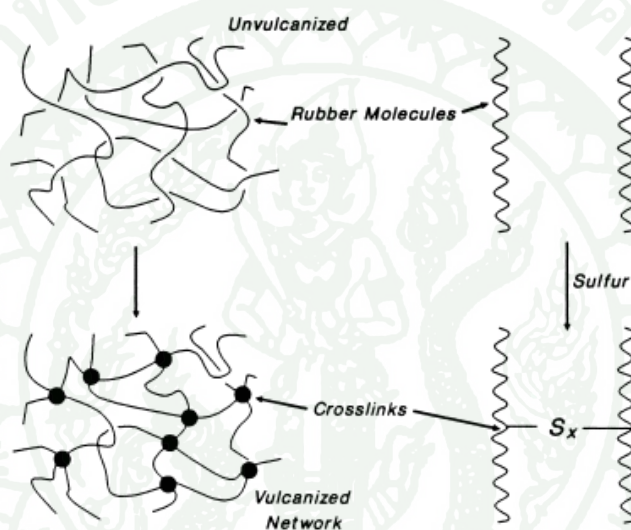
#### 3.1 สารช่วยในการคงรูป (vulcanizing or curing agents)

สารช่วยในการคงรูปผสมลงไปในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีสมบัติความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ทั้งนี้สารเคมีที่ช่วยในการคงรูปที่ใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบการคงรูปโดยใช้กำมะถัน (sulfur) ระบบการคงรูปโดยใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบการคงรูปด้วยสารอื่น ๆ เป็นต้น ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของสารเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการคงรูป อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป และความหนาของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

##### 3.1.1 ระบบการคงรูปโดยใช้กำมะถัน (sulfur)

ระบบการคงรูปโดยใช้กำมะถัน เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะมีต้นทุนต่ำ และการคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว นิยมใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ประเภทไม่อิมตัว หรือมีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โพลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น ยางธรรมชาติ (NR) หรือยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) เป็นต้น ซึ่งกำมะถันเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยยางที่ผ่านการคงรูปด้วยกำมะถันแล้วมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีข้อด้อยในเรื่องสมบัติความต้านทานต่อความร้อน เนื่องจากกำมะถันสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นสัดส่วนของการใช้กำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการคงรูปยาง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดพันธะเคมีที่เกิดขึ้น โดยที่สัดส่วนสูงคือใช้กำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย ซึ่งเรียกว่าระบบดั้งเดิม

(Conventional Vulcanization, CV system) พันธะเคมีที่เกิดขึ้นแบบ polysulfidic crosslinks และแบบ cyclic แต่หากเป็นกรณีสัดส่วนต่ำคือใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมาก เรียกว่า ระบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization, EV system) พันธะเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแบบ monosulfidic crosslinks นอกจากนี้ยังมีอีกระบบคือ ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV system) ซึ่งอยู่ระหว่างสองระบบข้างต้น พันธะเคมีแบบ polysulfidic ทำให้อย่างที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อน ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบ monosulfidic หรือ disulfidic ให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า แต่มีความต้านทานต่อความร้อนได้ดี



ภาพที่ 4 โครงสร้างการเชื่อมขวาง

ที่มา : Mark *et al.* (2005)

### 3.1.2 ระบบการคงรูปโดยใช้เพอร์ออกไซด์

ระบบการคงรูปโดยใช้เพอร์ออกไซด์ เป็นระบบการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับยางที่มีความอึดตัวหรือไม่มีพันธะคู่ภายในสายโซ่โมเลกุล เช่น ยางเอธิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene propylene, EPM) ยางยูรีเทน (Polyurethane, AU) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและความร้อนสูง เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะที่สูงกว่าพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถัน ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการบลูมของสารเคมีต่างๆ ไม่ทำให้อย่างเกิดการเปลี่ยนสี (discoloration) อีกทั้งมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงได้ดี เป็นต้น

### 3.1.3 ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ

ระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่นๆ เช่น ระบบการใช้อูเรเทน (urethane) เทลลูเรียม (tellurium) ซีลีเนียม (selenium) โลหะออกไซด์ (metallic oxides) รวมทั้งการใช้สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (difunctional compounds) ตัวอย่างเช่น เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl Thiuram Disulfide, TMTD) ไดไทโอดิมอร์ฟอรีน (Dithio dimorpholine, DTDM) และไดเพนตะเมทิลีนไทยแรมเตตระซัลไฟด์ (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide, DPTT) เป็นต้น

### 3.2 สารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูป (accelerators)

การใช้สารช่วยในการคงรูปเพียงอย่างเดียว ต้องใช้เวลาในการคงรูปที่ยาวนานมาก ดังนั้นการใช้สารตัวเร่งจะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป โดยเฉพาะในระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเนื่องจากเป็นระบบที่ต้องใช้เวลาในการคงรูปนานและใช้ปริมาณกำมะถันสูง การใช้สารเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดระยะเวลาและปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการคงรูป ทั้งนี้แบ่งสารเร่งปฏิกิริยาตามการใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียว (primary accelerator) และการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสองตัวร่วมกัน ตัวอย่างการใช้งานสารเร่งปฏิกิริยาสองตัวร่วมกัน เช่น การใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่ให้เวลาเริ่มคงรูปช้า (delayed scorch) หรือให้สมบัติเชิงกลหลังผ่านการคงรูปร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาที่มีการคงรูปเร็ว โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารตัวเร่ง คือไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซอลซัลฟิनाไมด์ (N-Cyclohexyl Benzothiazole-2-Sulfenamide, CBS) สารชนิดนี้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มเบนโซไทอะซอลซัลฟิनाไมด์ (benzothiazole sulfenamide) ที่ชะลอการเกิดปฏิกิริยาคงรูปยาง (delayed-action accelerator of vulcanization) ทำให้กระบวนการขึ้นรูปจะดำเนินไปอย่างปลอดภัยมากขึ้น เนื่องจากยางสามารถไหลได้เต็มแม่พิมพ์ก่อนถึงเวลาเริ่มคงรูปยางที่ได้จากการคงรูปด้วยสารตัวเร่งกลุ่มนี้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูง ส่งผลให้ยางที่ได้มีความแข็งแรงสูง ความยืดหยุ่นดี มีความต้านทานต่อความล้าสูง

### 3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)

สารกระตุ้น เป็นสารช่วยกระตุ้นสารตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic) โดยสารอนินทรีย์ที่นิยมใช้ คือซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เลดออกไซด์ (Lead oxide, PbO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium

oxide, MgO) ขณะที่สารกระตุ้นประเภทสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือกรดไขมัน (fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) เป็นต้น เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการคงรูปยางให้เร็วขึ้น โดยทำให้สารเร่งไวต่อปฏิกิริยาและเร่งอัตราการคงรูปยางให้เร็วขึ้น นอกจากนี้สารกระตุ้นปฏิกิริยายังนิยมใช้ร่วมกัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) กับกรดสเตียริก (stearic acid) เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบที่ละลายในยางได้ง่าย ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

### 3.4 สารตัวเติม (fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อและลดต้นทุนการผลิตในยางคอมพาวนด์และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) การสึกหรอ (abrasion resistance) เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรก คือ สารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non reinforcing filler) ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่มีอันตรกิริยากับเนื้อยางเมื่อใส่ลงไปแล้วยางแล้วทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น ดินขาว (white clay) ทัลคัม (talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วนิยมผสมสารตัวเติมกลุ่มนี้เพื่อลดต้นทุนในการผลิต กลุ่มที่สอง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความหนืดของยางคอมพาวนด์ และปรับปรุงสมบัติของยางคงรูป ตัวอย่างเช่น ผงเขม่าดำ (carbon black) และซิลิกา (silica) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้สารตัวเติมคือ เขม่าดำ ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสารตัวเติมแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันดังนี้

เขม่าดำ (carbon black) เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีการนำมาใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรม มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ถึง 500 nm มีรูปร่างเป็นทรงกลม อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (aggregate) ทั้งนี้เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูง ที่ผิวของอนุภาคมีอันตรกิริยากับเนื้อยางได้ดี จะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ดีกว่า และเวลาในการคงรูปเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กส่งผลให้ความหนืดของยางคอมพาวนด์สูงขึ้นส่งผลให้การบดผสมเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) เพื่อช่วยให้เขม่าดำกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีขึ้น นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเมื่อบดผสมเข้ากับยางแล้ว เขม่าดำยังเพิ่มสมบัติการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางธรรมชาติและยางไฮดรินบิวตาไดอีน ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุล

ซิลิกา (silica) เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีสีอ่อนที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยาง โดยซิลิกาจะช่วยเพิ่มสมบัติเช่นเดียวกับกับสารตัวเติมเขม่าดำ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลแล้วพบว่า ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวที่เท่ากับกับเขม่าดำจะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยาต่ำกว่าเขม่าดำ แต่อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสีนวลสวยงาม โปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีจึงนิยมนำสารตัวเติมเสริมแรงด้วยซิลิกาเข้ามาใช้ในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมพื้นรองเท้า เป็นต้น ในปัจจุบันมีการใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาด และสมบัติความกระด้างกระดอน ซึ่งช่วยลดแรงเสียดทาน ทำให้นำมาใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์ อย่างไรก็ตามบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่จำนวนมาก พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงมาก ทำให้การบดผสมซิลิกากับยางจึงต้องใส่สารเคมี ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene Glycol, DPG) หรือพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol, PEG) ลงไปในยางคอมพาวนด์เพื่อช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกา และยังช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป (พงษ์ธร, 2550; Leblanc, 2002)

แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำและซิลิกา ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา นิยมใช้เพื่อเพิ่มเนื้อยางหรือลดต้นทุนในกระบวนการผลิต การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นปานกลาง การผสมแคลเซียมคาร์บอเนตยังทำให้เวลาในการคงรูปของยางลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติความเป็นด่างซึ่งสามารถช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของรูป (พงษ์ธร, 2550)

### 3.5 สารช่วยในกระบวนการผลิตและสารทำให้ยางนิ่ม (processing aids/ softeners)

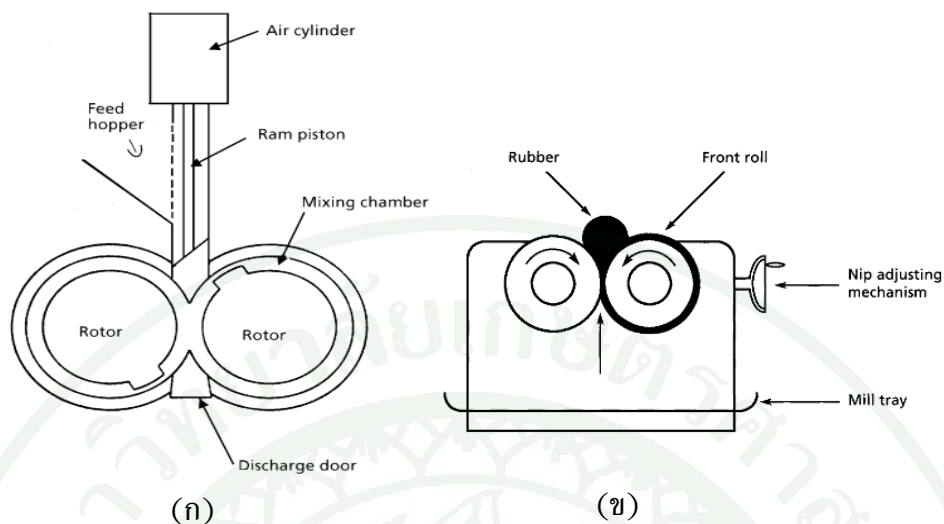
สารช่วยในกระบวนการผลิตถูกเติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมบางชนิด โดยเฉพาะสารตัวเติมประเภทเสริมแรงเมื่อผสมลงไปในเนื้อยางมักทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การบดผสมเข้ากันได้ยาก การผสมสารช่วยในกระบวนการผลิตจะช่วยทำให้ยางมีความหนืดลดลง สามารถบดผสมเข้ากันได้ง่ายและมีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดี ซึ่งในการเลือกใช้สารตัวเติมจำเป็นต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ราคาหรือประสิทธิภาพ ตัวอย่างสารช่วยในกระบวนการผลิต เช่น สารจำพวกน้ำมัน (oils) และพาราฟิน (paraffin) เป็นต้น

### 3.6 องค์ประกอบอื่น ๆ (miscellaneous ingredients)

นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักข้างต้นแล้ว ในบางกรณีอาจมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปใ้ในยางเพื่อจุดประสงค์เฉพาะด้าน เช่น ต้องการใ้ยางมีสีส่นที่สวยงามโดยการใ้สี (pigments) หรือสารทำใ้เกิดฟอง (blowing agents) เพื่อทำใ้ยางมีรูพรุน นอกจากนี้ยังมีการใ้สารหน่วง (retardants) เพื่อลดหรือชะลอความว่องไวของสารเร่งในระหว่างการเก็บรักษาหรือในขั้นตอนของการบดผสม และสารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (antistatic agents) ของยางเป็นต้น

## 4. ทฤษฎีการบดผสมยาง (theory of mixing)

การบดผสมยางเป็นกระบวนการผสมสารเคมีเข้ากับยาง โดยการบดยางธรรมชาติใ้ نرم เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดของยาง ทำใ้สารเคมีสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ทั่วถึง ในขณะที่ยางสังเคราะห์อาจไม่จำเป็นต้องทำการบด เนื่องจากการสังเคราะห์สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลได้ โดยขั้นตอนการบดผสมสารเคมีต่างๆ ในยางนั้นต้องจัดลำดับการผสมอย่างถูกต้อง กล่าวคือ สารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่บดผสมกับยางใ้ยาก ต้องเติมเป็นลำดับแรก ในขณะที่สารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูปควรเติมเป็นลำดับสุดท้าย เพื่อป้องกันยางคงรูปก่อนเวลา ทั้งนี้การบดผสมยางเข้ากับสารตัวเติมในปริมาณมาก อาจใ้สารช่วยในกระบวนการผลิตเพื่อลดความหนืดของยาง เพื่อใ้สารตัวเติมสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางใ้ดีขึ้น ยางที่บดผสมสารเคมีแล้วควรเก็บใ้ไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ดังนั้นการบดผสมยางใ้เข้ากับสารเคมีจึงจำเป็นต้องใ้เครื่องบดผสม โดยขั้นตอนการบดผสมสารเคมีต่างๆ ในยางนั้นต้องจัดลำดับการผสมอย่างถูกต้อง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบคือ เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถบดได้ในปริมาณมาก และควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบดผสมใ้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) ซึ่งนิยมใ้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กเนื่องจากมีราคาถูก แต่การบดผสมกับเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ยังคงต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิและการฟุ้งกระจายของสารเคมีในระหว่างการบดผสม



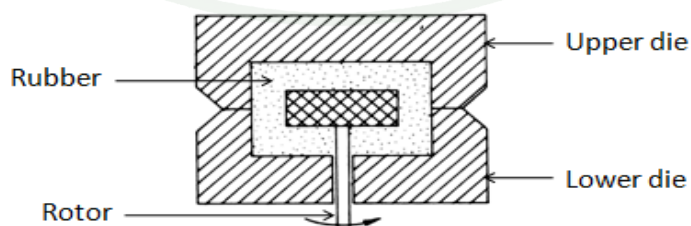
ภาพที่ 5 เครื่องบดผสมยาง (ก) ระบบปิด และ (ข) ระบบเปิด

ที่มา: Funt (2009)

## 5. การทดสอบสมบัติยางคอมพาวนด์

### 5.1 เครื่องมือวัดความหนืดมูนนี่ของยาง (mooney viscometer)

เครื่องมือวัดความหนืดมูนนี่ของยางใช้ทดสอบคุณภาพหรือสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ โดยอาศัยหลักการวัดแรงบิด (torque) ระหว่างจานหมุนกับยาง ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยเครื่องทำงานด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนจานหมุนที่อยู่ในห้องใส่ยาง (chamber) ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่กำหนดไว้ ตามมาตรฐาน ASTM D1646

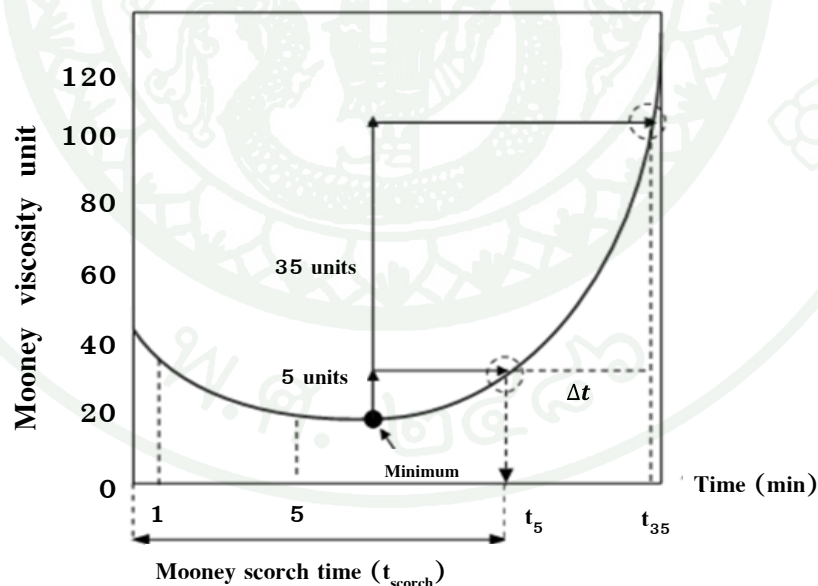


ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของเครื่องมูนนี่

ที่มา : Mark *et al.* (2005)

ขั้นตอนการวัดความหนืดมูนนี่คือ นำยางคอมพาวนด์วางในห้องทดสอบ หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่ยางประมาณ 1 นาที เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ จานโลหะ (rotor) จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ  $2 \pm 0.02$  รอบต่อนาที และนิยามอ่านค่าหลังจากจานโลหะหมุนไปได้ 4 นาที ซึ่งลักษณะของผลที่ได้จากเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ของยาง ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยหลักการในการการหมุนของจานโลหะที่มียางห่อหุ้มอยู่ ทำให้เกิดแรงบิด (torque) ระหว่างพื้นผิวของจานโลหะกับพื้นผิวของตาย ซึ่งมีไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดขนาดของการเคลื่อนที่ดังกล่าวออกมาเป็นหน่วย ที่เรียกว่า ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) กำหนดให้แรงบิดขนาด  $8.30 \pm 0.02$  นิวตัน-เมตร (N·m) เทียบเท่ากับค่าความหนืด 100 มูนนี่ โดยการรายงานผลการทดสอบแสดงดังตัวอย่างเช่น 40 ML 1+4 (100°C) โดยที่

- 40 M = ค่าความหนืดมูนนี่ของยาง (มูนนี่)  
 L = จานหมุนโลหะขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนโลหะขนาดเล็กจะใช้อักษร S)  
 1 = ระยะเวลาในหน่วยนาทีที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนการทดสอบ  
 4 = ระยะเวลาในหน่วยนาทีที่ใช้ในการอ่านค่าทดสอบความหนืด  
 100°C = อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 7 ตัวอย่างกราฟที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ของยาง

กราฟความหนืดมูนนี่สามารถใช้หาค่าความหนืดมูนนี่และเวลาที่ยางสามารถไหลได้ (scorch time,  $t_{\text{scorch}}$ ) รวมทั้งสมบัติในการคงรูป เช่น ดัชนีการคงรูป (cure index) ดังสมการที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ

$$t_{\text{scorch}} (t_5) = \text{minimum} + 5 \text{ units} \quad (1)$$

$$t_{35} = \text{minimum} + 35 \text{ units} \quad (2)$$

$$\text{cure index } (\Delta t) = t_{35} - t_5 = t_{30} \quad (3)$$

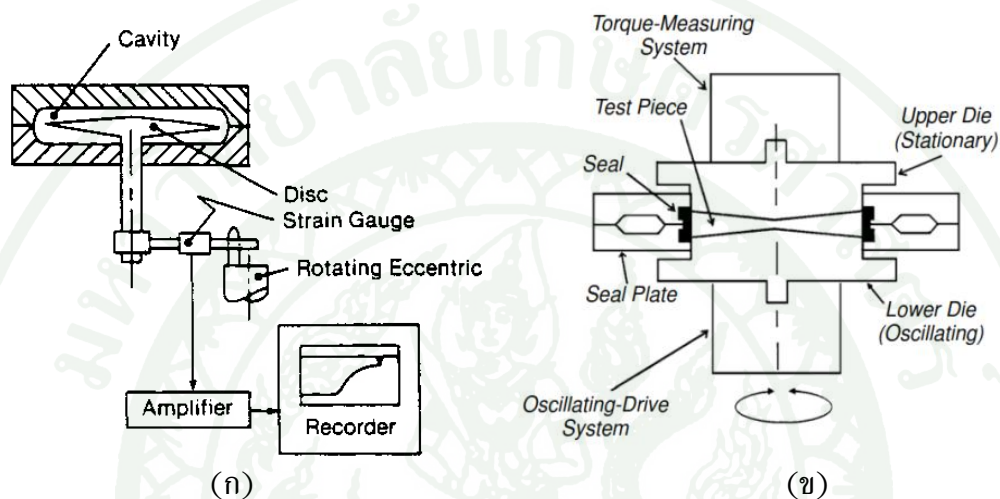
$t_5$	=	ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 5 หน่วย หรือเวลาในการเริ่มคงรูปของยาง (เวลาที่ยางสามารถไหลตัวได้ในขณะผลิต)
$t_{35}$	=	ระยะเวลาที่ทำให้ยางมีค่าความหนืดสูงกว่าจุดต่ำสุด 35 หน่วย
$\Delta t$	=	ค่าดัชนีการคงรูปของยาง

## 5.2 เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (cure characteristics)

ปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการขึ้นรูปของยางด้วยแม่พิมพ์ ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง โดยในปัจจุบันสามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแบบรีโอมิเตอร์ และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ซึ่งเครื่องที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ดังภาพที่ 8(ก) คือ เครื่องมือที่ใช้ในการหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูป หรือหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากทำให้ทราบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาในการคงรูปของยางที่เหมาะสม (optimum cure time) ที่ตัดแปลงมาจากมูนีวิสโคมิเตอร์ ซึ่งอาศัยการแกว่งของโรเตอร์ (rotor) ทำมุมแคบคือ 1 3 หรือ 5 องศา แล้วบันทึกแรงบิดที่ต้านการแกว่งของโรเตอร์ที่หมุนสลับไปมา (oscillate) โดยในช่วงแรก ยางเริ่มอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งแรงที่ใช้ในการหมุนของโรเตอร์มีค่าลดลง และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ จนถึงสถานะการคงรูป ขณะที่เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) ดังภาพที่ 8(ข) ได้พัฒนาตายให้วัดได้ทั้งสมบัติยืดหยุ่น (elastic) และสมบัติการสั่นสะเทือน (damping) ของยางคอมพาวนด์ในสถานะร้อน โดยใช้เพียงแผ่นประกบบนและล่างที่หมุนสลับไปมาเป็นมุมแคบ คือ 0.5 หรือ 1 องศา

หลักการทำงานของเครื่องทั้งสองคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่เครื่อง MDR ใช้เพียงแผ่นประกบบนและล่างหมุนสลับไปมาเป็นมุม ทำให้ MDR มีข้อดีกว่าแบบ ODR คือ แรงเสียดทาน (friction) ที่เกิดขึ้นต่ำกว่า นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อน (thermal lack) จากโลหะ (ตาย) สู่อินงานทดสอบสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็กกว่า (ตัวอย่างที่

ใช้ทดสอบมีขนาดประมาณ 3 ถึง 5 cm<sup>3</sup>) ทำให้ง่ายต่อการนำชิ้นงานทดสอบออกจากตัวเครื่อง หลังจากการทดสอบสิ้นสุดลง อีกทั้งสามารถบำรุงรักษาได้ง่าย ในขณะที่ ODR เมื่อมีการใช้งาน เกิดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจาน (disc) ที่มีอุณหภูมิห้องและตัวระบบที่มีการให้ความร้อนที่สูง (มากกว่า 150°C)

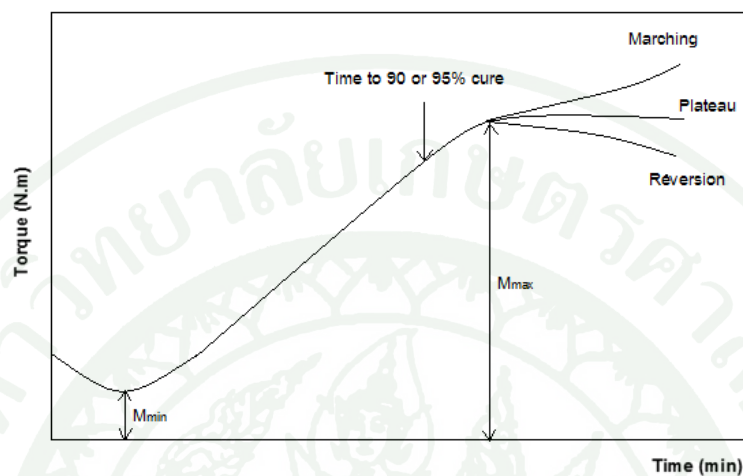


ภาพที่ 8 เครื่องทดสอบหาเวลาคงรูปของยาง (ก) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง และ (ข) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่

ที่มา: Mark et al. (2005)

ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบทั้งสองแบบ แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยวัดค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นจากการหมุนสลับไปมาของจานหมุน ในขณะที่ยางคอมพาวนด์เกิดปฏิกิริยาคงรูปเมื่อได้รับความร้อนจากห้องทดสอบ ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงการใช้เวลาคงรูปที่ 100% อาจไม่จำเป็น เนื่องจากความร้อนที่สะสมอยู่ภายในเนื้อยาง ทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้อย่างต่อเนื่อง แต่หากปฏิกิริยายังคงดำเนินต่อไป แรงบิดที่ตรวจวัดค่าได้สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยการเพิ่มขึ้นของแรงบิดมีที่มาจากกระดิ่งการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลและความแข็งของยางที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงขึ้น (marching) สำหรับการการลดลงของแรงบิดเกิดจากการตัดขาดของพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยความร้อนและอากาศ ทำให้ยางอ่อนตัวลง (reversion) โดยทั่วไปแล้วมักเกิดกับยางธรรมชาติที่มีการขึ้นรูปด้วยระบบ CV เป็นหลัก แต่หากการเชื่อมขวางและตัดขาดของจำนวนพันธะมีอัตราคงที่ แรงบิดที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าคงที่ตามเวลา (plateau) และทั้งนี้การเลือกใช้เวลานในการคงรูปยางที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปยาง

ระบบวัลคาไนซ์ และความหนาของผลิตภัณฑ์ โดยการคำนวณเวลาในการคงรูปของยางที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 4



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง MDR และการคำนวณระยะเวลาในการคงรูปที่ระดับต่างๆ

$$M = \frac{Y(M_{max} - M_{min})}{100} + M_{min} \quad (4)$$

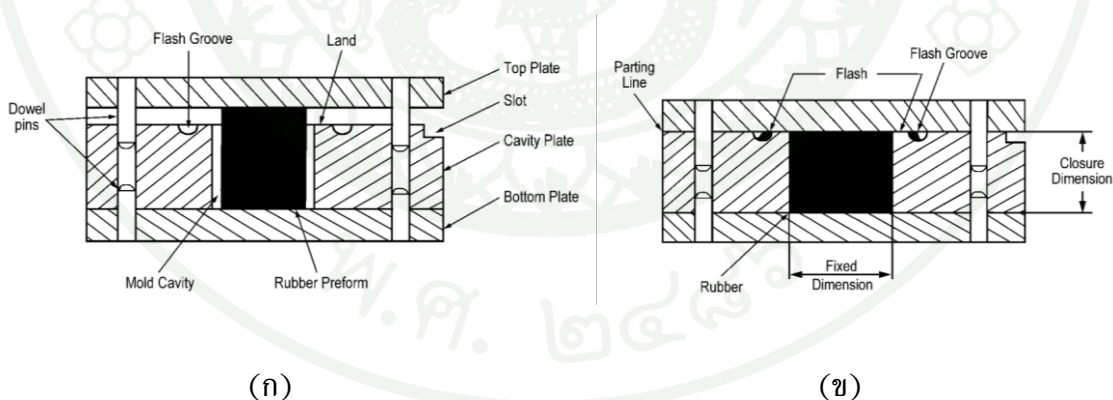
โดย  $M$  = ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เปอร์เซ็นต์คงรูปใดๆ (N.m)  
 $Y$  = ระดับการคงรูป (เปอร์เซ็นต์)  
 $M_{max}$  = ค่าแรงบิดสูงสุด (N.m)  
 $M_{min}$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (N.m)

#### 6. กระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์ (rubber molding)

ยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารเคมีแล้วถูกนำมาใช้ในการกระบวนการขึ้นรูปและคงรูป ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นกระบวนการขึ้นรูปและคงรูปภายในกระบวนการเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและแรงดันแก่ยางคอมพาวนด์เพื่อให้ยางสามารถไหลไปตามช่องทางการไหล (cavity) และเกิดกระบวนการคงรูป (vulcanization) ภายในแม่พิมพ์ตามรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (transfer molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) เป็นต้น

### 6.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding)

กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและการลงทุนทางด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ต่ำกว่ากระบวนการอื่น องค์ประกอบของแม่พิมพ์อัดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (upper plate) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (lower plate) ดังแสดงในภาพที่ 10(ก) ขนาดของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับรูปร่างชิ้นงานและจำนวนเบ้าพิมพ์ (cavity) โดยขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากใส่ยางคอมพาวด์ลงไปในเบ้าพิมพ์ (mold cavity) จากนั้นปิดแม่พิมพ์และอัดให้ยางไหลด้วยเครื่องอัดจนแม่พิมพ์ปิดสนิท โดยมีชุดให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ ได้แก่ แท่งความร้อน (heater rod) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการขึ้นรูป ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อน และยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงต้องใช้เทคนิคการอัดและคลาย (bumping) เพื่อไล่อากาศออกภายในแม่พิมพ์ให้ยางสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปแล้วควรเตรียมยางคอมพาวด์ให้มีปริมาณมากกว่าปริมาตรเบ้าแม่พิมพ์ประมาณ 10% เพื่อให้ยางไหลได้เต็มแบบและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ยางส่วนเกินที่ไหลออกจากแม่พิมพ์ที่บริเวณรอบเบ้าพิมพ์ไปตามร่องล้น (over flow) ดังแสดงในภาพที่ 10(ข) ยางที่ไหลเกินออกมาจากแม่พิมพ์เรียกว่า ครีบบาง (flash) หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาตามข้อมูลจากเครื่องหาเวลาการขึ้นรูปจนยางเกิดปฏิกิริยาการขึ้นรูปสมบูรณ์ จึงเปิดแม่พิมพ์และนำปลดชิ้นงาน

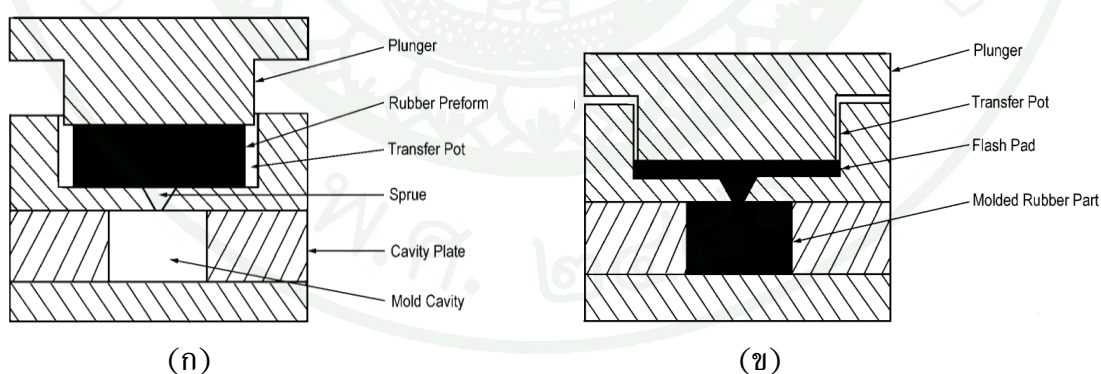


ภาพที่ 10 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (ก) ก่อนปิดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป และ (ข) หลังปิดแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

ที่มา : Johnson (2001)

## 6.2 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (transfer molding)

กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากกระบวนการอัดขึ้นรูป แต่มีความซับซ้อนมากกว่า โดยทั่วไปแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 11(ก) ซึ่งได้แก่ แม่พิมพ์ส่วนบนมีลักษณะคล้ายแท่งกดยาง (plunger) แม่พิมพ์ส่วนล่างมีลักษณะเป็นเบ้าพิมพ์ (cavity plate) และแม่พิมพ์ส่วนกลางเป็นแอ่งพักยาง (transfer pot) และช่องทางการไหลของยางไปสู่เบ้าพิมพ์ โดยหลักการของกระบวนการอัดส่ง คือ เมื่อยางได้รับความร้อนแล้วเกิดการอ่อนตัวและถูกอัดไหลจากแอ่งพักยางผ่านรูฉีด (sprue) เข้าไปยังเบ้าพิมพ์ที่เป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ดังภาพที่ 11(ข) ข้อเด่นของกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป นอกเหนือจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนแล้ว ยังมีระยะเวลาในการผลิตที่สั้นกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  จากการไหลผ่านรูฉีด ทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อยางมีความสม่ำเสมอกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป และจากความร้อนเฉือน (shear heating) ที่เกิดขึ้น ขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาในการคงรูปของยางภายในเบ้าพิมพ์ อย่างไรก็ตาม กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปมีต้นทุนทางด้านการผลิตแม่พิมพ์สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป และที่สำคัญมีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่เกิดจากก้านรูฉีด รวมถึงส่วนของแม่พิมพ์ด้านบนและทางวิ่ง (runner) ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ เนื่องจากยางในแอ่งพักยาง (flash pad) ซึ่งกลายเป็นของเสียเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูป

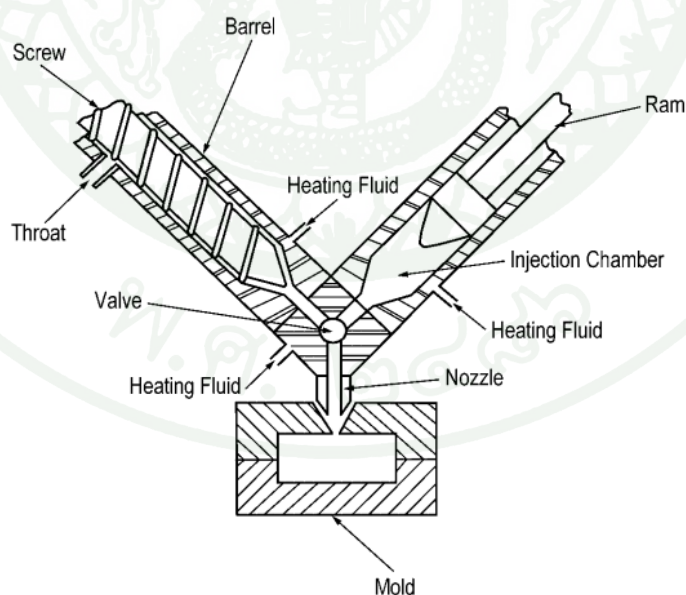


ภาพที่ 11 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (ก) ก่อนปิดแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป และ (ข) หลังปิดแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป

ที่มา: Johnson (2001)

### 6.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากกว่า 2 แบบแรก ดังแสดงในภาพที่ 12 เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตที่สูงและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เครื่องที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีทั้งชนิดสกรู (screw) หรือชนิดลูกสูบ (piston) ซึ่งลักษณะเครื่องฉีดนั้นมี 2 แบบ ได้แก่ แบบแนวตั้ง และแบบแนวนอน โดยที่มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องที่ใช้ฉีดพลาสติก วัสดุที่ป้อนเข้าเครื่องฉีดอาจอยู่ในรูปลักษณะเส้นยาวขนาดเล็กหรือเม็ดขนาดเล็ก ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป วัสดุถูกให้ความร้อนก่อนอย่างทั่วถึง อุณหภูมิของวัสดุจะไหลผ่านตามช่องทางสู่แม่พิมพ์เริ่มสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (shear heating) ส่งผลให้วัสดุเกิดการคงรูปอย่างทั่วถึงและมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน และนอกจากนี้กระบวนการฉีดขึ้นรูปยังมีข้อดีต่างๆ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในด้านแรงงาน รอบการทำงานสั้น สามารถควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ ผลิตชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเครื่องจักรสำหรับฉีดขึ้นรูปมีราคาสูง รวมถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปมีความซับซ้อนมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 12 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

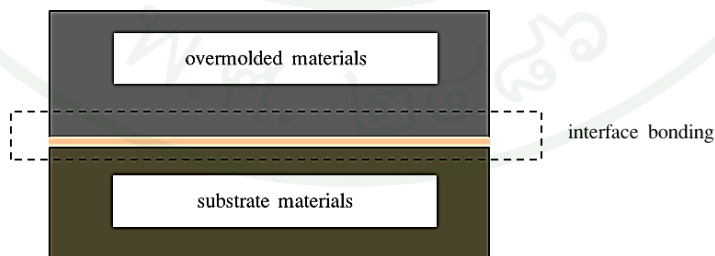
ที่มา: Johnson (2001)

## 7. เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โม่ลด์ดิ้ง (overmolding technique)

การขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โม่ลด์ดิ้งถูกนำมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิ-เมอร์ เนื่องจากมีข้อดีในด้านต้นทุนเครื่องจักรที่สามารถใช้เครื่องเดิมหรือใช้ต้นทุนในการปรับปรุงที่ต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ รวมไปถึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกระบวนการฉีดขึ้นรูป กระบวนการอัดขึ้นรูป หรือกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคนิคโอเวอร์โม่ลด์ดิ้ง มีสีส้นหรือมีวัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิดภายในชิ้นงานเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งเทคนิคโอเวอร์โม่ลด์ดิ้งในกระบวนการผลิตเริ่มจากการขึ้นรูปวัสดุพื้น (substrate material) จากนั้นจึงขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ (overmolding material) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โม่ลด์ดิ้ง



ภาพที่ 14 เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โม่ลด์ดิ้ง

เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ในกระบวนการผลิตสามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการฉีด และกระบวนการอัดขึ้นรูปหรือสามารถใช้ร่วมกันทั้งสองกระบวนการ ยกตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปวัสดุพื้นด้วยกระบวนการฉีด จากนั้นจึงขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้ผู้ประกอบการมีทางเลือกในการใช้งานเครื่องจักรที่มีอยู่มากกว่าเทคนิคในกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่น ๆ นอกจากนี้เทคนิคโอเวอร์โมลด์ยังสามารถใช้ได้กับวัสดุพื้นที่เป็นโลหะหรือพอลิเมอร์ซึ่งมีการใช้งานที่มากขึ้นในอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ยางรองแท่นเครื่องลูกหมากกันโคลงหรือยางกันสะเทือนของฮาร์ดดิสก์ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบมากในการใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ได้แก่ ความเข้ากันได้ของวัสดุ (material compatibility) การเลือกใช้ปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสม (processing parameter) และการออกแบบแม่พิมพ์ (mold design) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพและอายุการใช้งานที่สั้นกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันที่นำเข้าจากต่างประเทศ

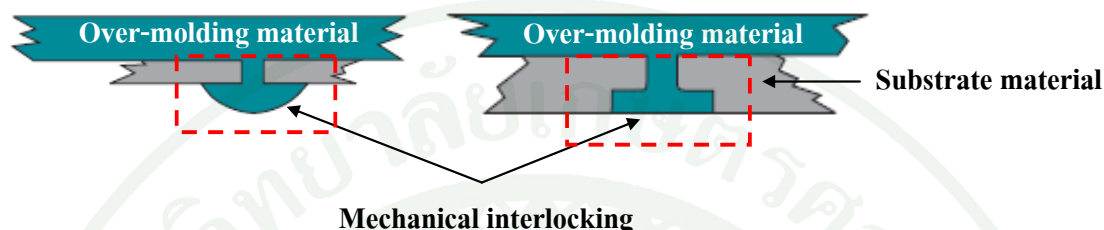
## 8. ทฤษฎีในการยึดเกาะ (adhesion theories)

ปัจจุบันการอธิบายกลไกในการยึดเกาะ (mechanisms of adhesion) และการเชื่อมต่อ (bonding) ยังไม่เป็นที่ชัดเจน จากคำจำกัดความตามมาตรฐาน ASTM D907 ได้อธิบายถึงการติดุดของโมเลกุลระหว่างพื้นผิวที่สัมผัสหมายถึง สถานะที่สองพื้นผิวถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยแรงระหว่างผิวสัมผัส (interfacial force) อันประกอบด้วยแรงวาเลนซ์ (valence electron) แรงยึดเกาะ (interlocking force) หรือเกิดจากแรงทั้งสองชนิด พบว่า มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายกลไกดังกล่าว โดยมี 4 ทฤษฎี ที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือ ทฤษฎีการเชื่อมต่อโดยทางกล (mechanical interlocking theory) ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory) ทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory) และทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์ (electronic theory) ในที่นี้ขอเสนอเพียง 3 ทฤษฎี ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อของพอลิเมอร์เท่านั้น เนื่องจากทฤษฎีการเชื่อมต่อโดยอิเล็กทรอนิกส์ (electronic theory) เป็นการอธิบายการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุประเภทโลหะและเซรามิกส์ (Clements, 2007) เป็นต้น

### 8.1 ทฤษฎีการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking theory)

การเชื่อมต่อหรือการยึดเกาะโดยทางกล ปรากฏขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวสัมผัสกับผิวของพอลิเมอร์ที่ไหลมาสัมผัสกันทำให้เกิดการแทรกตัวภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกี่ยวพันกับการยึดเกาะของพื้นผิวของแข็งที่มีความขรุขระ จากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาสัมผัสกันซึ่งทำให้เกิดการแทรกตัวภายในสายโซ่โมเลกุลระหว่างกันขึ้นอยู่กับเวลาหรือพื้นที่ผิวสัมผัส (Packham, 1992; Kinloch, 1990) ซึ่งภาคอุตสาหกรรม ได้ใช้การออกแบบขึ้นงานให้

มีความแข็งแรงในการยึดเกาะเพิ่มมากขึ้น โดยใช้หลักการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking) เพื่อเพิ่มพื้นที่การสัมผัสและการล็อกระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ซึ่งโดยออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการเชื่อมติดแบบเชิงกล

## 8.2 ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory)

การยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ ด้วยทฤษฎีการดูดซับเป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งในกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีพื้นผิวที่สัมผัสกัน การเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอม (interatomic) และระหว่างโมเลกุล (intermolecular) โดยการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมและแรงระหว่างโมเลกุล ในบริเวณที่พอลิเมอร์สองชนิดสัมผัสกัน และอาจเกิดจากแรงปฐมภูมิ (primary forces) เช่น พันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ และพันธะโลหะ ตามชนิดของวัสดุ (Kinloch, 1990) อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทยางหรือเทอร์โมพลาสติกมีการเชื่อมต่อจากแรงทุติยภูมิ (secondary force) คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ดังแสดงในภาพที่ 16

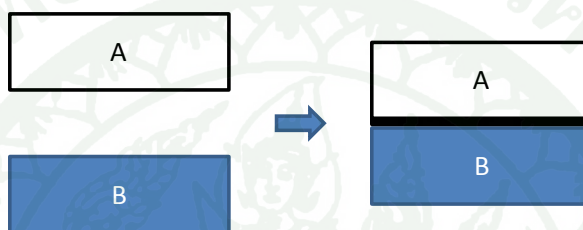


ภาพที่ 16 แรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ

ที่มา: Lee (1991)

### 8.3 ทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory)

ทฤษฎีการแพร่ข้ามอธิบายการยึดเกาะของวัสดุสองชนิดที่มีผิวสัมผัสติดกันในระยะที่สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างกัน (Pocius, 2002) ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิดกลายเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 17 อย่างไรก็ตามทฤษฎีการแพร่ข้ามไม่สามารถอธิบายได้ถึงการยึดเกาะของวัสดุที่สายโซ่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (rigid) เช่น ยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว เป็นต้น



ภาพที่ 17 การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลทำให้ผิวสัมผัสกลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ที่มา: Pocius (2002)

นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาการแพร่ข้ามสูงสุดของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 sec ที่บริเวณพื้นที่การเชื่อมต่อ โดยอัตราการแพร่ข้ามอยู่ระหว่าง  $10^{-11}$  ถึง  $10^{-14}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$  ซึ่งทำให้การแพร่ข้ามเกิดขึ้นในกระบวนการอัดได้มากกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูป

### 9. การเชื่อมต่อง่ายยาง (rubber to rubber bonding)

การยึดเกาะกันระหว่างยางทั้งในกรณีที่เป็นชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน ซึ่งมีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานยางให้มีความซับซ้อน และมีการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การผลิตยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรมยานยนต์ หรือผลิตภัณฑ์ยางทั่วไปในอุตสาหกรรม ซึ่งมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการยึดเกาะระหว่างยางกับยางหรือยางกับวัสดุชนิดอื่น เช่น องค์ประกอบทางเคมีของยาง ความเข้ากันได้ น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัว สารตัวเติม และปัจจัยในกระบวนการผลิตที่ใช้ เป็นต้น สามารถแบ่งทฤษฎีออกเป็น 2 ทฤษฎีหลัก ๆ ดังนี้ คือ การยึดเกาะของยางที่ผ่านการคงรูปแล้วและการยึดเกาะของยางที่ไม่ผ่านการคงรูป

### 9.1 การยึดเกาะของยางที่ไม่ผ่านการคงรูป (bonding of unvulcanized rubbers)

ยางที่ยังไม่ผ่านการคงรูปในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสถานะแก้ว (glass temperature,  $T_g$ ) ทำให้ยางมีสถานะอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (rubbery state) เกิดการแพร่ข้ามของสายโซ่โพลิเมอร์ที่บริเวณผิวสัมผัสกันของยางซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการพัฒนาการยึดเกาะ พบเห็นได้ชัดเจนในยางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติยึดเกาะกันที่ดี (tacking properties) (Crowther, 2000) โดยในกระบวนการขึ้นรูปจริงมีหลายปัจจัยซึ่งทำให้การแพร่ข้ามของยางก่อนการคงรูปที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น ปัจจัยของโครงสร้างวัสดุ (material structure) น้ำหนักโมเลกุลของยาง (molecular weight) ชนิดและปริมาณของส่วนผสมของยางคอมพาวนด์ ได้แก่ สารตัวเติม (fillers) และสารเคมี (chemical additive) เป็นต้น ทั้งนี้ความแข็งแรงของการยึดเกาะของยางที่ไม่ผ่านการคงรูปสามารถกล่าวได้ว่า ขึ้นกับสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง (physical properties)

### 9.2 การเชื่อมต่อของยางที่ผ่านการคงรูป (bonding of vulcanized rubbers)

ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัสดุยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีความเป็นของแข็ง (rigid) ที่มากขึ้น ส่งผลให้การแพร่ข้ามระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์เกิดขึ้นได้ยาก จึงมีการพัฒนาสารที่ช่วยให้เกิดการเชื่อมต่อดัวยวิธีอื่น เช่น การใส่กาวช่วยประสานระหว่างผิวสัมผัส การปรับปรุงพื้นผิวให้สามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ง่ายขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการปรับปรุงโดยใช้สารเคมี (chemical modified) ช่วยในการสร้างพันธะระหว่างผิวสัมผัสของเนื้อยาง (Kaynak *et al.*, 2003; Fernandez *et al.*, 1991) สารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เรียกว่าสารช่วยสร้างพันธะ (bonding agent) ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าความแข็งแรงของการยึดเกาะของยางในกลุ่มนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมี (chemical bonding) เป็นหลัก

## 10. การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในงานสำหรับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์

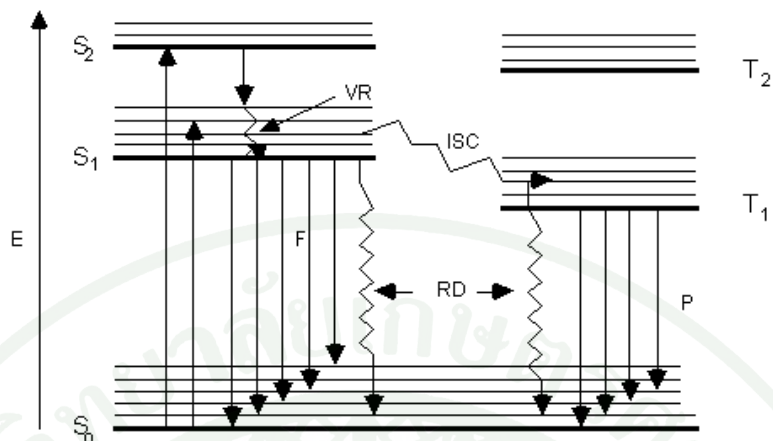
แสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ให้รังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งตามมาตรฐาน ISO-DIS-21348 พบว่าสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลต ถูกแบ่งออกได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตแต่ละช่วงความยาวคลื่น

ชื่อ	อักษรย่อ	ความยาวคลื่น (nm)	พลังงานต่อโฟตอน (eV)
ultraviolet A			
long wave (black light)	UVA	400 –315	3.10–3.94
Near	NUV	400 –300	3.10–4.13
ultraviolet B (medium wave)	UVB	315 –280	3.94–4.43
middle	MUV	300 –200	4.13–6.20
ultraviolet C, short wave (germicidal)	UVC	280 –100	4.43–12.4
Far	FUV	200 –122	6.20–10.2
Vacuum	VUV	200 –100	6.20–12.4
Low	LUV	100 –88	12.4–14.1
Super	SUV	150 –10	8.28–124
Extreme	EUV	121 –10	10.2–124

ที่มา : Zeus Industrial Products, Inc (2005)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถทำหน้าที่เสมือนตัวริเริ่ม (initiator) ที่พอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยวิธีใดวิธีหนึ่งไว้ ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิตอลที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18 ทำให้ระบบของสายโซ่โม่เลกุลขาดเสถียรภาพ หรืออยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร (unstable state) หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการกระตุ้น (excitation) ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานของสถานะพื้น (ground state,  $S_0$ ) อาจถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิตอลที่มีพลังงานสูง ( $S_1$ ) ซึ่งเป็นไปได้ที่อาจทำให้ระดับพลังงานสั่นสะเทือนสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่อิเล็กตรอนหมุน (spin electron) มีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเดี่ยว (singlet state, S) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเปลี่ยนการหมุนได้ทำให้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนข้าม (Inter-System Crossing, ISC) ไปอยู่ในสถานะสาม (triplet state, T) สถานะที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไม่เสถียรและสามารถถูกกระตุ้นได้แต่มีแนวโน้มกลับมายังสถานะพื้นด้วยเส้นทางการเดินต่าง ๆ กันซึ่งเรียกว่ากระบวนการกายภาพทางแสง (photo-physical processes) เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรและอาจเรียกว่า กระบวนการเคมีทางแสง (photo-chemical processes) (Fabio *et al.*, 1994; Grassie and Gerald, 1985)



ภาพที่ 18 การกระตุ้นแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการกายภาพทางแสง

ที่มา : The University of Houston (2011)

เมื่อ F คือ Fluorescence, P คือ Phosphorescence, S คือ Singlet, T คือ Triplet, RD คือ Radiationless Deactivation, VR คือ Vibrational Relaxation, ISC คือ Intersystem Crossing และ E คือ Energy

### 10.1 ผลกระทบจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนพื้นผิวพอลิเมอร์

อนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (chemically reactive species) เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการกระตุ้น (excitation) (Singh and Sharma, 2008) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ทำให้มีการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี นอกจากนี้ยังอาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) ที่เกิดขึ้นเมื่อสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณที่มากพอ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการกายภาพ กล่าวคือ พื้นผิวที่ได้รับรังสีจะเกิดผิวที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นหรือในบางกรณีจะทำให้พื้นผิวเกิดเป็นหลุมหรือเป็นคลื่น ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลบริเวณที่ได้รับรังสีมีค่าลดต่ำลงและ ส่งผลต่อความแข็งแรงที่บริเวณพื้นผิว (Fabio *et al.*, 1994; Singh and Sharma, 2008) โดยการแตกออกของพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) และคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ที่พบในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ (Eve and Mohr, 2009) จำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอก โดยค่าพลังงานในการสลายพันธะแสดงในตารางที่ 2

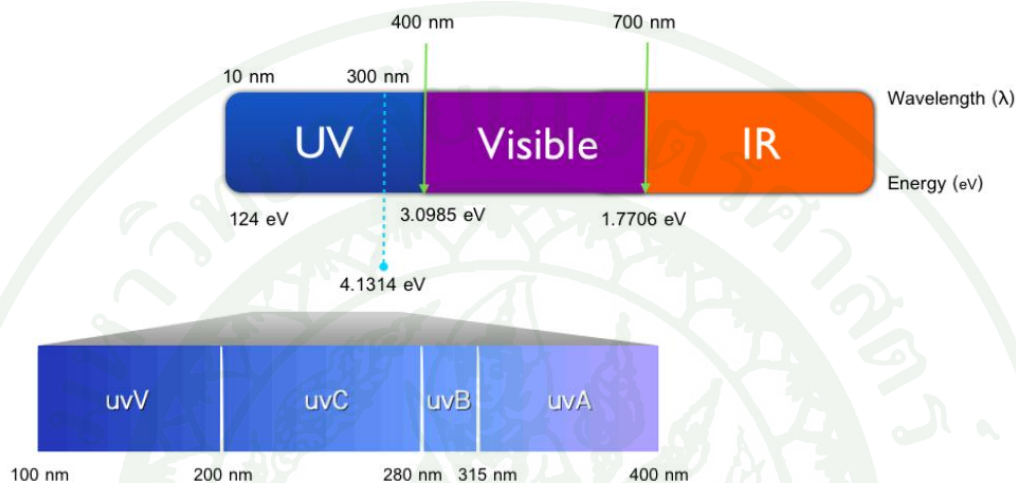
ตารางที่ 2 พลังงานในการสลายพันธะภายในสายโซ่โพลีเมอร์

ชนิดของพันธะ (kind of bond)	พลังงานสลายพันธะโดยเฉลี่ย (average bond dissociation energy)	
	หน่วย kJ/mol	หน่วย eV
O-O	204	2.11
C-N	305	3.16
C-C	347	3.60
C-O	358	3.71
C-Cl	397	4.11
C-H	413	4.28
O-H	467	4.83
O=O	498	5.16
C=C	607	6.30
C=O	799	8.28
C≡N	937	9.71

ที่มา : สมศักดิ์ (2548)

อย่างไรก็ตามในแสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ถูกจำกัดความยาวคลื่นอยู่ที่ประมาณ 300 nm (มีพลังงานเท่ากับ 4.1314 eV) เนื่องจากถูก โอโซน (ozone) ในชั้นบรรยากาศกรองไว้ดังแสดงภาพที่ 19 ดังนั้นแสงอัลตราไวโอเล็ตตาม ธรรมชาติอาจแค่เพียงทำให้พันธะ C-H แตกออกได้เท่านั้น ในขณะที่พลังงานในการยึดเกาะของ สายโซ่หลักระหว่างพันธะ C-C ในพอลิเมอร์มีค่าสูงกว่า พลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตตาม ธรรมชาติจึงเข้าทำลายพันธะ C-C ได้ช้าหรือทำลายได้น้อย ดังนั้นในงานด้านการปรับปรุงพื้นผิว ที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต และการทดสอบการเสื่อมสภาพทางแสงของพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องใช้ แหล่งพลังงานที่เป็นหลอดไฟ (lamp) หรือเลเซอร์ (laser) (ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 300 nm) ที่มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะ C-C และ C-H ได้พร้อม ๆ กัน (Fabio *et al.*, 1994; Singh and Sharma, 2008; Eve and Mohr, 2009) โดยหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ เคลือบสารปรอท (mercury ultraviolet lamp) เป็นหลอดประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในงานปรับปรุง พื้นผิว การทดสอบความเสื่อมสภาพและการทำความสะอาดพื้นผิวพอลิเมอร์ หลอดประเภทนี้ สามารถปลดปล่อยพลังงานแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 253.7 nm ซึ่งอยู่ในช่วงของ UV-C ตามตารางที่ 3 พบว่าความยาวคลื่นที่ 254 nm ให้พลังงานเท่ากับ 470 kJ/mol (4.87

eV) โดยพลังงานพันธะของ C-H และ C-C มีค่าเท่ากับ 413 kJ/mol (4.28 eV) และ 347 kJ/mol (3.60 eV) ตามลำดับ ซึ่งนับว่ามีพลังงานเพียงพอต่อการแตกขาดของพันธะ C-C และ C-H ได้ (Grassie and Gerald, 1985)



ภาพที่ 19 รายละเอียดของความยาวคลื่นที่ 300 nm ในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 3 พลังงานการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ

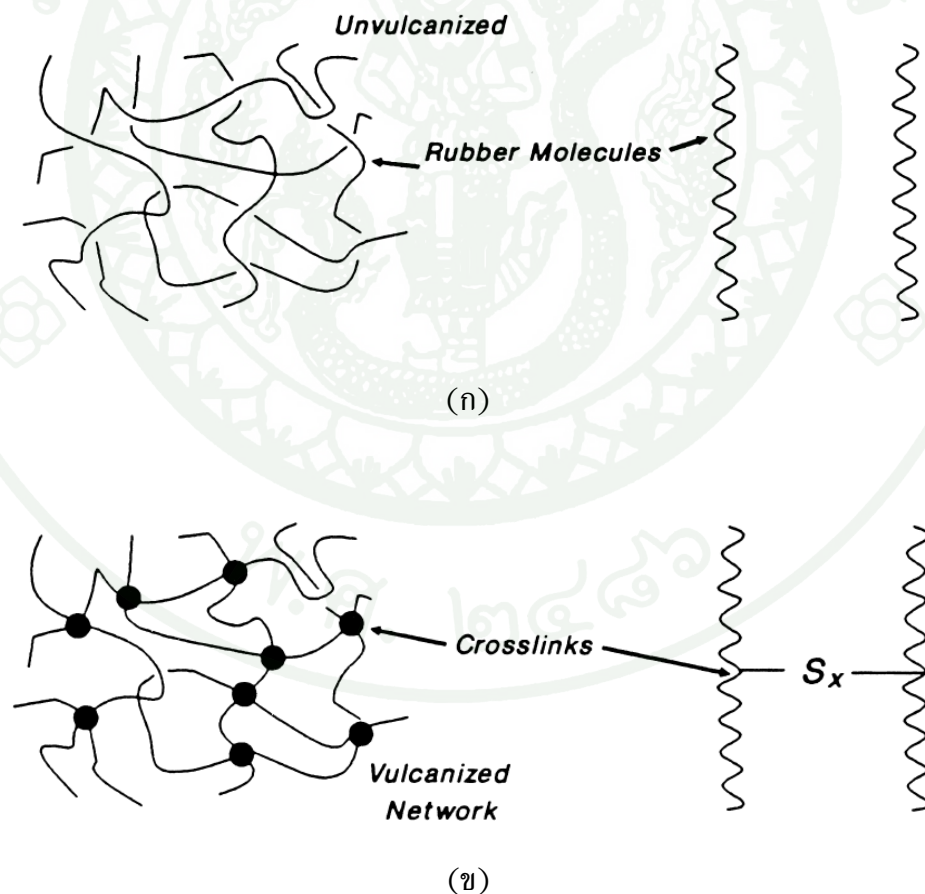
ความยาวคลื่น (wavelength, nm)	พลังงานของความยาวคลื่น (energy)	
	หน่วย kJ/mol	หน่วย eV
254	470	4.87
290	412	4.27
300	398	4.12
320	374	3.87
350	341	3.53
400	299	3.09

ที่มา : สมศักดิ์ (2548)

## 11. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความแข็งแรงของการยึดเกาะของพอลิเมอร์

### 11.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูป (cure kinetic model)

กระบวนการคงรูปยังเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight) ไม่มีการเชื่อมขวางกันด้วยพันธะทางเคมี ดังแสดงในภาพที่ 20(ก) เปลี่ยนเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงชันหรือมีความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้น (highly crosslinking) ซึ่งโครงสร้างของยางจะอยู่ในรูปของเครือข่าย 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 20(ข) โดยทั่วไปแล้วระดับการคงรูปหรือองศาการคงรูป (degree of curing,  $\alpha$ ) มักถูกใช้เป็นตัวชี้วัดถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่ง  $\alpha$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดพันธะเชื่อมขวาง ดังแสดงในสมการที่ 5



ภาพที่ 20 สายโซ่โมเลกุลยาง (ก) ก่อนกระบวนการคงรูป และ (ข) หลังกระบวนการคงรูป

ที่มา: Mark et al. (2005)

$$\alpha = \frac{H}{H_U} \quad (5)$$

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

อัตราการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ( $d\alpha/dt$ ) ถูกกำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{H_U} \left( \frac{dH}{dt} \right) \quad (6)$$

จำนวนแบบจำลองเชิงพลวัตกรรม (phonological model) สำหรับจลนพลศาสตร์ได้รับการพัฒนาเพื่ออธิบายคุณลักษณะของกระบวนการคงรูปสำหรับยางแต่ละประเภทที่มีความแตกต่างกัน โดยแบบจำลองอย่างง่ายที่นำเสนอ คือ  $n^{\text{th}}$  order rate ดังแสดงในสมการที่ 7 และ 8

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(1-\alpha)^n \quad (7)$$

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_A}{RT}\right) \quad (8)$$

โดยที่  $n$  คือ อันดับของการเกิดปฏิกิริยา (reaction order)  $K$  คือ อัตราปฏิกิริยาคงที่ (reaction constant) ซึ่งก็คือ พังก์ชันของอาร์เรเนียสที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ  $K_0$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาในสถานะเริ่มต้น  $\Delta E_A$  คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy)  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส และ  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

Kamal and Sourour (1973) ได้นำเสนอแบบจำลองที่อธิบายถึงคุณลักษณะของกระบวนการคงรูปโดยได้เพิ่มตัวแปรอัตราปฏิกิริยาคงที่ ( $K$ ) เข้าไปในแบบจำลองเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย ดังแสดงในสมการที่ 9 และ 10

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (9)$$

$$K_i = K_{i0} \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{RT}\right) \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

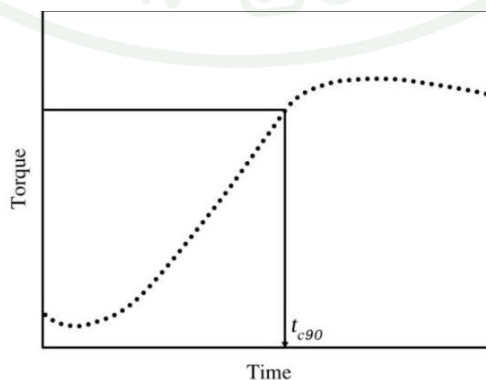
โดยที่  $K_i$  มีนิยามเช่นเดียวกับสมการที่ 8

ต่อมา Isayev and Deng (1991) ได้นำพัฒนาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคงรูปให้มีความซับซ้อนน้อยลง ดังแสดงในสมการที่ 11 ซึ่งยังคงสามารถอธิบายพฤติกรรมในกระบวนการคงรูปได้ดี โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) สำหรับการวิเคราะห์การไหลของวัสดุภายในแม่พิมพ์

$$\alpha = \frac{Kt^n}{1+Kt^n} \quad (11)$$

โดยที่  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป และ  $K$  มีนิยามเช่นเดียวกับสมการที่ 8

ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์โดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมใช้ระดับการคงรูปที่ 90% ซึ่งยังสามารถคงรูปต่อเนื่องได้หลังจากถอดจากแม่พิมพ์ การพิจารณาถึงสถานะการคงรูปของยางนิยมใช้เครื่องมือรีโอมิเตอร์ (rheometer) ได้แก่ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) หรือเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) ซึ่งเป็นการทดสอบทางจลนพลศาสตร์ที่อธิบายถึงแรงบิด (torque) ที่เปลี่ยนไปตามเวลา (time,  $t$ ) ในระหว่างกระบวนการคงรูป (Sezna and DiMauro, 1984; Deng and Isayev, 1991) ดังแสดงในภาพที่ 21 โดยแรงบิดที่เพิ่มขึ้นหมายถึงระดับการคงรูปที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน ได้แก่ ค่ามอดูลัส (modulus) ค่าความแข็ง (hardness) เป็นต้น (Gent, 2001)



ภาพที่ 21 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยเครื่อง ODR หรือ MDR

จากความสัมพันธ์ของระดับการคงรูปกับสมบัติทางกล (Nichetti, 2004) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสมบัติทางกลของยาง โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการคงรูป ซึ่งพบว่า สามารถทำนายค่าความแข็ง ค่ามอดูลัส และการสึกหรอ (abrasion) ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยาง แต่จากการสำรวจเอกสาร พบว่า มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายความแข็งแรงรอยประสานของวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Kim and Suh, 1986; Guo et al., 2004) ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎีการแพร่ โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว และเวลาการสัมผัส ในขณะที่บริเวณรอยประสานของชิ้นงานยางนั้น นอกจากเกิดการแพร่ข้ามหน้าสัมผัสของสายโซ่โมเลกุล เช่นเดียวกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกแล้ว ยังมีการเชื่อมขวางเป็นโครงข่ายระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาที่สัมผัสกันภายในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 ยางธรรมชาติเกรด STR 5L (Natural Rubber, NR) ของบริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- 1.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)
- 1.3 ยางไนไตรล์บิวตาไดอีน (Nitrile Butadiene Rubber, NBR)
- 1.4 สารเคมีที่ใช้ในการบดผสม
  - 1.4.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) ของบริษัท Thai-Lysaght Co., Ltd. Thailand
  - 1.4.2 กรดสเตียริก (stearic acid) ของบริษัท GSP Products
  - 1.4.3 กำมะถัน (Sulphur, S) ความบริสุทธิ์ 99.9% ขนาด 325 mesh ของบริษัท GSP Product Co., Ltd.
  - 1.4.4 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซอลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, CBS) ขนาด microgranules ของบริษัท MONFLEX PTE. Ltd.
  - 1.4.5 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol, PEG) ของบริษัท Union Chemical 1986 Co., Ltd.
  - 1.4.6 น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) ของบริษัท Global Chemie Trading Co., Ltd.
  - 1.4.7 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO<sub>3</sub>) เกรด activated ของบริษัท Heritage Plastic, Inc.
  - 1.4.8 เขม่าดำ (carbon black) เกรด N330 ของบริษัท Thai carbon black public Co., Ltd.
  - 1.4.9 ซิลิกา (Silica, SiO<sub>2</sub>) ของบริษัท TOKUSIL เกรด precipitated

#### 2. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 เครื่องตัดยางแบบไฮดรอลิก (hydraulic cutting machine) ของบริษัท Daina จำกัด รุ่น HD-30
- 2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักของ METLER-TOLEDO รุ่น PM 30000-Kn

2.3 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขนาด 8 นิ้ว x 20 นิ้ว ของบริษัท Kodair Seisakusho รุ่น R11-3FF

2.4 เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ของยาง (mooney viscometer) ของบริษัท TECHPRO visTECH รุ่น 123103

2.5 เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer, MDR) ของบริษัท TECHPRO rheoTECH รุ่น 121105

2.6 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (compression molding machine) ของบริษัท GOTECH รุ่น GT-7014

2.7 เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV source reactor) โดยใช้หลอด mercury ultraviolet lamp ความยาวคลื่น 253.7 nm

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ของบริษัท: Bruker Optics รุ่น ALPHA

2.9 เครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle meter) ของยี่ห้อ Dataphysics OCA 15EC (DataPhysics Instruments GmbH, Germany)

2.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ของบริษัท Cometech รุ่น OC-506 BA

2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness) ของบริษัท Cometech

## วิธีการ

### 1. ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนแรกนำยางมาบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ตามสูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 4 ที่อุณหภูมิ 70°C เริ่มจากบดยางเป็นเวลา 3 นาที เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง รวมทั้งเพื่อให้สารเคมีผสมเข้ากับเนื้อยางได้ง่ายขึ้น บดผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นใส่สารตัวเติมพร้อมสารช่วยในกระบวนการผลิต โดยในกรณีของเขม่าดำ ขั้นตอนนี้มีการใส่น้ำมันอะโรมาติกเพื่อช่วยการกระจายตัวให้บดผสมได้ง่ายขึ้น ขณะที่ซิลิกาใช้การบดผสมร่วมกับ PEG เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารช่วยในการคงรูป จากนั้นบดผสมสารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 นาที ลำดับสุดท้ายบดผสมสารคงรูปเป็นเวลา 3 นาที เมื่อสิ้นสุดการบดผสมนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปตัดให้มีขนาด 5×10 และขนาด 5×5 cm<sup>2</sup> เพื่อนำไปทดสอบความเหนียว และทดสอบสมบัติการคงรูป เพื่อหาระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time, T<sub>s2</sub>) ระยะเวลาคงรูป (cure time, T<sub>c90</sub>) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 140 150 และ 160°C ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และ ASTM D5289 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัย

ingredients	content (part per hundred of rubber, phr)						
	non-filled	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CB			
NR (STR 5L)	100	100	100	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4	4	4	4
stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
CaCO <sub>3</sub>	-	30	60	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	-	-	-	30	60	-	-
CB	-	-	-	-	-	30	60
sulphur	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
PEG	-	-	-	1.8	3.6	-	-
CBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
aromatic oil	-	-	-	-	-	2	4

จากนั้นในการขึ้นรูปวัสดุพื้น วัสดุซ้อนทับ และชิ้นงานทดสอบ ถูกเตรียมด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ดังภาพที่ 22 โดยใช้แม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูปดังภาพที่ 23 (รายละเอียดของแม่พิมพ์แสดงในภาพผนวก ก) ซึ่งชิ้นงานมีขนาดกว้าง 130 mm ยาว 154 mm และหนา 4 mm เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานยางในการทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ (peel strength) ต่อไป



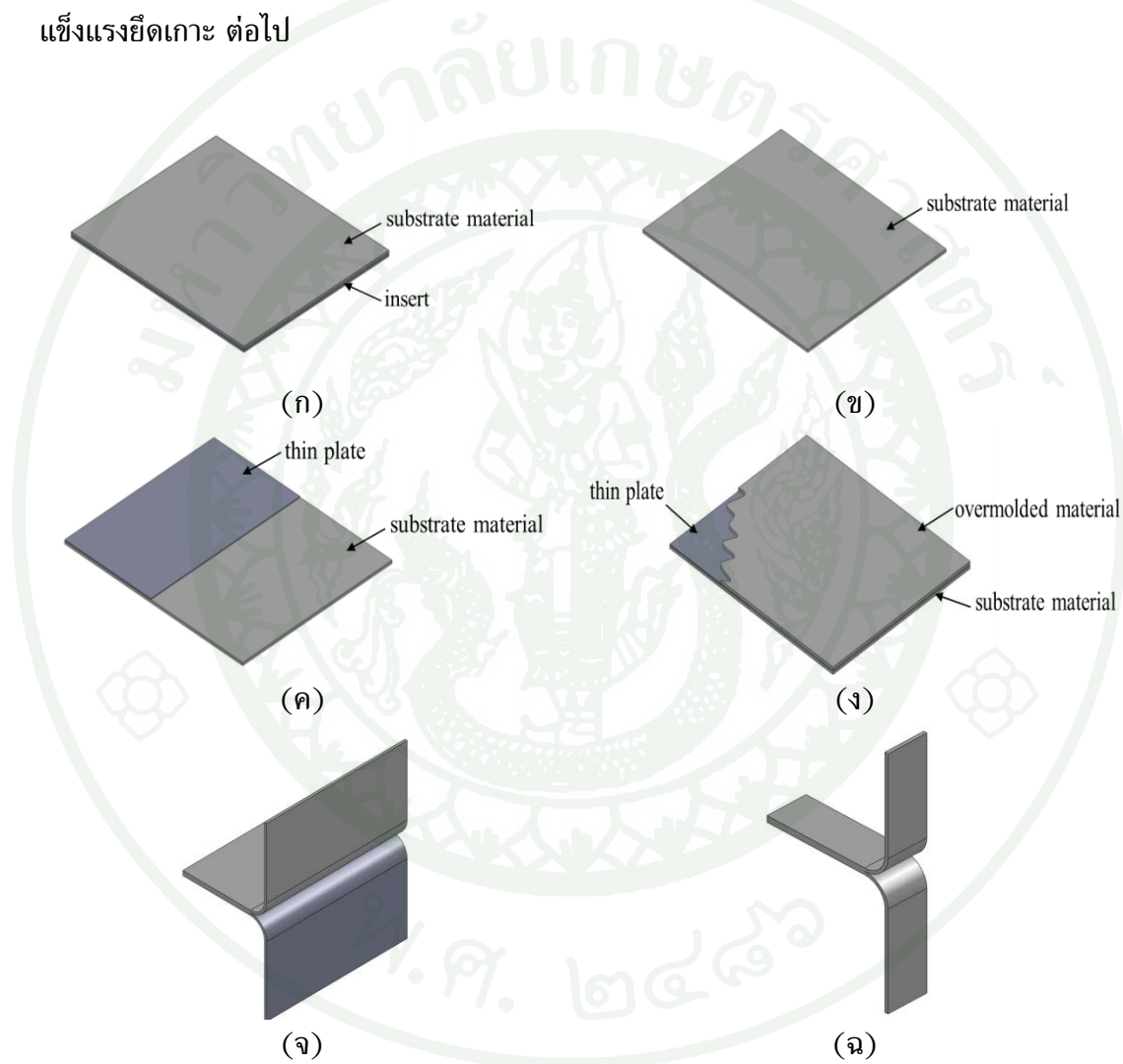
ภาพที่ 22 เครื่องอัดขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 23 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานยางสำหรับการทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ (peel strength) เริ่มจากนำยางคอมพาวนด์ที่บดผสมแล้วตัดเป็นแผ่นให้มีน้ำหนัก 60 g เพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นวัสดุพื้นให้มีความหนา 2 mm ที่ระดับการคงรูปต่างๆ โดยวางยางคอมพาวนด์ลงบนอินเลอร์ที่มีความหนา 2 mm ดังแสดงในภาพที่ 24(ก) ตามลำดับ แล้วนำวัสดุพื้นผ่านการอัดขึ้นรูปแช่ลงในน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเชื่อมขวางหลังการคงรูป (post curing) และนำแผ่นอินเลอร์ออกจากแม่พิมพ์ จะได้วัสดุพื้นที่มีความหนา 2 mm ดังแสดงในภาพที่ 24(ข) นำวัสดุพื้นลงไปแม่พิมพ์

วางเหล็กแผ่นบาง (thin plate) ลงบนวัสดุพื้น ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้ชิ้นงานยางติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 24(ค) จากนั้นวางวัสดุซ้อนทับที่ไม่ผ่านการคงรูปและอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 24(ง) โดยเวลาที่ใช้ขึ้นรูปที่ระดับการคงรูปต่างๆ นั้นได้จากผลทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง หลังจากนั้น นำเหล็กแผ่นบางออก จะได้ชิ้นงานดังภาพที่ 24(จ) ตัดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D413 ขนาดกว้าง 25 mm หนา 4 mm ดังแสดงภาพที่ 24(ฉ) เพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ ต่อไป



ภาพที่ 24 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ (ก) วางยางคอมพาวนด์ของวัสดุพื้นบนอินเสิร์ต (ข) วัสดุพื้นที่ได้หลังจากการอัดขึ้นรูป (ค) นำเหล็กแผ่นบางวางเพื่อป้องกันส่วนที่ไม่ต้องการให้ยางติดกัน (ง) วางยางคอมพาวนด์ของวัสดุซ้อนทับ (จ) ชิ้นงานสุดท้ายหลังจากการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ และ (ฉ) นำไปตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ



โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับยางคอมพาวนด์ ได้แก่ ระดับการคงรูป (degree of crosslinking) ของวัสดุพื้น รวมทั้งชนิด (filler type) และปริมาณสารตัวเติม (filler content) ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์เท่ากับ 20 MPa

ตารางที่ 5 ปัจจัยจากยางคอมพาวนด์

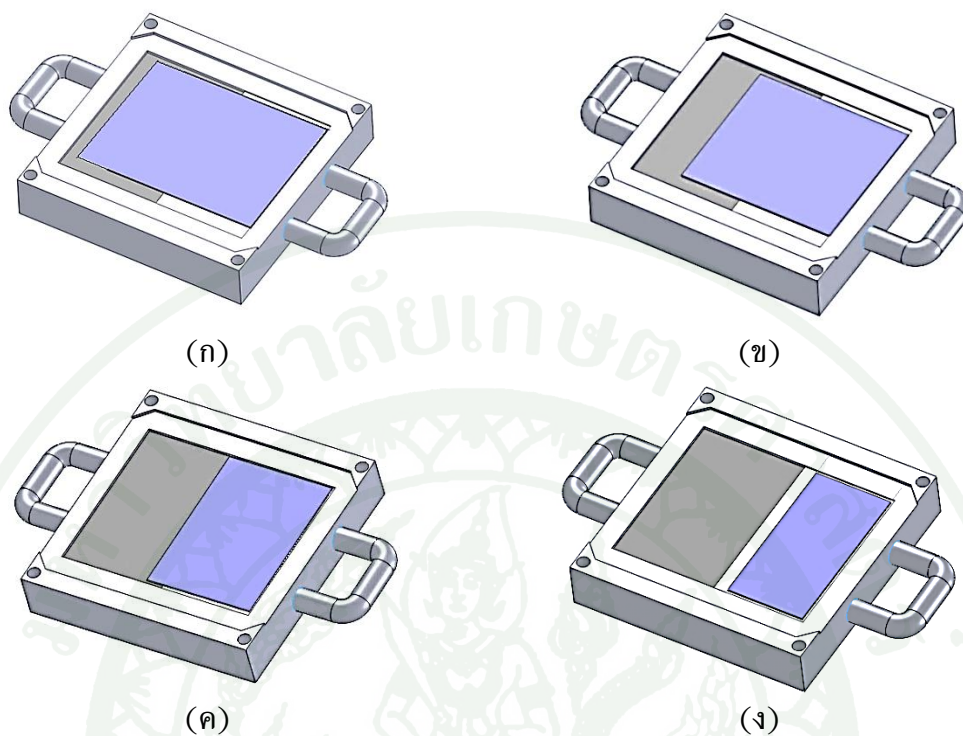
compounding parameter	value
degree of crosslinking (%)	0/ 25/ 50/ 75/ 100
filler type	CB/ SiO <sub>2</sub> / CaCO <sub>3</sub>
filler content (phr)	0/ 30/ 60

ตารางที่ 6 แสดงปัจจัยในกระบวนการผลิต (processing parameters) ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความแข็งแรงในการยึดเกาะ ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์ และระยะทางการไหล (flow length) ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุชั้นทับที่ผสมสารตัวเติมชนิดเดียวกันในปริมาณเท่ากัน

ตารางที่ 6 ปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

processing parameter	value
mold temperature (°C)	140/ 150/ 160
clamping pressure (MPa)	10/ 15/ 20
flow length (mm)	11/ 30/ 70/ 110

การศึกษาดัชนีของระยะทางการไหลที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ ทำการศึกษาที่ระยะทางการไหลของวัสดุชั้นทับที่ยังไม่เริ่มคงรูป (ระดับการคงรูป 0%) วางยางคอมพาวนด์บนแผ่นเหล็กบางให้มีระยะทางการไหลเท่ากับ 11 30 70 และ 110 mm นำชิ้นงานซ้อนกันให้มีน้ำหนัก 60 g ดังภาพที่ 26 โดยวัสดุพื้นผ่านการขึ้นรูปให้มีระดับการคงรูป 50% หลังจากนั้นนำวัสดุชั้นทับที่เตรียมไว้ มาอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคแบบโอเวอร์โมลด์แล้วนำไปทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะต่อไป



ภาพที่ 26 คีกรยะทางการไหล (flow length) ของวัสดุซ้อนทับที่ระยะ (ก) 11 mm  
(ข) 30 mm (ค) 70 mm และ (ง) 110 mm

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ โดยได้วิเคราะห์ความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางไนไตรล์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับผสมสารตัวเติมเขม่าดำ ที่ปริมาณ 30 phr เท่ากัน โดยใช้เงื่อนไขการขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปัจจัยความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

processing parameter	rubber pairs
mold temperature (150 °C)	NR-NR/ NR-NBR/ NR-SBR
clamping pressure (20 MPa)	

## 2.2 การปรับปรุงสภาพพื้นผิววัสดุพื้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะ

### 2.2.1 การปรับปรุงสภาพพื้นผิววัสดุพื้นโดยใช้เครื่องกำเนิดรังสี UV

การศึกษาคือความเป็นไปได้ในการใช้รังสี UV ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุพื้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของชิ้นงานยางไม้ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณ 30 phr โดยชิ้นงานถูกวางไว้ในเครื่องกำเนิดรังสี UV ภายในเครื่องประกอบด้วยหลอดเมอร์คิวรี (mercury lamp) จำนวน 6 หลอด ดังแสดงในภาพที่ 27 ซึ่งมีความสามารถในการปลดปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 253.7 nm แต่ละหลอดให้พลังงานเท่ากับ 7.2 วัตต์ และระยะห่างระหว่างหลอดเมอร์คิวรีกับชิ้นงานตัวอย่างเท่ากับ 30 mm ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสีประมาณ 70°C โดยเครื่องกำเนิดรังสี UV ถูกจัดวางไว้ภายในตู้ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีและสามารถควบคุมให้รังสี UV ปลดปล่อยพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอเท่ากันทุกสถานะที่ทำการทดสอบ การออกแบบเครื่องกำเนิดรังสี UV ได้มีการอ้างอิงข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM G53 งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเตรียมวัสดุพื้นที่มีความเป็นขรุขระใกล้เคียงกับวัสดุชั้นทับที่เป็นยางธรรมชาติ โดยศึกษาระยะเวลาในการฉายรังสี UV ตั้งแต่ 15 นาที ถึง 1 ชั่วโมง



(ก)



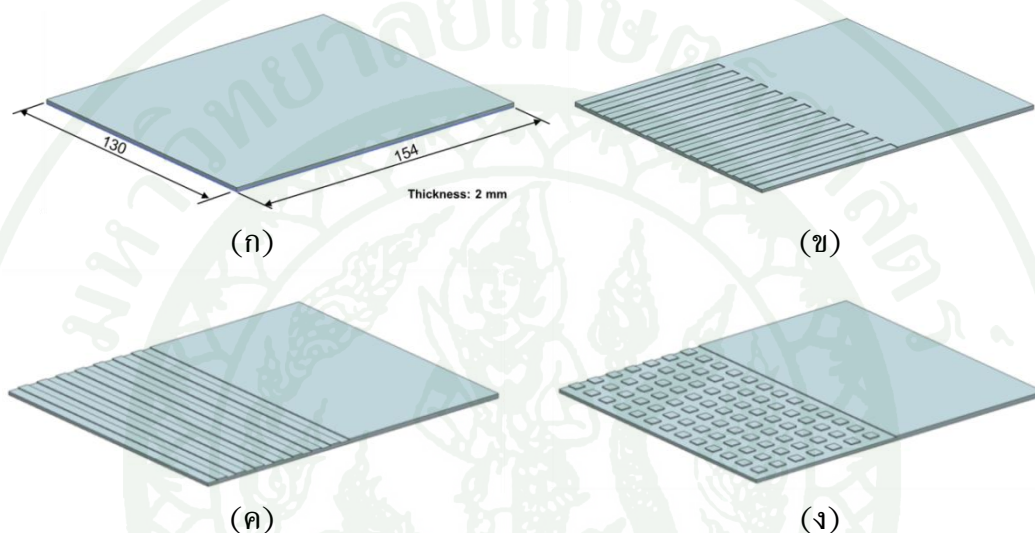
(ข)

ภาพที่ 27 (ก) เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต และ (ข) หลอดเมอร์คิวรี

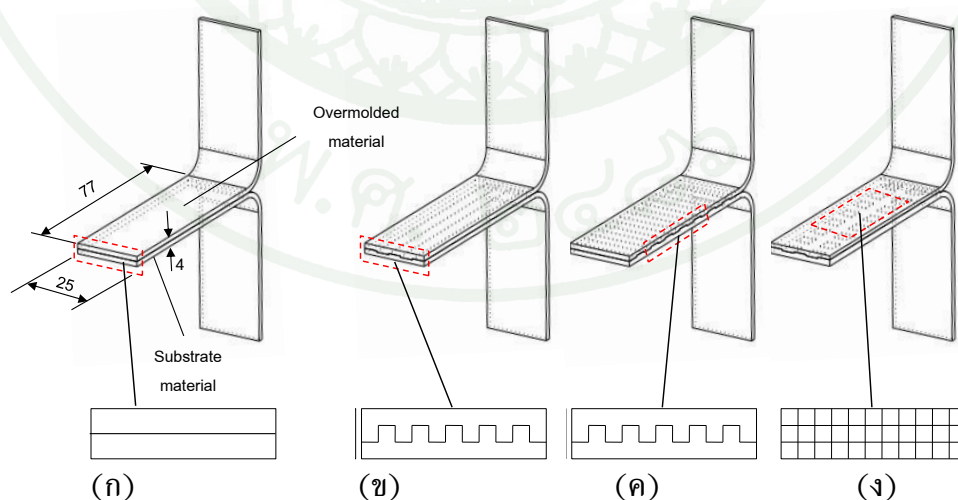
### 2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุพื้นโดยเทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

สำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นเพื่อให้มีรูปแบบตามที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้อินเลอร์ทภายในแม่พิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยอินเลอร์ทแผ่นเรียบ (smooth surface) แผ่นลอนทิศทางขนานการไหล (parallel to flow direction) แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล (perpendicular to

flow direction) และแผ่นลอนตาราง (cross pattern) ดังแสดงในภาพที่ 28(ก ถึง ง) ตามลำดับ โดยอินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางขนานการไหล และอินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางขวางการไหลมีพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากัน (พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นกว่าแผ่นเรียบ 5%) ขณะที่แผ่นลอนตาราง มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นมากกว่าแผ่นเรียบ 10% โดยลักษณะของชิ้นงานสำหรับนำไปทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ ดังภาพที่ 29(ก ถึง ง)



ภาพที่ 28 แบบจำลองสามมิติของอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ (ก) แผ่นเรียบ (ข) แผ่นลอนทิศทางขนานการไหล (ค) แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล และ (ง) แผ่นลอนตาราง



ภาพที่ 29 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะที่มีลักษณะพื้นผิวยึดเกาะแบบต่างๆ (ก) แบบเรียบ (ข) แบบลอนทิศทางขนานการไหล (ค) แบบลอนทิศทางขวางการไหล และ (ง) แบบลอนตาราง

นอกจากนี้ ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยจากระยะทางการไหลที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะโดยเปรียบเทียบที่พื้นที่ผิวเท่ากัน โดยศึกษา 2 กรณี ดังนี้ คือ การลดปัจจัยจากระยะทางการไหล (non-flow parameter) โดยกำหนดให้วางยางคอมพาวนด์ที่มีขนาดชิ้นงานใกล้เคียงกับเข้าพิมพ์ และศึกษาปัจจัยจากระยะทางการไหล (flow parameter) โดยกำหนดให้วัสดุพื้นไหลเป็นระยะทาง 11 mm ผ่านลอนรูปแบบต่างๆ ที่ออกแบบไว้ ขึ้นรูปให้มีระดับการคงรูป 50% จากนั้นนำวัสดุซ้อนทับที่ยังไม่เริ่มคงรูปมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ตั้ง อุณหภูมิ 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa แล้วเปรียบเทียบความแข็งแรงกับวัสดุพื้นที่ใช้อินเล็ตแผ่นเรียบ โดยการทดลองนี้ศึกษาชิ้นงานยางผสมเขม่าดำ ปริมาณ 30 phr ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ระยะทางการไหลและลักษณะของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ใช้ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก

processing parameter	substrate pattern	flow length
mold temperature (150 °C)	smooth/ parallel/	0/ 11 mm
clamping pressure (20 MPa)	perpendicular/ cross	

### 3. ขั้นตอนทดสอบสมบัติชิ้นงาน

3.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR)

การวิเคราะห์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิววัสดุพื้น ก่อนและหลังการฉายรังสี UV โดยใช้เครื่อง FTIR (แสดงในภาพที่ 30) ทำได้โดยนำชิ้นงานทดสอบวางบนแท่นทดสอบ ให้พื้นผิวด้านที่ต้องการวิเคราะห์วางบนแท่นในลักษณะคว่ำ จากนั้นหมุนปรับแท่นเหล็กกอดตัวอย่างไว้ให้ชิ้นงานแนบกับหัวตรวจวัด (sensor) โดยหลักการของการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างเคมีของชิ้นงานตัวอย่าง จากการที่เครื่อง FTIR ทำการยิงรังสีอินฟราเรด (IR) ลงบนชิ้นงานแล้ววัดปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (absorbance) หรือทะลุผ่านออกมา (transmission) จะสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 4000  $\text{cm}^{-1}$  โดยขณะที่ได้รับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กแกมมารังสีอินฟราเรดภายในชิ้นงานจะเกิดการสั่น ของพันธะที่เชื่อมระหว่างอะตอมต่างๆ ภายในโมเลกุลของสาร ซึ่งธรรมชาติทางเคมีในโมเลกุลของสารตัวอย่าง สามารถดูดกลืนพลังงานดังกล่าวได้ที่เลขคลื่นต่างๆ กันไป ดังนั้นในการระบุว่าเป็นสารชนิดใดนั้นสามารถทำได้โดยนำสเปกตรัมของสารที่ทำการตรวจวิเคราะห์หรือตัว “Unknown” ไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบหรือตัว

“Reference” โดยถ้าตำแหน่งเลขคลื่นและจำนวนของสเปกตรัมตรงกัน ทำให้ทราบได้ว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน

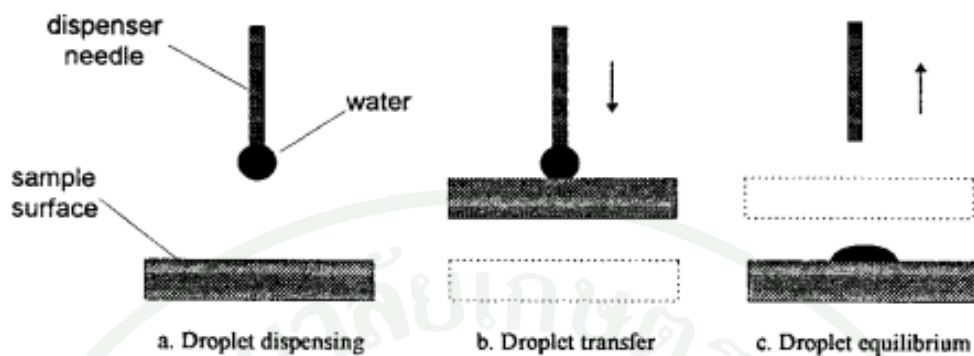


ภาพที่ 30 เครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer

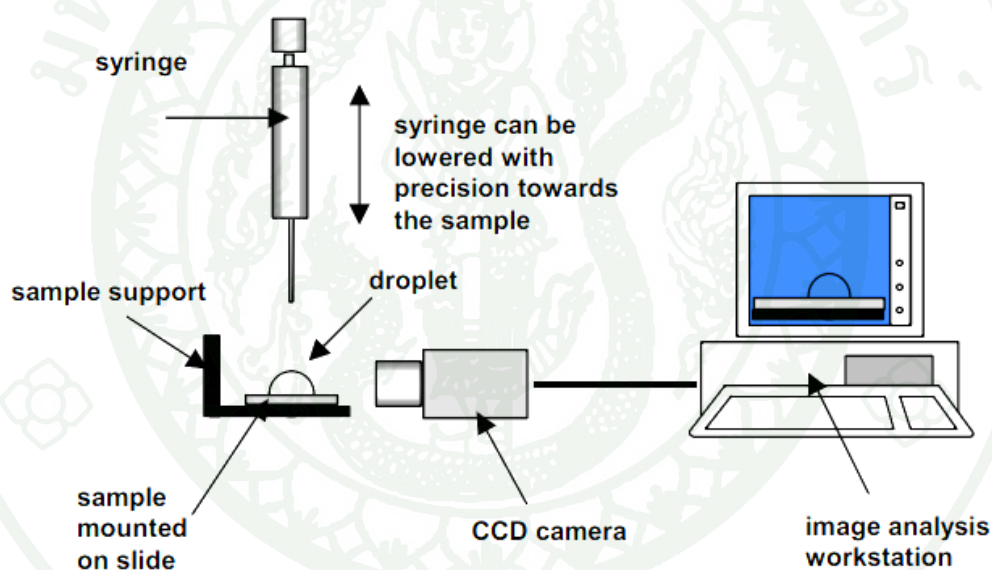
3.2 การวิเคราะห์สมบัติในด้านต่างๆ ของยางไม้ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติม ก่อนและภายหลังผ่านการฉายรังสี UV ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.2.1 การวิเคราะห์ห่มุมสัมผัสของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle meter)

ชิ้นงานทดสอบถูกวางไว้บนแท่นวางชิ้นงาน (stage) โดยพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์ห่มุมสัมผัสในลักษณะหยดน้ำ การทดสอบวัดมุมสัมผัสทำตามมาตรฐาน ASTM D5946-04 ซึ่งได้กำหนดของเหลวที่ใช้หยดควรเป็นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (deionized water) และเทคนิคการหยดน้ำกลั่นลงบนชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 31 โดยเริ่มต้นที่เข็มปลายด้านบนทำการปล่อยหยดน้ำ (dispenser needle) ด้วยอัตราความเร็ว  $1 \mu\text{l}/\text{sec}$  ซึ่งระบบการปล่อยหยดน้ำถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้หยดน้ำแต่ละหยดของการทดสอบมีปริมาตรเท่ากัน โดยปริมาตรของหยดน้ำในการทดสอบเท่ากับ  $3 \mu\text{l}$  ภายหลังจากปล่อยหยดน้ำมาที่ปลายเข็ม แท่นวางชิ้นงานจะถูกเลื่อนขึ้นเพื่อนำชิ้นงานไปรับหยดน้ำด้านบน หลังจากนั้น แท่นวางชิ้นงานจึงเคลื่อนที่ลง ณ ตำแหน่งเดิม กล้องจะทำหน้าที่ถ่ายภาพ โดยซอฟต์แวร์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณวัดมุมสัมผัสทั้งสองด้านของหยดน้ำและนำมาเป็นค่าเฉลี่ย ดังภาพที่ 32 ซึ่งจำนวนครั้งของการทดสอบวัดมุมสัมผัสกำหนดไว้ที่ 10 หยด การรายงานผลการทดลองจึงนำค่ามุมสัมผัสทั้ง 10 ค่ามาเฉลี่ย ได้เป็นค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (average contact angle)



ภาพที่ 31 ลักษณะการหยดน้ำลงบนพื้นผิวตามมาตรฐาน ASTM D5946-04



ภาพที่ 32 เครื่องวัดมุมสัมผัส

ที่มา : Duncan and Mera (2005)

### 3.2.2 ทดสอบสมบัติการบวมพองในน้ำมัน (swelling)

การทดสอบสมบัติการบวมพอง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานยาง ก่อนและหลังการฉายรังสี UV ทำได้โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  ซึ่งน้ำหนักก่อนแช่ลงในโทลูอีน จากนั้นแช่ชิ้นงานทดสอบลงในสารละลายโทลูอีน ที่ทิ้งไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ นำชิ้นงาน

ทดสอบขึ้นมา แล้วชั่งด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบภายหลังแช่ลงในโทลูอีน เพื่อคำนวณปริมาณการบวมพอง ดังสมการที่ 12 ตามมาตรฐาน ASTM D471

$$Q(\%) = \frac{100 \times (M_t - M_0)}{M_0} \quad (12)$$

โดย  $Q$  = ปริมาณการบวมพอง (%)  
 $M_0$  = มวลของชิ้นงานทดสอบก่อนแช่ในโทลูอีน (g)  
 $M_t$  = มวลของชิ้นงานทดสอบหลังแช่ในโทลูอีน (g)

### 3.2.3 การทดสอบสมบัติความแข็ง (hardness)

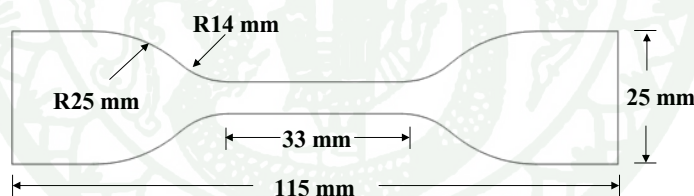
ความแข็งของยาง หมายถึง ความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวง (penetration) ของหัวกด (indenter) ที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด โดยสเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ศูนย์ (สำหรับยางที่อ่อนมาก ๆ) จนถึง 100 (สำหรับยางที่แข็งมาก) โดยเครื่องวัดความแข็งที่ใช้หน่วย shore เรียกว่าเครื่องดูโรมิเตอร์ (durometer) ดังภาพที่ 33 ซึ่งในงานวิจัยศึกษาทดสอบความแข็งของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม รวมทั้งผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณ 30 phr ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมและเวลาในการฉายรังสี UV ต่อสมบัติความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240 เริ่มจากเตรียมชิ้นงานที่มีความหนา 6 mm ทำการกดชิ้นงานด้วยหัวกดให้สัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานยาง จากนั้นอ่านค่าที่ได้จากหน้าจอ



ภาพที่ 33 เครื่องทดสอบความแข็ง

### 3.2.4 การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties)

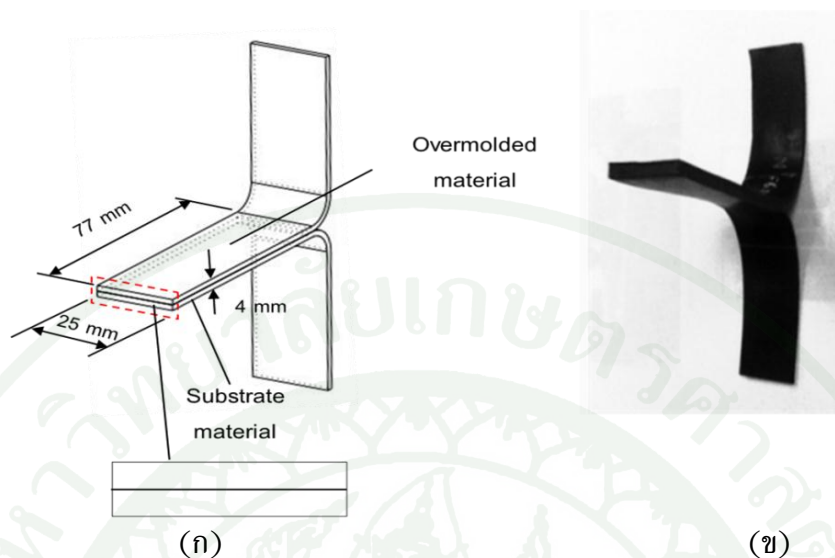
การทดสอบสมบัติแรงดึงของยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป เริ่มจากนำชิ้นงานยางวัสดุพื้นที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติม อัดขึ้นรูปให้มีระดับการคงรูป 50% จากนั้นนำไปผ่านการฉายรังสี UV ที่ระยะเวลาต่างๆ ก่อนนำมาตัดให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C) ดังแสดงในภาพที่ 34 จากนั้นวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องวัดเวอร์เนีย (vernier caliper) โดยทำการวัดความหนา 3 จุดคือบริเวณกึ่งกลางและที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของคอตัมเบลล์ จากนั้นนำค่ากลางไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด แล้วนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) การยืดตัว (elongation) มอดูลัส (modulus) โดยสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นงานทดสอบมาตรฐานรูปคอตัมเบลล์ที่อัตราการดึงคงที่ (constant crosshead speed) โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยระหว่างการดึงเครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของยางแล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว และค่ามอดูลัส ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้น



ภาพที่ 34 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D412 (die C)

### 3.3 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ (bond strength)

การทดสอบสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ โดยทดสอบการดึงลอก (peel test) เริ่มจากนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ มาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ให้มีขนาดกว้าง 25 mm หนา 4 mm ตามมาตรฐาน ASTM D413 ดังแสดงในภาพที่ 35

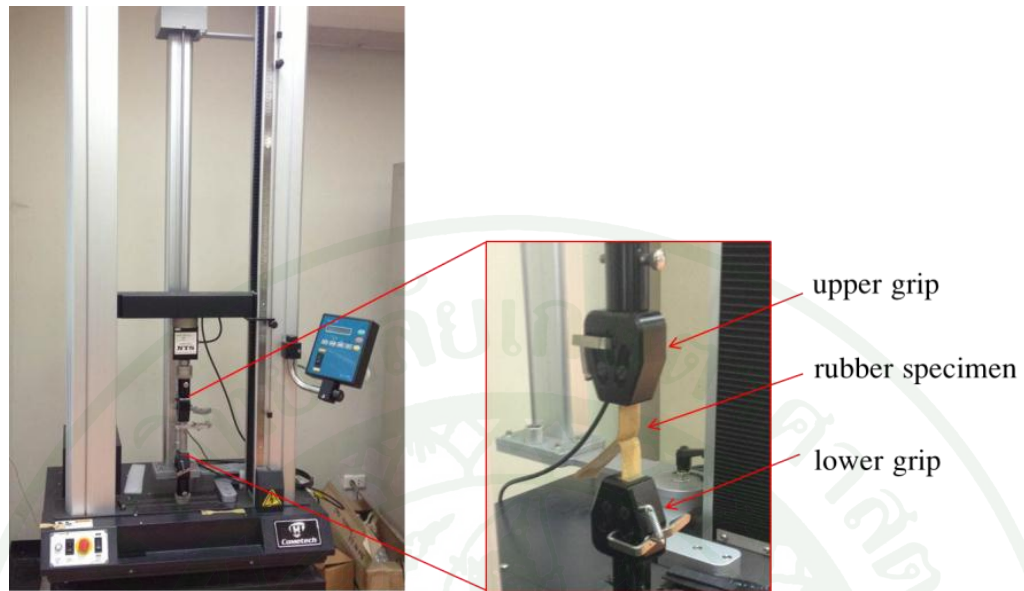


ภาพที่ 35 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ (ก) ขนาดของชิ้นงานทดสอบ และ (ข) ลักษณะของชิ้นงานทดสอบจริง

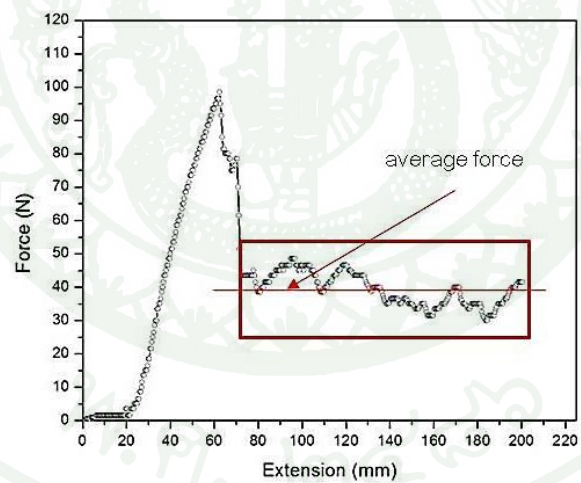
จากนั้นนำไปทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก ด้วยเครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ดังแสดงในภาพที่ 36 โดยนำชิ้นงานยางมาจับยึดด้วยตัวจับยึดของเครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ ทั้งด้านบนและด้านล่าง ใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 50 mm/min ดึงจนกระทั่งชิ้นงานขาดลอกออกจากกัน จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะในการดึงลอก ดังภาพที่ 37 ซึ่งคำนวณหาแรงเฉลี่ยโดยนำค่าที่ได้ในช่วงที่ย่างเริ่มเกิดการดึงลอกมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 13 เพื่อหาค่าความแข็งแรงยึดเกาะ

$$\text{Peel Strength (N/m)} = \frac{\text{Average Force (N)}}{\text{Actual Width (m)}} \quad (13)$$

โดย  $\text{Peel Strength}$  = ความแข็งแรงยึดเกาะ  
 $\text{Average Force}$  = ค่าแรงเฉลี่ย  
 $\text{Actual Width}$  = ค่าความกว้าง



ภาพที่ 36 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงยืดเกาะ โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของบริษัท Cometech รุ่น OC-506 BA



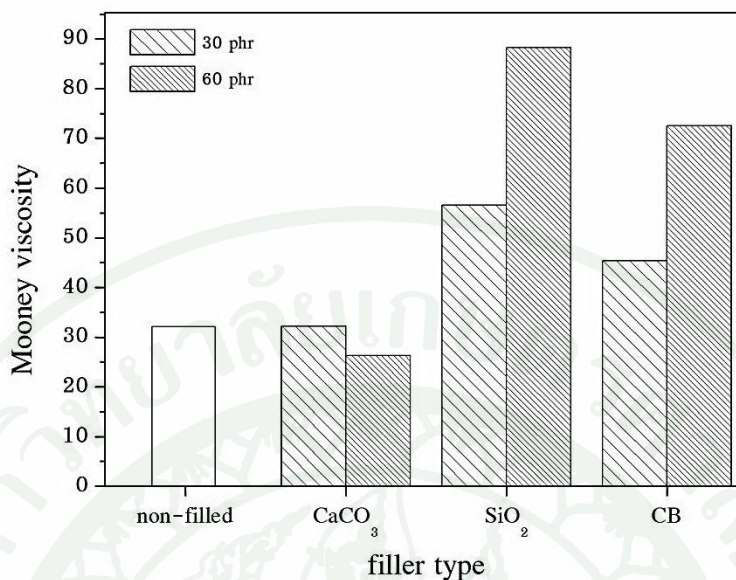
ภาพที่ 37 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะในการดึงลอก

## ผลและวิจารณ์

### 1. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์

#### 1.1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติความหนืดมูนีของยาง

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในภาพที่ 38 พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมลงในยางคอมพาวนด์มีอิทธิพลต่อความหนืดมูนี (Morton, 1973) เมื่อผสมสารตัวเติมในอัตราส่วนที่เท่ากัน ยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลต่อค่าความหนืดมูนีนี้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผสมซิลิกาหรือเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) น้อย และยังไม่มียอันตรกิริยา (interaction) กับเนื้อยาง (Barrow, 1993) ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อยางลดลง (Chuayjuljit *et al.*, 2002) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต จึงไม่ทำให้ความหนืดของยางคอมพาวนด์เปลี่ยนแปลงมากนัก แคลเซียมคาร์บอเนตจึงถูกจัดเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) แต่ช่วยเพิ่มความแข็งและเพิ่มปริมาณเนื้อยาง ลดต้นทุนในการผลิตได้เท่านั้น ในขณะที่ยางผสมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ความหนืดมูนีของยางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อยางมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต มีความสามารถในการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่าและเกิดอันตรกิริยากับเนื้อยางได้ ส่งผลให้สามารถยึดเกาะกับเนื้อยางได้ดี ซิลิกาและเขม่าดำจึงเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing fillers) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนีของยางผสมซิลิกาและเขม่าดำ พบว่า ที่ปริมาณสารตัวเติม 30 และ 60 phr ค่าความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์ที่ผสมซิลิกาส่งกว่ายางคอมพาวนด์ที่ผสมเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ในปริมาณมาก ทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง มีการยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม (agglomerate) ขนาดใหญ่อย่างเหนียวแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก (Leblanc, 2002; Wang *et al.*, 1992) และเกิดเครือข่ายสารตัวเติม (filler-filler network) ภายในยางคอมพาวนด์ ด้วยเหตุนี้ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ยากกว่าเขม่าดำ ทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงขึ้นกว่ายางผสมเขม่าดำ (Choi *et al.*, 2003)

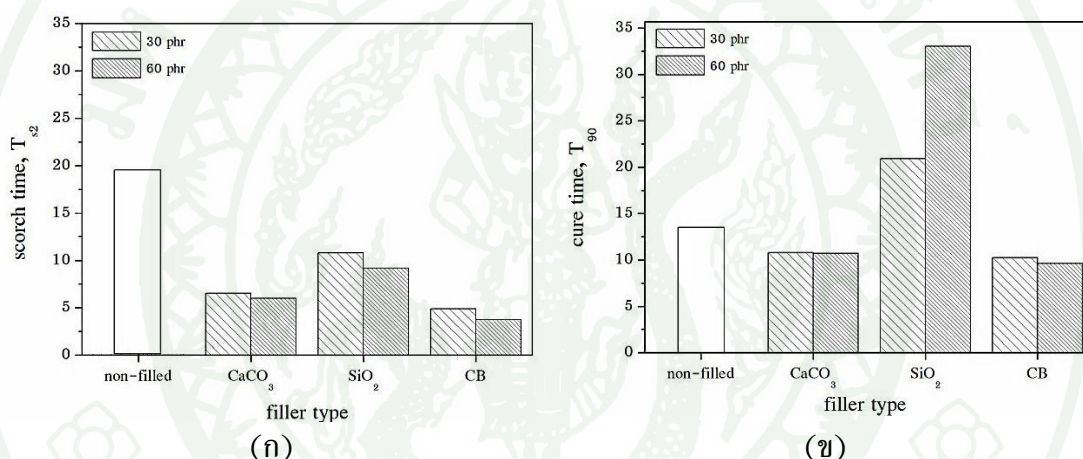


ภาพที่ 38 ค่าความหนืดมูนีย์ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมในชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน

### 1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) พบว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำจะมีเวลาเริ่มคงรูปลดลง ดังแสดงในภาพที่ 39(ก) เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้มีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยซิงค์ออกไซด์ จึงทำให้บริเวณพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีสภาพเป็นด่าง (alkalinity) และคอยช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในการคงรูป (พงษ์ธร, 2550; Hofmann, 1989) สำหรับเขม่าดำเป็นสารตัวเติมมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สูง (Barnett, 2002) เมื่อยางคอมพาวนด์ได้รับความร้อนจึงสามารถแพร่กระจายความร้อนภายในยางคอมพาวนด์ได้ดีกว่า อีกทั้งบริเวณผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บางกลุ่ม เช่น ฟีนอลิก (phenolic) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ควิโนน (quinone) คาร์บอกซิล (carboxyl) และแล็กโตน (lactone) เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยให้เขม่าดำเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลยางได้ดี (Hofmann, 1989; Rattanasom and Prasertsri, 2009) ส่งผลให้ยางผสมเขม่าดำสามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วและทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเขม่าดำผสมกับยางคอมพาวนด์ จึงมีระยะเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่สั้นลง เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาคงรูป (cure time) ดังแสดงในภาพที่ 39(ข) พบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำ ส่งผลให้เวลาในการคงรูปของยางมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น พบว่า ระยะเวลาเริ่มคงรูปและ

เวลาในการคงรูปของยางเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยา เช่น กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น มาไว้บริเวณผิวของซิลิกา (Ciesielski, 1999; Leblance, 2002) ซึ่งพอลิเอทิลีนไกลคอลที่บดผสมพร้อมกับ ซิลิกา สามารถช่วยลดปริมาณการดูดซับดังกล่าวได้ เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลแทนซิลิกา ส่งผลให้สารตัวเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับโดยหมู่ไฮดรอกซิลมีปริมาณลดลง (พงษ์ธร, 2550) แต่เนื่องจากเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่เพิ่มขึ้นด้วย อาจไม่เพียงพอที่จะเข้าไปช่วยดูดซับสารตัวเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยา ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการเกิดกระบวนการคงรูปอย่างสมบูรณ์ช้าลง (delayed cure)



ภาพที่ 39 (ก) เวลาเริ่มคงรูป และ (ข) เวลาคงรูป ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมในชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

## 2. อิทธิพลของปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

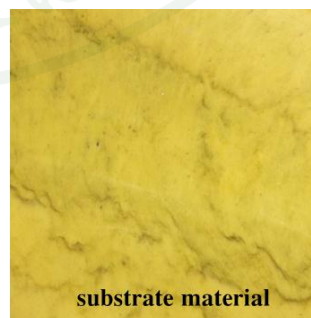
### 2.1 อิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้น

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้นที่มีผลต่อความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม อัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ่ง โดยใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa อุณหภูมิในการขึ้นรูป 150°C และใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 0 25 50 75 และ 100% ตามลำดับ โดยใช้วัสดุซ้อนทับเป็นยางคอมพาวนด์ที่ยังไม่เริ่มคงรูป พบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ยังไม่เกิดการเชื่อมขวางเมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ่งแล้ว ชิ้นงานมีการยึดเกาะกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ

พบว่า ไม่สามารถดึงลอกชิ้นงานให้ขาดออกจากกันได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากสมบัติความเหนียวติด (tack property) สูงของยางธรรมชาติ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางที่ยังไม่ผ่านการคงรูปสามารถเคลื่อนไหวได้ดี ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามและการเกี่ยวพันกัน (intermolecular diffusion and molecular entanglement) แล้วส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะกันเองของยางธรรมชาติสูง (พงษ์ธร, 2550; วราภรณ์, 2552) จากนั้นเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 25% พบว่า บริเวณผิวของชิ้นงานมีความขรุขระ มีโพรงอากาศ (void) ภายในยางเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการเปิดฟิมพ์ออกทันทีในขณะที่พื้นผิวของยางวัสดุพื้นยังไม่สุกตัว ดังแสดงในภาพที่ 40(ก) เนื่องจากที่ระดับการคงรูปดังกล่าวอยู่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการคงรูป ส่งผลให้ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบได้ นอกจากนี้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปต่ำ (0 ถึง 25%) ชิ้นงานยังมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุหลายชนิด (multi-component) หรือมีหลากหลายสี ตัวอย่างเช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบที่มีระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 50 ถึง 100% พบว่า วัสดุพื้นมีลักษณะเป็นรูปร่างที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ผิวภายนอกเรียบ และไม่ปรากฏโพรงอากาศภายในชิ้นงาน ดังภาพที่ 40(ข) ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด โดยวัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปยางเท่ากับ 50% มีความต้านทานต่อการดึงลอกสูงสุด ในขณะที่เมื่อระดับการคงรูปเพิ่มขึ้นเป็น 75% และ 100% พบว่า ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการดึงลอกลดลง ดังภาพที่ 41 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเหนียวของยางแปรผันตรงกับระดับการคงรูป ดังภาพที่ 42 และจากชั้นการคงรูป (cure layer) ที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นผิวเนื่องจากขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลภายในแม่พิมพ์ มีการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่ผิวของเนื้อยางคอมพาวนด์ ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาในการคงรูปนานขึ้น ทำให้ที่ผิวเกิดการคงรูปหนาขึ้น ดังภาพที่ 43 ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีความสามารถในการไหลและแพร่ข้ามบริเวณผิวสัมผัสลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวคล้ายคลึงกับการไหลภายในแม่พิมพ์ของเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่เกิดเป็นชั้นแข็งตัวที่ผิว (solidified skin layer) (Martinez *et al.*, 2011)

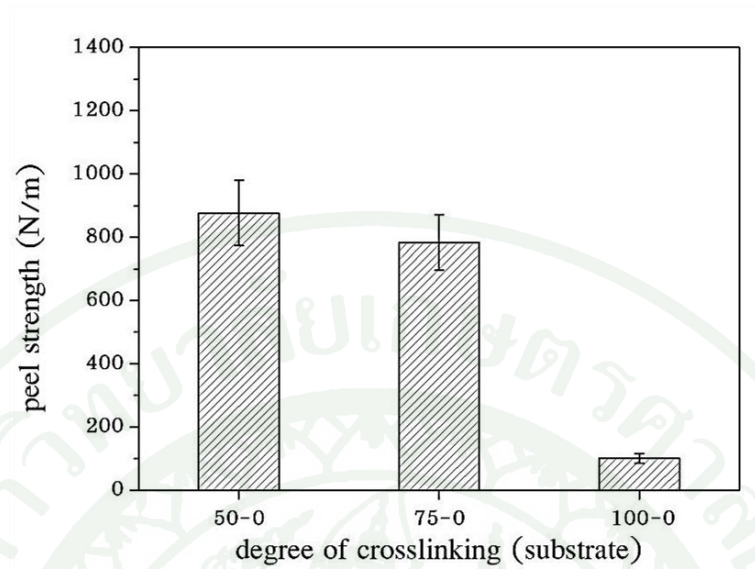


(ก)

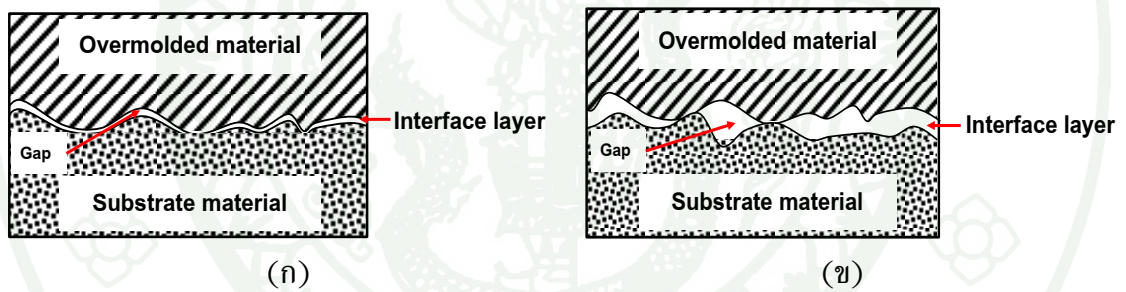


(ข)

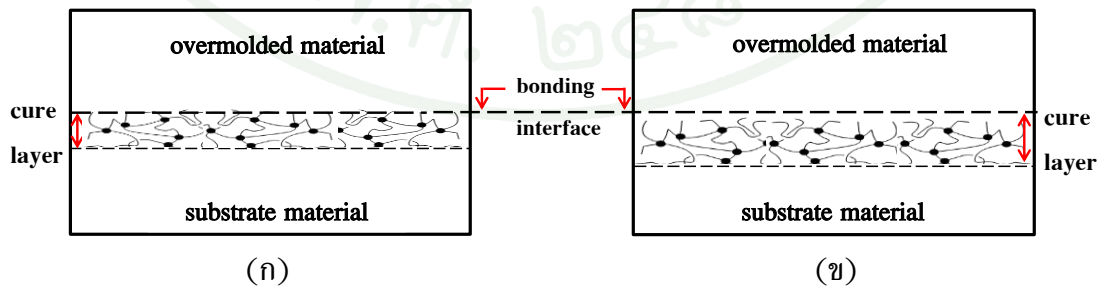
ภาพที่ 40 ลักษณะของวัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูป (ก) 25% และ (ข) 50 %



ภาพที่ 41 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ระดับการคงรูปวัสดุพื้นต่างๆ



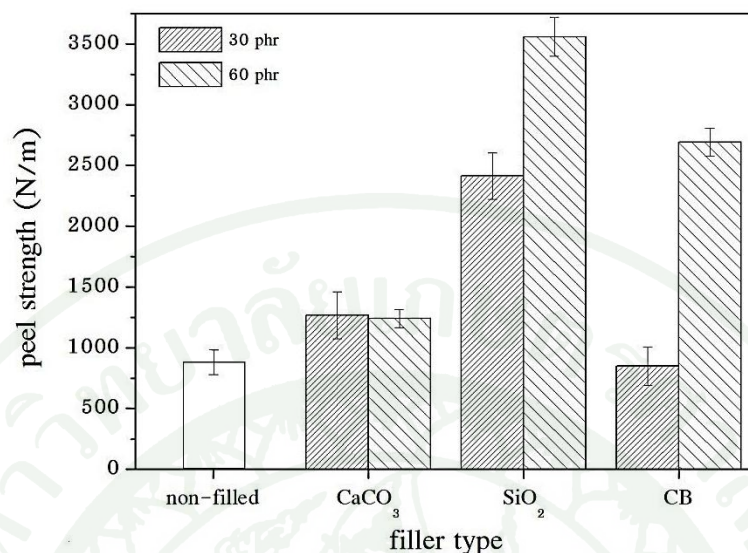
ภาพที่ 42 แบบจำลองกลไกการแทรกตัวที่หน้าสัมผัสในกระบวนการโอเวอร์โมลด์ดิ้ง  
(ก) ยางความหนืดต่ำ และ (ข) ยางความหนืดสูง



ภาพที่ 43 แบบจำลองชั้นการคงรูปของยางที่เกิดขึ้นบริเวณที่ชั้นผิวของวัสดุพื้น  
(ก) ระดับการคงรูปต่ำ และ (ข) ระดับการคงรูปสูง

## 2.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ พบว่า เมื่อวัสดุพื้นมีระดับการคงรูปที่ 50% มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์िंग ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นในการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม จึงใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมบนยางวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ในที่นี้จะเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่มีการผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเขม่าดำ โดยอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C และใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 44 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่เปลี่ยนแปลงนัก ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งไม่เกิดอันตรกิริยากับเนื้อยาง เมื่อเทียบกับซิลิกาและเขม่าดำ อย่างไรก็ตามยางผสมซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่สุด อาจมีสาเหตุมาจาก ยางผสมซิลิกาเกิดการคงรูปซ้ำ ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาสัมผัส (contact time) นานขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้ เป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัส (contact area) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแพร่ข้ามได้ในระยะความลึก (depth of diffusion) ที่เพิ่มขึ้น (Kim and Suh, 1986) ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากผสมเขม่าดำ พบว่า ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณสารตัวเติม 60 phr ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมเขม่าดำอาจมีสมบัติความเป็นขั้วมากขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างหน้าสัมผัส อีกทั้งยังมีการนำความร้อนที่ดี ทำให้ที่บริเวณสัมผัสเกิดการแพร่ข้ามสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



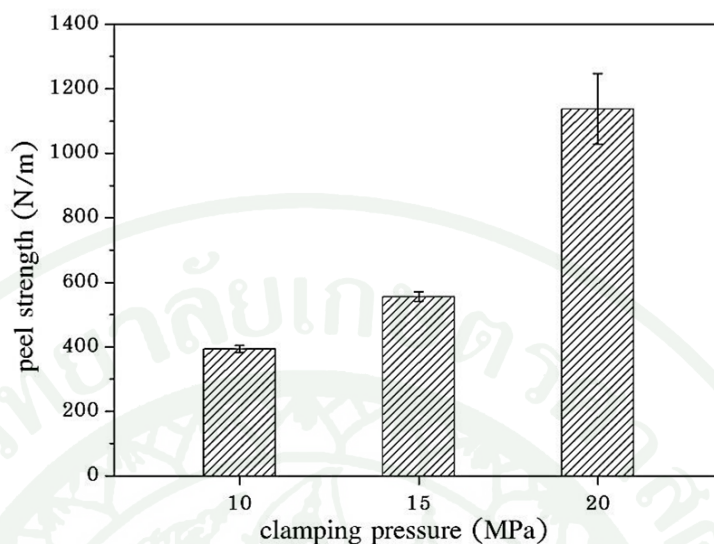
ภาพที่ 44 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม ในชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

### 3. อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุชั้นทับของยางผสมเขม่าดำ ในปริมาณเท่ากัน โดยวัสดุพื้นมีระดับการคงรูป 50% และวัสดุชั้นทับเป็นยางคอมพาวด์ที่ยังไม่เริ่มคงรูป

#### 3.1 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำปริมาณ 30 phr ซึ่งอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์िंग ที่อุณหภูมิ 150°C แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสูงขึ้นมากเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์จาก 15 ถึง 20 MPa ดังภาพที่ 45 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ที่บริเวณหน้าสัมผัส ยางสามารถแทรกสัมผัสกันได้ เนื่องจากสมบัติการไหลของยางที่สามารถอัดตัวได้ (compressible fluid) ทำให้ที่บริเวณหน้าสัมผัสมีความหนาแน่นของยางมากขึ้น และส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลที่บริเวณหน้าสัมผัสมีโอกาสแพร่ข้ามและเกี่ยวพันกันเพิ่มมากขึ้น (Patcharaphun *et al.*, 2011, Heamtanon, 2005)

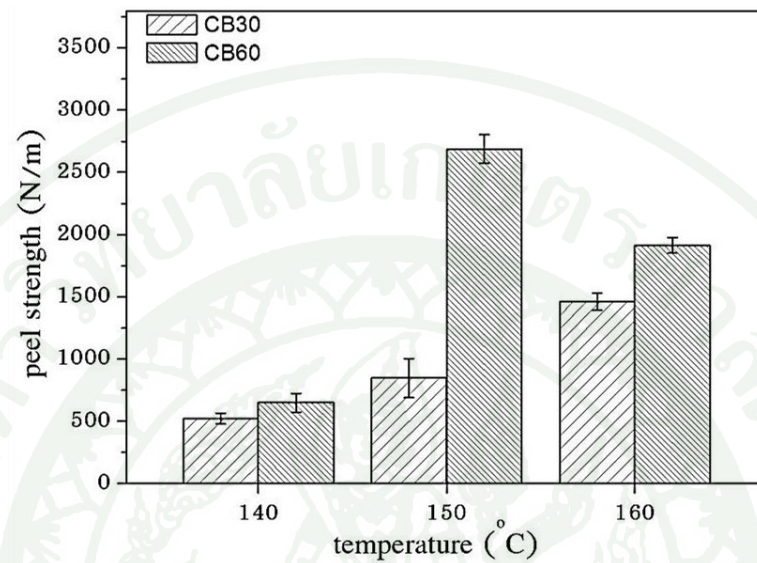


ภาพที่ 45 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ ในปริมาณ 30 phr ที่แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างๆ

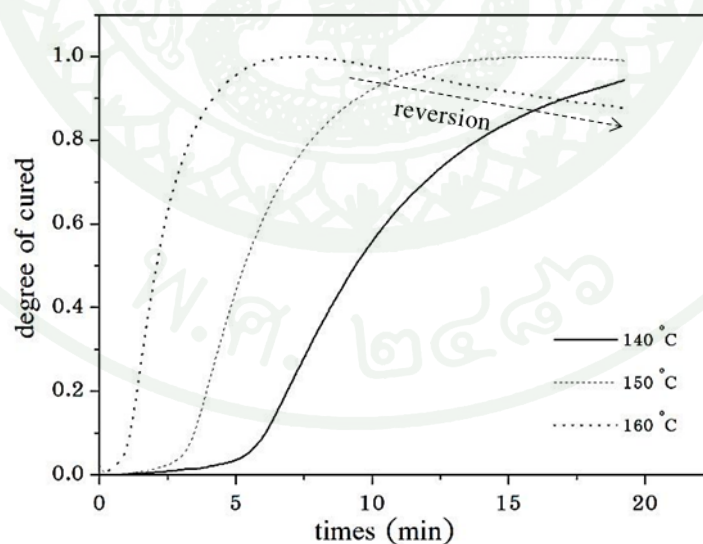
### 3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์

ภาพที่ 46 แสดงอิทธิพลของแม่พิมพ์ที่มีต่อค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางผสมเขม่าดำปริมาณ 30 phr และ 60 phr ซึ่งใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแพร่กระจายความร้อน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างผิวสัมผัสได้ดี อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิยังส่งผลให้ระยะความลึกของการแพร่ที่บริเวณผิวสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น (Patcharaphun and Krongthanin, 2010) ดังนั้นจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มากขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่ช่วงอุณหภูมิเท่ากัน พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม เนื่องจากเขม่าดำมีสมบัติการนำความร้อนสูง (Hofmann, 1989) ทำให้เกิดการแพร่ข้ามที่บริเวณหน้าสัมผัสได้ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณสารตัวเติมเท่ากับ 60 phr พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วง  $150^{\circ}\text{C}$  ถึง  $160^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบคงรูปที่ใช้เป็นระบบ CV ที่มีสมบัติทนต่อความร้อนต่ำ ประกอบกับปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทำให้อย่างคอมพาวนด์สามารถนำความร้อนและแพร่กระจายความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (heat deterioration) (Patcharaphun *et al.*, 2011) โดยสามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบ MDR ที่พบปรากฏการณ์ reversion เกิดขึ้น

อย่างชัดเจน เนื่องจากความร้อนที่สะสมอยู่มากทำให้พันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นน้อยกว่าปริมาณการเชื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 47



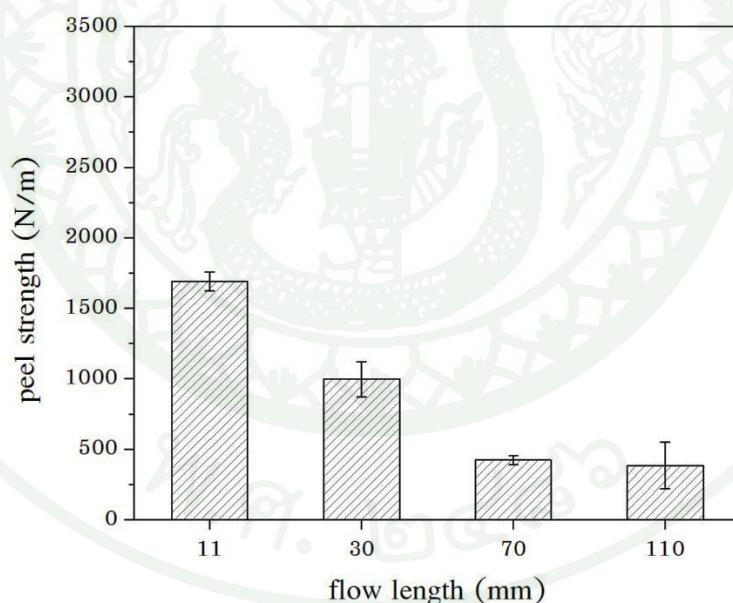
ภาพที่ 46 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ ในปริมาณ 30 และ 60 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 47 ระดับการคงรูปของยางผสมเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.3 อิทธิพลของระยะทางการไหล

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะทางการไหล (flow length) ของวัสดุซ้อนทับ ยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 30 phr ซึ่งอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ที่แรงดันปิดแม่พิมพ์เท่ากับ 20 MPa และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C พบว่า ระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานลดลงอย่างมาก ดังแสดงในภาพที่ 48 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุซ้อนทับที่ยังไม่เริ่มคงรูปเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางหรือสุกตัวก่อนการไหลเต็มเบ้าพิมพ์ กล่าวคือวัสดุด้านที่ติดผนังมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงเกิดเป็นชั้นผิวที่เย็นตัว ทำให้การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างชิ้นงานลดน้อยลง และอาจเกิดช่องว่างอากาศ ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าที่ลดลง (Patcharaphun and Krongthanin, 2010) อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงที่ระยะทางการไหลเท่ากับ 70 mm และ 110 mm ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากยางคอมพาวนด์ ณ ตำแหน่งที่ระยะทางการไหลมากกว่า 70 mm ผิวหน้าของยางคอมพาวนด์เกิดการเชื่อมขวางจนมีความสามารถในการแพร่ข้ามที่ต่ำมาก



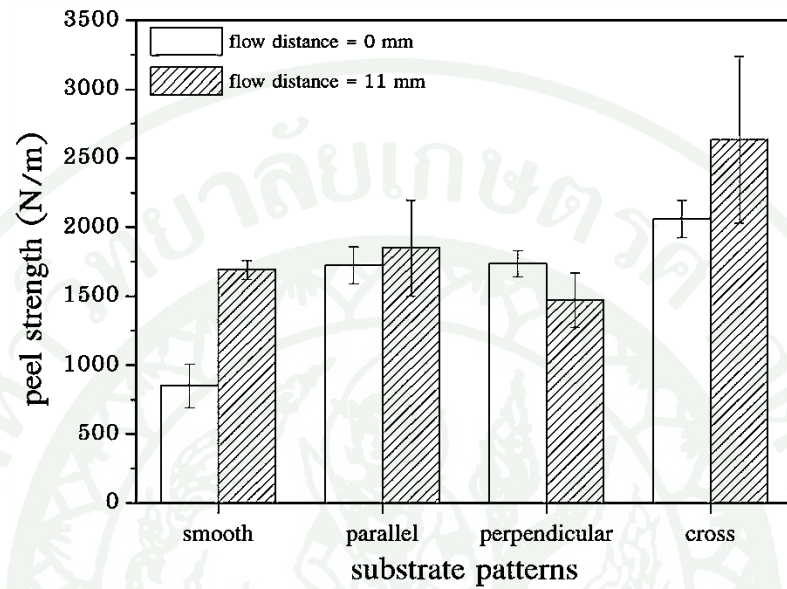
ภาพที่ 48 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของวัสดุซ้อนทับที่ยังไม่เริ่มคงรูป ของยางผสมเขม่าดำ ในปริมาณ 30 phr ที่ระยะทางการไหลต่างๆ

#### 4. อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่ส่งผลต่อความแข็งแรงการยึดเกาะ

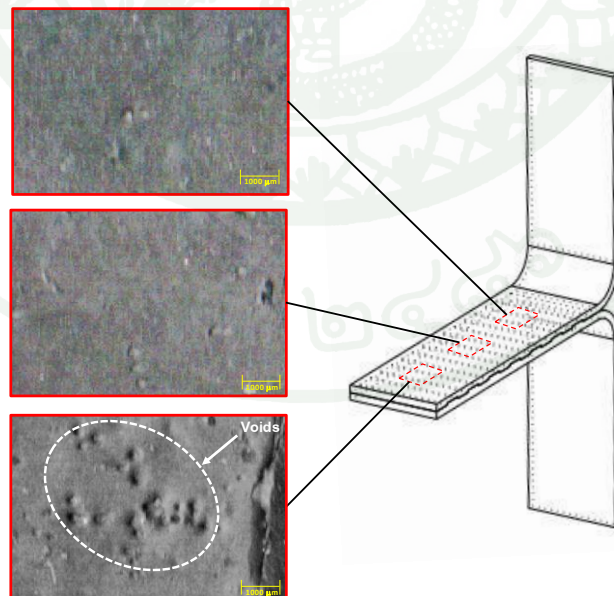
ภาพที่ 49 แสดงอิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และระยะทางการไหลที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอกของยางผสมเขม่าดำ ปริมาณ 30 phr พบว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในการศึกษาการลดระยะทางการไหล พบว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุพื้นด้วยอินเลอร์ที่ตามแนวทิศทางขนานและทิศทางขวางการไหล (พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น 5%) ให้ความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากัน ขณะที่เมื่อพิจารณาแผ่นลอนตาราง (พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น 10%) พบว่า ให้ความแข็งแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นมากที่สุด อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของชิ้นงานไม่ต่างจากแบบขนานและขวางการไหลมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีอากาศตกค้างอยู่บริเวณเบ้าพิมพ์ ส่งผลให้พื้นที่สัมผัสบริเวณหน้าสัมผัสลดลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาการศึกษาปัจจัยจากระยะทางการไหล โดยวางวัสดุพื้นให้มีระยะทางการไหลเป็นระยะ 11 mm ผ่านลอนรูปแบบต่างๆ ที่ออกแบบไว้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่ยึดเกาะตามแนวทิศทางขนานการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสกันของยางเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสโดยใช้อินเลอร์แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล พบว่า มีความแข็งแรงลดลง ทั้งที่มีพื้นที่สัมผัสเท่ากับชิ้นงานที่ใช้อินเลอร์แผ่นลอนทิศทางขนานการไหล เนื่องจากเป็นการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งใช้ระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งยางคอมพาวนด์ไหลได้ยากยิ่งขึ้น ส่งผลให้อาจมีการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการไหลเต็มแม่พิมพ์ และอาจมีอากาศที่บริเวณขอบมุมของร่องบากผสมเข้ากับเนื้อยางในระหว่างการไหล ส่งผลให้ที่บริเวณส่วนสุดท้ายของระยะการไหลเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 50 เป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้แผ่นลอนตาราง พบว่า ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการสัมผัสเพิ่มขึ้น อีกทั้งยางคอมพาวนด์สามารถไหลได้ดี ซึ่งไม่ปรากฏโพรงอากาศในส่วนสุดท้ายของชิ้นงาน

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างการใช้แผ่นอินเลอร์ชนิดเดียวกัน จากผลการทดสอบ พบว่า การวางยางคอมพาวนด์ให้มีระยะทางการไหล 11 mm ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าการวางยางคอมพาวนด์ขนาดพอดีกับเบ้าพิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจากการวางให้ยางมีระยะทางการไหล เมื่อยางได้รับความร้อนและแรงดัน ทำใหยางสามารถไหลพาอากาศที่ติดค้างอยู่บริเวณหน้าพิมพ์ได้ ทำให้พื้นที่สัมผัสของยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการวางวัสดุพื้นบนอินเลอร์แผ่นทิศทางขวางการไหล พบว่า ความแข็งแรงยึดเกาะต่ำกว่าการวางยางคอมพาวนด์ขนาดพอดีกับเบ้าพิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจาก อาจมีอากาศที่ตกค้างบริเวณขอบมุมร่องบาก ส่งผลให้พื้น

ผิวสัมผัสลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการวางขนาดพอดีกับเข้าพิมพ์ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสโดยตรง



ภาพที่ 49 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับของอินสเอร์รูปแบบต่างๆ



ภาพที่ 50 ลักษณะของพื้นผิวชั้นงานที่ใช้อินสเอร์แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล เมื่อวางชั้นงานให้มีระยะทางการไหล 11 mm

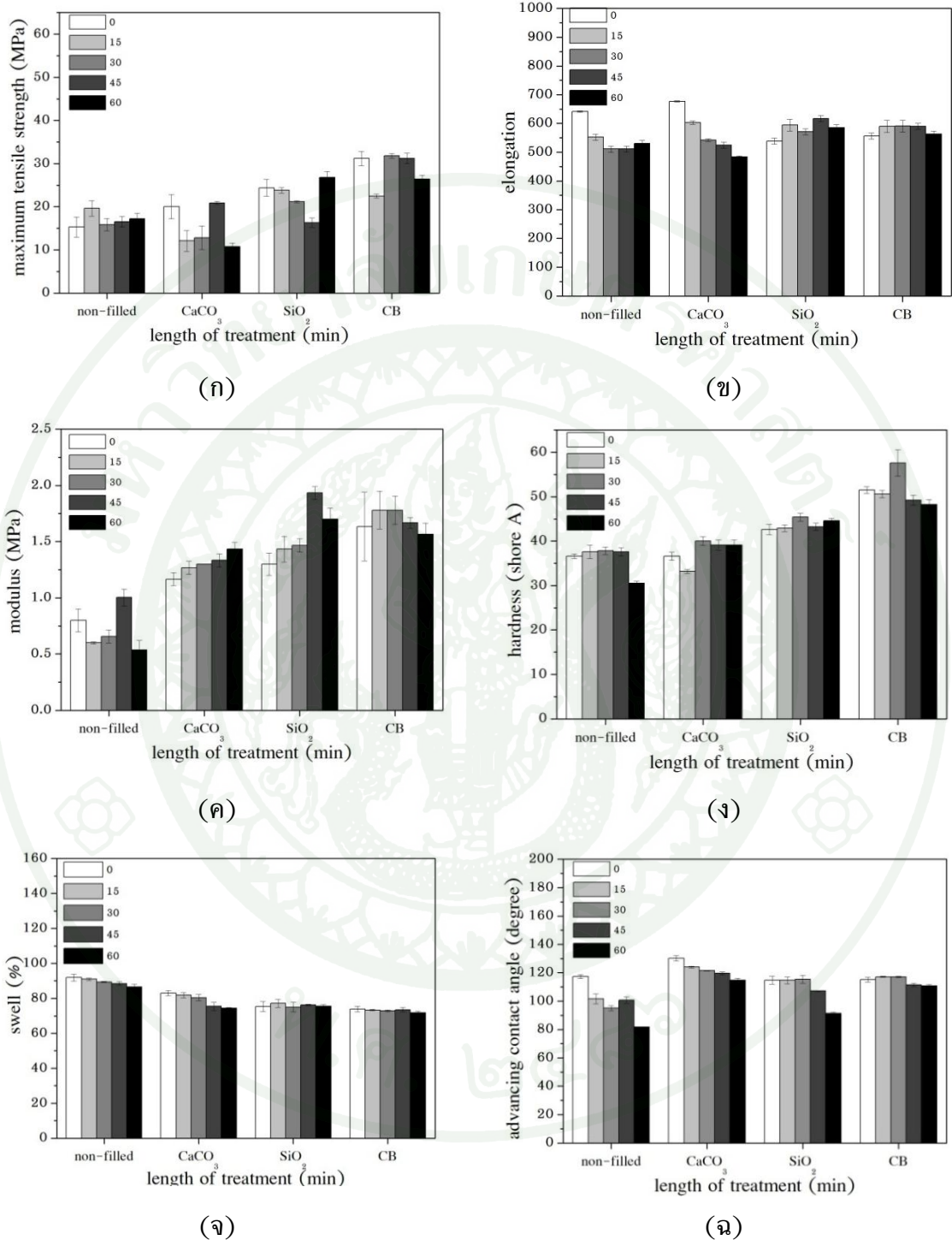
## 5. การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุพื้นโดยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV)

5.1 ผลการทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติม ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่เวลาต่าง ๆ

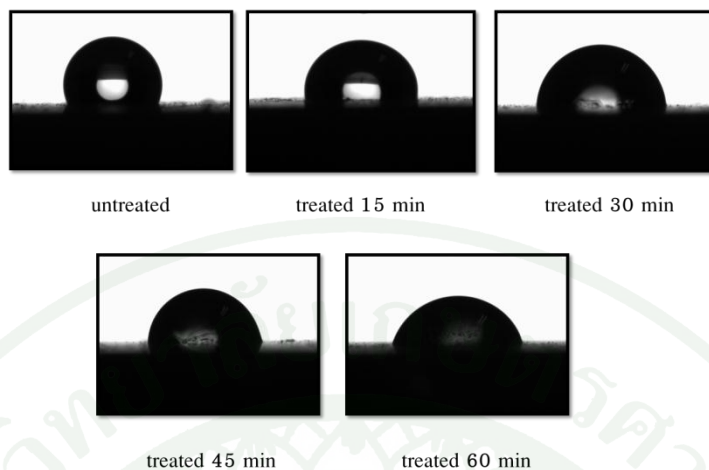
ภาพที่ 51 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสารตัวเติมและเวลาในการฉายรังสีที่ส่งผลสมบัติด้านต่าง ๆ ของยางวัสดุพื้นทั้งยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติม ในปริมาณ 30 phr ซึ่งผ่านการคงรูป 50% ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa จากผลการทดสอบ พบว่า การผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่ส่งผลต่อสมบัติต้านทานแรงดึงสูงสุด (maximum tensile strength) เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดใหญ่ และไม่เกิดอันตรกิริยากับเนื้อยาง จึงถูกจัดเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง ซึ่งทำหน้าที่ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต (Hofmann, 1988) ในขณะที่การผสมซิลิกาและเขม่าดำพบว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังภาพที่ 51(ก) เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพและมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี เมื่อพิจารณาผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (elongation) ดังภาพที่ 51(ข) พบว่า สารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำ ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาดลดลงเมื่อเทียบกับยางไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับผลทดสอบค่ามอดูลัส (modulus) ดังภาพที่ 51(ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบดผสมสารตัวเติมซิลิกาและเขม่าดำทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น กล่าวคือต้องใช้แรงดึงมากขึ้นในการทำให้ยางมีระยะยืดตัวเท่ากับ 100% เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง (hardness) ดังภาพที่ 51(ง) พบว่า ยางธรรมชาติที่บดผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรง มีผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดอันตรกิริยาที่ติดกับเนื้อยาง จึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลดีขึ้น รวมทั้งส่งผลในปริมาณการบวมพอง (swelling) ลดลง เนื่องจากสารตัวเติมที่ผสมอยู่ในเนื้อยางไปขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลอื่น ทำให้ยางมีความต้านทานการบวมพองมากขึ้น เมื่อเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังภาพที่ 51(จ) และเมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสเฉื่อย (advancing contact angle) พบว่า การบดผสมสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสเฉื่อย ดังภาพที่ 51(ฉ) เนื่องจากการทดสอบมุมสัมผัสเป็นการหยดน้ำบนพื้นผิวของยางชนิดเดียวกันที่ผ่านการคงรูป 50% ทำให้ค่ามุมสัมผัสเฉื่อยไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

เมื่อพัฒนาปรับปรุงวัสดุพื้นโดยเทคนิคการฉายรังสี UV เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการฉายรังสี UV ต่อสมบัติในด้านต่าง ๆ พบว่า เมื่อเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลมากนัก โดยเฉพาะกลุ่มยางที่บดผสมสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกาและเขม่าดำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าสมบัติต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์

การยึดตัว ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรงรวมทั้งปริมาณการบวมพองไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงที่มีอันตรกิริยาที่ติดกับเนื้อยาง จึงส่งผลให้ทนต่อการเสื่อมสภาพที่ดีขึ้น ขณะที่เมื่อพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของยางไม่ผสมสารตัวเติม ที่ระยะเวลาการฉายรังสี 15 นาที ถึง 45 นาที พบว่า เมื่อระยะเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ขณะที่การบวมพองลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเวลาการฉายรังสี 60 นาที พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (chain scission) ของพอลิเมอร์ ภายหลังจากการฉายรังสี ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง (Eve and Mohr, 2009) เช่น ค่าความแข็งแรงค่ามอดูลัส และสมบัติต้านทานแรงดึงสูงสุด เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย พบว่า การเพิ่มเวลาในการฉายรังสี ทำให้ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยของยางไม่ผสมสารตัวเติมผสมสารตัวเติมแคลเซียมและซิลิกา มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเปียก (wettability) ของชิ้นงานที่ดี และยังมีพลังงานพื้นผิว (surface energy) ที่เพิ่มขึ้น (Duncan and Mera, 2005; Romero-Sanchez *et al.* 2005) รวมทั้งแสดงถึงสมบัติความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยสอดคล้องกับลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวที่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนในยางไม่ผสมสารตัวเติม ดังภาพที่ 52 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสารตัวเติมชนิดเขม่าดำพบว่า ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมเขม่าดำมีความสามารถในการดูดซับรังสี UV (พงษ์ธร, 2550) รวมทั้งเขม่าดำมีสมบัติป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของออกซิเจนจากหมู่ฟังก์ชันฟีนอลิกและควิโนนิก ซึ่งเป็นสารป้องกันการออกซิเดชัน (antioxidants) ทำให้ยางมีสมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพที่ดีขึ้น (Liu and Harrocks, 2002)



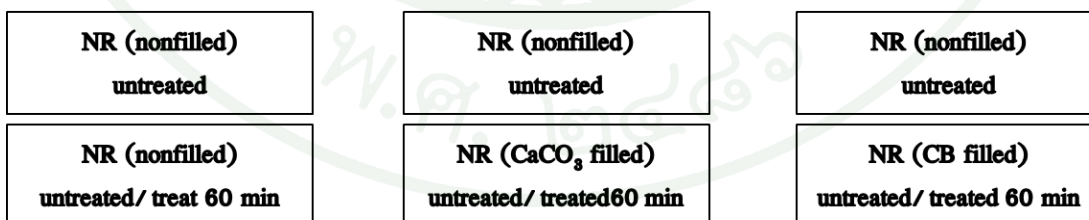
ภาพที่ 51 ผลการทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV



ภาพที่ 52 ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวของวัสดุพื้นยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่เวลาต่างๆ กัน

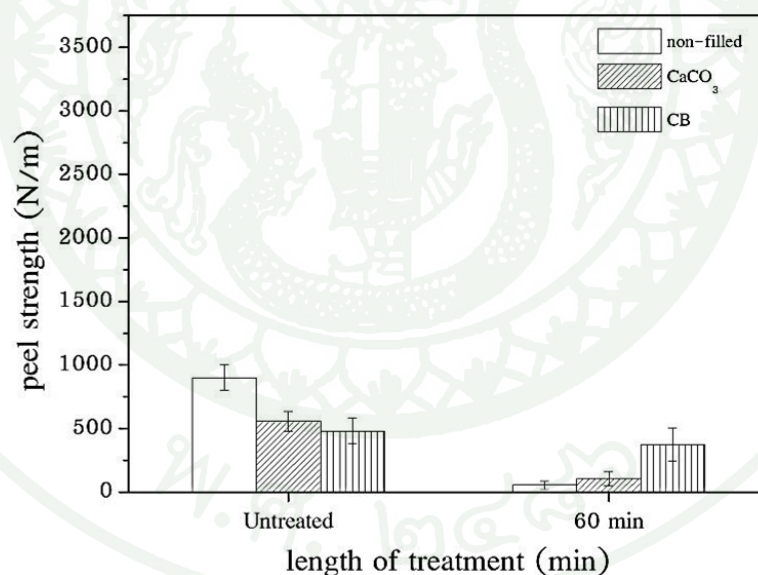
### 5.2 อิทธิพลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยรังสี UV ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

ภาพที่ 53 แสดงคู่อิเวศโมลซึ่งประกอบด้วยวัสดุพื้นทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม ผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำปริมาณ 30 phr ที่ระดับการคงรูป 50% ก่อนและหลังการฉายรังสีที่เวลา 60 นาที โดยวัสดุซ้อนทับเป็นยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม (ยังไม่เริ่มคงรูป) และไม่ผ่านการฉายรังสี จากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์-โมลดิ้งที่อุณหภูมิ 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa จนกระทั่งยางคงรูปสมบูรณ์ เพื่อศึกษาความแข็งแรงยึดเกาะ

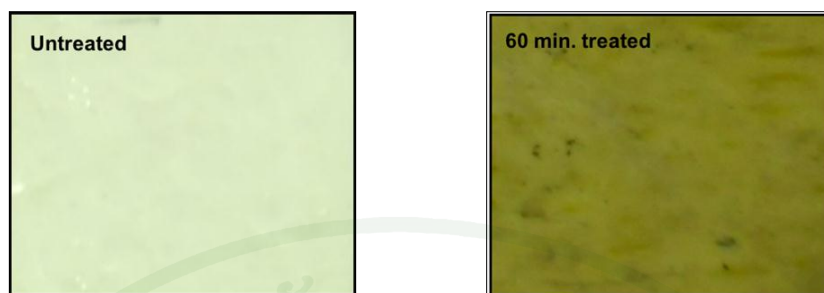


ภาพที่ 53 ชนิดของยางคู่อิเวศโมลในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก ดังภาพที่ 54 พบว่าภายหลังการฉายรังสี 60 นาที ความแข็งแรงของชิ้นงานยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสี ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของยางวัสดุพื้น เนื่องจากการฉายรังสี UV จะไปตัดสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ความแข็งแรงทางกลลดลงดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของชิ้นผิวที่มีสีเหลืองเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 55 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาก่อนการฉายรังสี พบว่า ยางผสมสารตัวเติมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตและเซม่าตา มีความสามารถในการยึดเกาะต่ำกว่ายางไม่ผสมสารตัวเติม ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอนุภาคของสารตัวเติม เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกตัวเพื่อสัมผัสกันเกิดได้น้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาภายหลังการฉายรังสี UV เท่ากับ 60 นาที พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางไม่ผสมสารตัวเติมลดลงมากที่สุด จากการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น ส่งผลให้อาจเกิดการแพร่ข้ามระหว่างหน้าสัมผัสลดลง ขณะที่ยางผสมเซม่าตาให้ความแข็งแรงยึดเกาะมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมเซม่าตาช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพจากรังสี UV (Liu and Harrocks, 2002)



ภาพที่ 54 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยรังสี UV



(ก)

(ข)

ภาพที่ 55 พื้นผิววัสดุพื้นของยางไม่ผสมสารตัวเติม (ก) ก่อนการฉายรังสี และ (ข) หลังการฉายรังสี 60 นาที

## 6. กรณีศึกษา

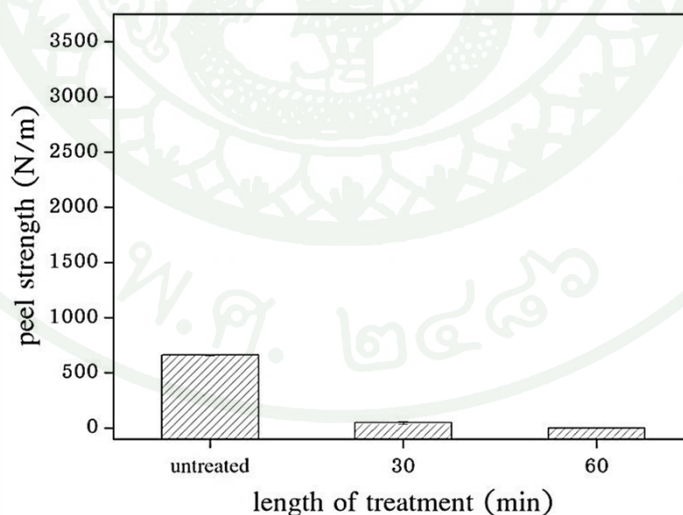
### 6.1 กรณีศึกษายางพื้นรองเท้า

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตยางรองเท้ามีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังมีการพัฒนาและออกแบบให้ผลิตภัณฑ์มีความทันสมัย มีความกระชับ รองรับน้ำหนักและเหมาะสมกับสรีระเท้าของผู้สวมใส่ เพื่อสุขภาพเท้าที่ดีรวมทั้งตอบสนองต่อการใช้งานที่มีความหลากหลายมากขึ้น อย่างไรก็ตามปัญหาที่ยังคงพบมากในผลิตภัณฑ์พื้นยางรองเท้า คือการขาดหรือหลุดลอกระหว่างวัสดุพื้นกับวัสดุชั้นทับ ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตพื้นยางรองเท้านิยมใช้วัสดุพื้นเป็นยางผสมซิลิกา เนื่องจากเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอันสวยงามและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) เป็นต้น (พงษ์ธร, 2550) ขณะที่วัสดุชั้นทับเป็นยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีสมบัติเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมความแข็งแรงและช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษากรณีพื้นยางรองเท้ารวมทั้งศึกษาแนวทางการปรับปรุงความแข็งแรงยึดเกาะด้วยเทคนิคการฉายรังสี UV โดยทำการศึกษาวัสดุพื้นยางผสมซิลิกาที่มีระดับการคงรูป 50% ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่ใช้เวลา 30 และ 60 นาที กับวัสดุชั้นทับยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ยังไม่เริ่มคงรูปรวมทั้งไม่ผ่านการฉายรังสี แสดงดังภาพที่ 56 นำมาอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปเท่ากับ 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa จนกระทั่งวัสดุโอเวอร์โมลด์คงรูปสมบูรณ์ จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก

NR (CaCO <sub>3</sub> filled) untreated	NR (CaCO <sub>3</sub> filled) untreated	NR (CaCO <sub>3</sub> filled) untreated
NR (SiO <sub>2</sub> filled) untreated	NR (SiO <sub>2</sub> filled) treated 30 min	NR (SiO <sub>2</sub> filled) treated 60 min

ภาพที่ 56 คู่อิโวนอร์โมลที่ศึกษากรณีพื้นยางรองเท้าระหว่างวัสดุพื้นยางผสมซิลิกาและวัสดุ  
ชั้นทับเป็นยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

จากภาพที่ 57 พบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง เมื่อเวลาในการฉายรังสีวัสดุ  
พื้นเพิ่มขึ้น โดยพบว่าก่อนการฉายรังสีชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด และมีค่าความต้านทานต่อ  
การดึงลอกเท่ากับ 660.69 N/m อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาในการฉายรังสีวัสดุพื้นเท่ากับ 30  
นาที และ 60 นาที พบความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงอย่างมากเท่ากับ 46.43 N/m และ 0 N/m  
ตามลำดับ แม้ว่าจากผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยเมื่อเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น แสดงถึง  
ความเป็นขั้วของวัสดุพื้นยางธรรมชาติผสมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกันก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องจาก  
ผลกระทบของเวลาในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้อาจเกิดการเสื่อมสภาพของยางวัสดุพื้น ส่งผลให้  
ความสามารถในการแพร่ข้ามบริเวณหน้าสัมผัสลดลง



ภาพที่ 57 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกในกรณีศึกษาพื้นยางรองเท้า

## 6.2 กรณีศึกษาค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

การศึกษาค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันระหว่างวัสดุพื้นเป็นยางผสมซิลิกาและเขม่าดำปริมาณ 30 phr ระดับการคงรูป 50% ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่เวลา 15 และ 30 นาที และวัสดุซ้อนทับเป็นยางผสมซิลิกาปริมาณ 30 phr ยังไม่ผ่านการคงรูปรวมทั้งไม่ผ่านการฉายรังสี ดังภาพที่ 58 จากนั้นอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ที่อุณหภูมิ 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa จนกระทั่งคูโอเวอร์โมลด์คงรูปสมบูรณ์ ซึ่งกรณีศึกษาผู้วิจัยได้ทำการเลือกศึกษา ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 9 โดยเลือกจากผลทดสอบที่ได้ศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ จากหัวข้อ 4.5.1 ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเป็นขั้วที่ใกล้เคียงกันที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

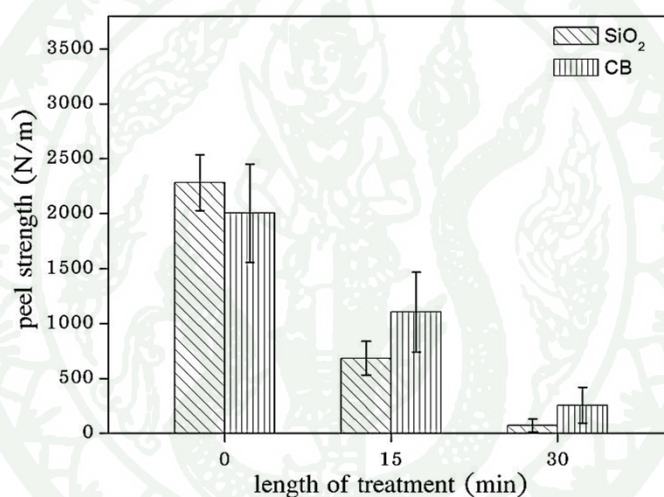
NR (SiO <sub>2</sub> filled) untreated	NR (SiO <sub>2</sub> filled) untreated
NR (SiO <sub>2</sub> filled) untreated/ treated 15,30 min	NR (CB filled) untreated/ treated 15,30 min

ภาพที่ 58 กรณีศึกษาค่ามุมสัมผัสที่ใกล้เคียงกันระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

ตารางที่ 9 ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

length of treatment substrate (min)/overmolded (min)	contact angle (degree)	
	substrate specimen	overmolded specimen
SiO <sub>2</sub> (0)/ SiO <sub>2</sub> (0)	75.29	75.29
SiO <sub>2</sub> (15)/ SiO <sub>2</sub> (0)	77.19	75.29
SiO <sub>2</sub> (30)/ SiO <sub>2</sub> (0)	75.02	75.29
CB (0)/ SiO <sub>2</sub> (0)	73.92	75.29
CB (15)/ SiO <sub>2</sub> (0)	73.37	75.29
CB (30)/ SiO <sub>2</sub> (0)	72.89	75.29

จากภาพที่ 59 พบว่า ยางผสมซิลิกาและเขม่าดำภายหลังผ่านการฉายรังสีเป็นเวลา 15 และ 30 นาที มีความแข็งแรงยึดเกาะต่ำลงเมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสี ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นของวัสดุพื้น ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลในการแพร่ข้ามลดลง ซึ่งผลการทดลองจริงพบการเสื่อมสภาพขึ้นซึ่งนอกเหนือจากการทำนายผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย ขณะที่เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนการฉายรังสี UV พบว่า ยางผสมซิลิกามีความแข็งแรงสูงกว่ายางผสมเขม่าดำ เนื่องจากสมบัติความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ขณะที่เมื่อพิจารณาเวลาฉายรังสีเท่ากับ 15 และ 30 นาที พบว่า ยางผสมซิลิกามีความแข็งแรงต่ำกว่ายางผสมเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำมีสมบัติต้านทานการเสื่อมสภาพจากรังสี UV จึงมีความสามารถในการยึดเกาะที่บริเวณผิวสัมผัสสูงกว่ายางผสมซิลิกา

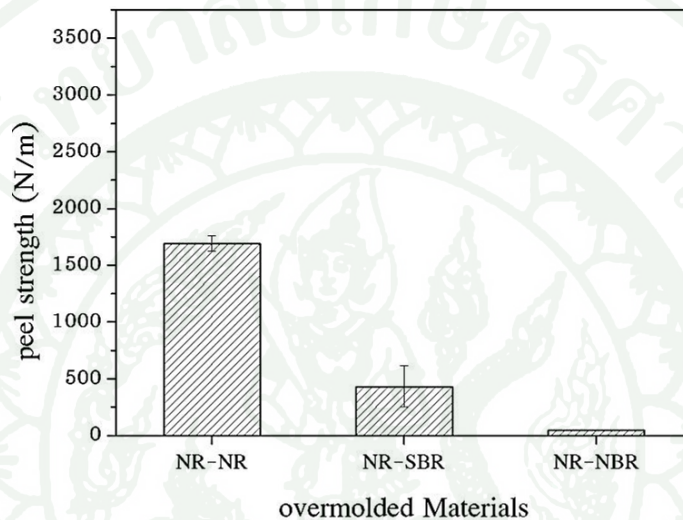


ภาพที่ 59 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับที่มีค่ามุมสัมผัสใกล้เคียงกันที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลาต่าง ๆ

## 7. การศึกษาสมบัติการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ผลการศึกษาความต้านทานต่อการดึงลอกระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ (NR-NR) และยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ได้แก่ ยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตาไดอีน (NR-SBR) และยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ (NR-NBR) โดยใช้ยางธรรมชาติปริมาณ 30 phr ที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% เป็นวัสดุพื้น ในส่วนวัสดุซ้อนทับคือยางคอมพาวนด์ที่ไม่ผ่านการคงรูป อุณหภูมิในการขึ้นรูป 150°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 20 MPa ดังแสดงในภาพที่ 60 พบว่า คู่โอเวอร์โมลของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติมีความแข็งแรงสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากยางชนิดเดียวกันมีความเข้ากันได้ ประกอบกับยางธรรมชาติมีสมบัติการยึดติดที่สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับของยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตาไดอีน ซึ่งเป็นยางชนิดไม่มีขั้ว (non polarity) เช่นเดียวกัน

พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกที่ต่ำกว่าคู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสมบัติการยึดติดของยางสไตรีนบิวตาไดอีนมีค่าต่ำ (พงษ์ธร, 2550) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคู่ของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกต่ำที่สุด เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางชนิดไม่มีขั้ว ในขณะที่ยางไนไตรล์ มีความเป็นขั้ว (polar rubber) สูง จึงมีสมบัติการยึดติดต่ำ



ภาพที่ 60 ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

#### 8. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความแข็งแรงยึดเกาะ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ระดับการคงรูปและอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลต่อความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยาง ในหัวข้อที่ 2.1 และ 3.2 ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงยึดเกาะ จึงได้ตั้งสมมติฐานว่า ความแข็งแรงยึดเกาะแปรผกผันกับระดับการคงรูป โดยได้กำหนดความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 14

$$P_s \propto 1 - \alpha(t, T) \quad (14)$$

$$\frac{P_s(t, T) - P_s(t_{100}, T)}{P_s(t_0, T) - P_s(t_{100}, T)} = 1 - \alpha \quad (15)$$

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการที่ 15 สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 16

$$P_s(t,T) = (1 - \alpha) \times \{P_s(t_0,T) - P_s(t_{100},T)\} + P_s(t_{100},T) \quad (16)$$

โดยที่  $P_s(t,T)$  คือ ความแข็งแรงยึดเกาะที่เวลาใดๆ  $P_s(t_{100},T)$  คือ ความแข็งแรงยึดเกาะเมื่อคงรูปเต็มที่ (100% cured) และ  $P_s(t_0,T)$  คือ ความแข็งแรงยึดเกาะเมื่อเริ่มคงรูป (0% cured) ณ อุณหภูมิใดๆ ส่วน  $\alpha$  คือ ระดับการคงรูป

ระดับการคงรูป ( $\alpha$ ) สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบเวลาในการคงรูป เป็นค่าแรงบิดกับเวลา ด้วยเครื่องทดสอบ ODR หรือ MDR โดยใช้สมการที่ 17

$$\alpha = \frac{S'(t) - ML}{MH - ML} \quad (17)$$

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

จากนั้นใช้แบบจำลองที่อธิบายจลนพลศาสตร์ในกระบวนการคงรูปที่พัฒนาโดย Isayev and Deng (1988) ตั้งสมการที่ 11 และ 8 โดยค่าคงที่  $n$  และ  $K(T)$  ได้จากการ fit curve ด้วยโปรแกรม Origin 8.0

นำค่า  $\ln K(T)$  และค่า  $1/T$  มาพล็อตเป็นสมการเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่าคงที่  $K_0$  และค่า  $E_0$  จากจุดตัดแกน Y (Y-intercept) และความชัน (Slope) จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการ 11 และ 8 แทนในสมการที่ 16 จะได้สมการที่ 18 ซึ่งสามารถหาค่าความแข็งแรงยึดเกาะได้

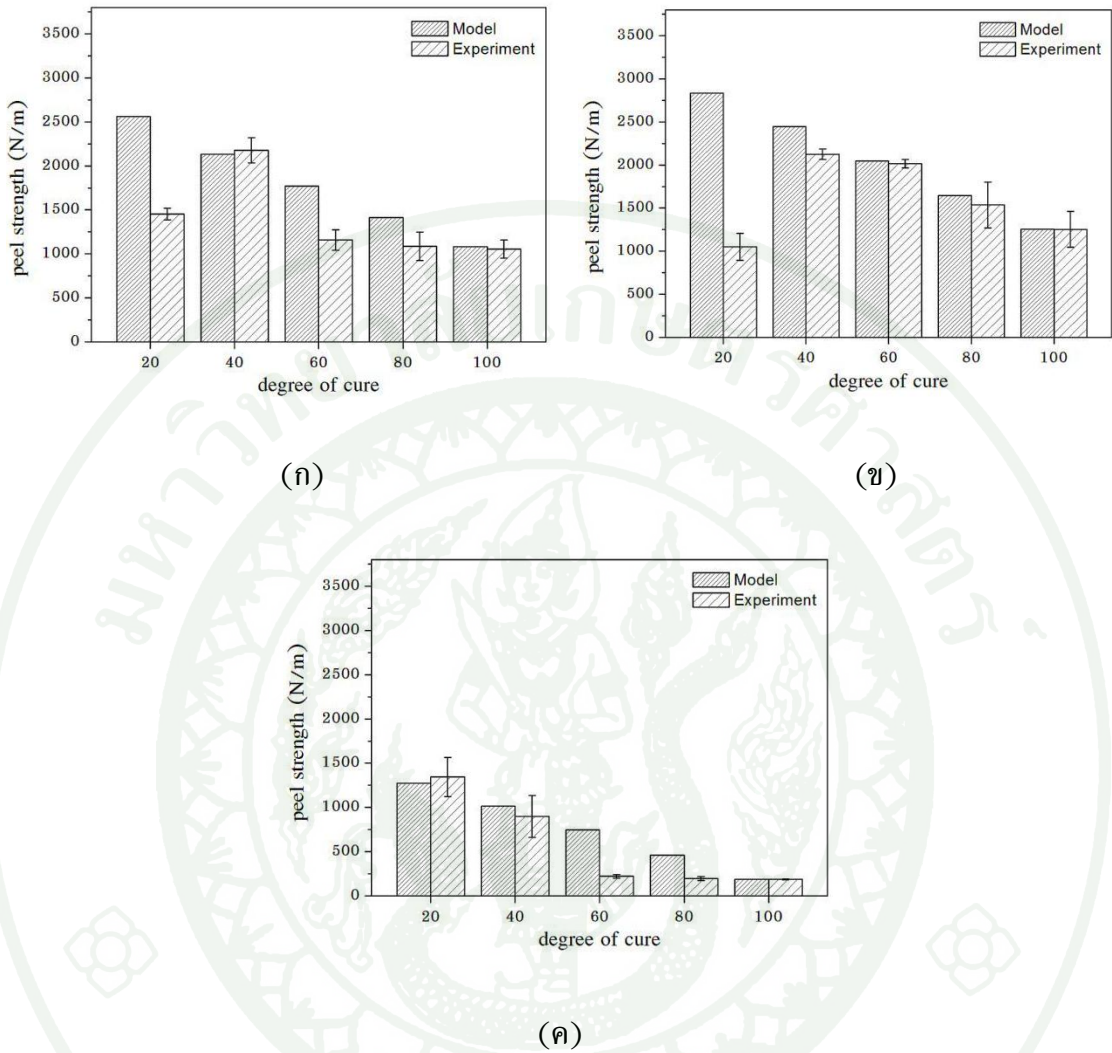
$$P_s(t,T) = \left(1 - \frac{K_0 \exp(-E_0/RT) t^n}{1 + K_0 \exp(-E_0/RT) t^n}\right) \times \{P_s(t_0,T) - P_s(t_{100},T)\} + P_s(t_{100},T) \quad (18)$$

จากสมการที่ 18 สามารถหา  $P_s(t_{100},T)$  จากการทดสอบ และ  $P_s(t_0,T)$  ด้วยการประมาณนอกช่วง (extrapolate) จากผลการทดสอบที่ระดับการคงรูป 40%

จากผลการทดลองพบว่า วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูป 20% ที่อุณหภูมิ 140 และ 150°C ภาพที่ 61(ก ถึง ข) ผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงมีความแตกต่างจากผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าที่ระดับการคงรูปต่ำ ชี้นงานเกิดการบิด

เปียว และมีผิวขรุขระ รวมถึงเกิดช่องว่างอากาศภายในชิ้นงาน ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.1 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  ดังภาพที่ 61(ค) ซึ่งใช้ระดับการคงรูป 20% พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการขึ้นรูปวัสดุพื้นโดยใช้อุณหภูมิสูงนั้น ชิ้นงานยางสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีผิวเรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพื้นที่ใช้อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  และ  $150^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานมาขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงความแข็งแรงของการทดลองที่ได้จริง พบว่า ที่อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงเมื่อระดับการคงรูปมากกว่า 60% ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของเวลาที่ใช้ขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งระยะเวลาในการคงรูปนาน อาจทำให้บริเวณพื้นผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจริงมีชั้นการคงรูปที่ผิวที่เกิดขึ้นปริมาณมากทำให้ความแข็งแรงเริ่มลดลง ขณะที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  พบความแข็งแรงยึดเกาะต่ำลงที่ระดับการคงรูปมากกว่า 60% เช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจาก การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจากการใช้เขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.2

เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ พบว่า ผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ข้อสมมติฐานของแบบจำลอง มีความแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ กล่าวคือ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกำหนดให้วัสดุที่นำมาซ้อนทับกัน มีการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ที่บริเวณหน้าสัมผัส (perfect bond) และชิ้นงานยางมีอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาที่ยางสัมผัสกัน ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปจริงที่เกิดขึ้น พบว่า ชิ้นงานยางที่เป็นวัสดุพื้นมีผิวขรุขระ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ระดับการคงรูปของชิ้นงานยาง และคุณภาพผิวแม่พิมพ์ และนอกจากนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำนายด้วยแบบจำลอง จึงต้องใช้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์เข้าสู่เนื้อยางเพื่อให้มีอุณหภูมิที่เท่ากับแบบจำลอง จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผลการทดสอบจริงมีค่าต่ำกว่าผลการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนา ดังภาพที่ 61(ก ถึง ค)



ภาพที่ 61 ผลการทำนายความแข็งแรงยึดเกาะที่อุณหภูมิ (ก) 140°C (ข) 150°C และ (ค) 160°C

## สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณ 30 และ 60 phr ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ิ่ง โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพื้นและวัสดุชั้นทับ ศึกษาถึงปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ (ระดับการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม) ปัจจัยในกระบวนการผลิต (อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์ และระยะทางการไหล) และนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความหนืดมูนีและเวลาในการคงรูปของยาง พบว่า ปริมาณของสารตัวเติมแปรผันตามกับความหนืดของชิ้นงาน แต่แปรผกผันกับความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์ นอกจากนี้ชนิดของสารตัวเติมมีผลต่อระยะเวลาในการคงรูปของยางคอมพาวนด์ โดยเฉพาะเขม่าดำที่ส่งผลให้ระยะเวลาในการเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการนำความร้อนของเขม่าดำ ขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้มีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยซิงค์ออกไซด์ จึงทำให้บริเวณพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีสภาพเป็นต่าง และคอยช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในการคงรูป อย่างไรก็ตามยางผสมซิลิกาพบระยะเวลาในการคงรูปนาน เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกามีความพรุนสูงจึงดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ (ระดับการคงรูป ชนิดและปริมาณสารตัวเติม) ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ พบว่า ระดับการคงรูปที่เพิ่มขึ้นในยางคอมพาวนด์ส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะลดลง อย่างไรก็ตามที่ระดับการคงรูป 50% มีความเหมาะสมมากที่สุดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ขณะที่ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในยางผสมซิลิกา ปริมาณ 60 phr มีความแข็งแรงยึดเกาะมากที่สุด ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมบัติความเหนียวติดที่ดี และจากความเป็นขั้วของหมู่ซิลานอลทำให้ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสเกิดการสร้างพันธะระหว่างหน้าสัมผัสสูง นอกจากนี้ยางผสมซิลิกาเกิดการคงรูปช้า ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่สมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้ เป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัส ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแพร่ข้ามได้ในระยะความลึกที่เพิ่มสูงขึ้น

3. ปัจจัยจากกระบวนการผลิต (อุณหภูมิแม่พิมพ์ แรงดันปิดแม่พิมพ์ และระยะทางการไหล) ที่มีผลต่อสมบัติการยึดเกาะ พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการยึดเกาะมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลที่พื้นผิวสัมผัสสามารถเคลื่อนที่แพร่ข้ามได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงเวลาที่

ใช้ในการคงรูปควบคุมกันไปด้วย เนื่องจากเวลาที่นานเกินไปอาจเกิดการเสื่อมสภาพของยางคอมพาวนด์ ขณะที่อิทธิพลของระยะทางการไหลที่มีผลต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติพบว่า ระยะทางการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติการยึดเกาะลดต่ำลง เนื่องมาจากเกิดการคงรูปบางส่วนก่อนการไหลเต็มเข้าพิมพ์ ทำให้การแพร่ข้ามที่บริเวณผิวสัมผัสลดลง

4. แนวทางการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง ด้วยการพัฒนาสมบัติการยึดเกาะทางกล โดยการสร้างรูปแบบต่างๆ บนวัสดุพื้น แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้นเมื่อพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การวางวัสดุพื้นให้มีระยะทางการไหลส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่วางขนาดพอดีเข้าพิมพ์ มีสาเหตุมาจากการวางยางให้มีระยะการไหล จะทำให้มีช่องว่างสำหรับไล่อากาศที่อยู่บริเวณหน้าพิมพ์ออก ส่งผลให้วัสดุพื้นกับวัสดุซ้อนทับมีพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น

5. การศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะของชิ้นงานยาง โดยการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุพื้นด้วยเทคนิคการฉายรังสี UV พบว่า เมื่อระยะเวลาในการฉายรังสีมากขึ้น วัสดุพื้นเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ ซึ่งจากผลทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง โดยเฉพาะในยางไม่ผสมสารตัวเติม นอกจากนี้ การบดผสมสารตัวเติมเขม่าดำช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานรวมทั้งมีสมบัติต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีและทำให้ความแข็งแรงยึดเกาะมากที่สุด

6. การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางคอมพาวนด์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ โดยนำยางธรรมชาติมาโอเวอร์โมลกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ 2 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางไนไตรล์ พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานขึ้นอยู่กับสมบัติการยึดติดกันและสมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ

7. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงยึดเกาะพบว่า ผลที่ได้มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง มีสาเหตุมาจาก สมมติฐานของแบบจำลองจะต้องมีการสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ และชิ้นงานยางจะต้องมีอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาที่ยางสัมผัสกันซึ่งแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นจริง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- \_\_\_\_\_. 2550. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.
- สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. เทคโนโลยีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์บุ๊คเน็ต, กรุงเทพฯ.
- Ajbani, M., C. Kiehl and T.F.E. Materne. 2006. **Overmolded Grip**. U.S. Patents 7150919.
- Arzondo, L.M., N. Pino, J.M. Carella, J.M. Pastor, J.C. Merino, J. Poveda and C. Alonso. 2004. Sequential Injection Overmolding of An Elastomeric Ethylene-octene Copolymer on A Polypropylene Homopolymer Core. **Polymer Engineering and Science** 44: 2110-2116.
- Barlow, F.W. 1993. **Rubber Compounding: Principles, Materials and Techniques**. Marcel Dekker, New York.
- Barnett, C.E. 2002. Thermal Properties of Rubber Compounds I. Thermal Conductivity of Rubber and Rubber Compounding Materials. **Industrial and Engineering Chemistry** 1934(3): 303-306.

- Basak, G.C., A. Bandyopadhyay and A.K. Bhowmick. 2010. Effect of Tackifier Compatibility and Blend Viscoelasticity on Peel Strength Behavior of Vulcanized EPDM Rubber Co-Cured with Unvulcanized Rubber. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 30: 489-499.
- Chiu, H.T. and P.A. Tsai. 2005. Aging and Mechanical Properties of NR/BR Blends. **Materials Engineering & Performance** 15(1): 88.
- Choi, S.S., N. Changwoon, G.L. Seung and W.J. Chang. 2003. Effect of Filler-Filler Interaction on Rheological Behaviour of Natural Rubber Compounds Filled with Both Carbon Black and Silica. **Polymer International** 52: 23-28.
- Chuayjuljit, S., A. Invittaya, N. Na-Ranong and P. Potiyaraj. 2002. Effect of Particle Size and Amount of Carbon Black and Calcium Carbonate on Curing Characteristics and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber. **Metals, Materials and Minerals** 12(1): 51-57.
- Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology, Shawbury.
- Clements, H.H. 2007. **Bonding Strength at Solid-melt Interface in a Two-component Injection Molding Process**. Technical University of Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Polymer Technology Group.
- Cook, J.W., S. Edge and D.E. Packham. 1997. The Adhesion of Natural Rubber to Steel and The Use of The Peel Test to Study Its Nature. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 17: 333-337.
- Crowther, B. 2000. **Handbook of Rubber Bonding**. Rapra Technology Ltd., United Kingdom.

- Dondero, M., J.M. Pastro, J.M. Carella and C.J. Perez. 2009. Adhesion Control for Injection Overmolding of Polypropylene with Elastomeric Ethylene Copolymers. **Polymer Engineering and Science** 49: 1886–1893.
- Duncan, B. and R. Mera. 2005. **Techniques for Characterising The Wetting, Coating and Spreading of Adhesives on Surfaces**. 42.
- Eve, S. and J. Mohr. 2009. Study of The Surface Modification of The PMMA by UV-Radiation. **Procedia Engineering** 1(1): 237–240.
- Fabio, G., M. Marco and O. Ernesto. 1994. **Polymer Surfaces from Physics to Technology**. John Wiley & Sons Ltd., England.
- Fabrin, P.A., M.E. Hoikkanen and J.E. Vuorinen. 2007. Adhesion of Thermoplastic Elastomer on Surface Treated Aluminum by Injection Molding. **Polymer Engineering and Science** 47: 1187–1191.
- Fernandez, J.C., A.C. Orgiles-Barcelo and J.M. Martin-Ma. 1991. Halogenation of Styrene-Butadiene Rubber to Improve Its Adhesion to Polyurethanes. **Adhesion Science and Technology** 12: 1065–1080.
- Fuller, K.N.G. and W.S. Fulton. 1990. The Influence of Molecular Weight Distribution and Branching on The Relaxation Behaviour of Uncrosslinked Natural Rubber. **Polymer** 31(4): 609–615.
- Funt, J.F. 2009. **Mixing of Rubber**. Rapra Technology, Shawbury.
- Gent, A.N. 2001. Engineering with Rubber How to Design Rubber Components. **Hanser Publishers**, Munich.

- Grassie, N. and S. Gerald. 1985. **Polymer Degradation and Stabilisation**. Cambridge University Press, New York.
- Guo, S., A. Ait-Kadi and M. Bousmina. 2004. A Modified Model Predictions and Experimental Results of Weld-line Strength in Injection Molded PS/PMMA Blends. **Polymer** 45(2004): 2911-2920.
- Heamtanon, P. 2005. **Improvement of Adhesion between Natural Rubber and Nitrile Rubber by Using Adhesion Promoter Compound Based on Chlorosulfonated Polyethylene and Chlorinated Natural Rubber**. Ph.D. Thesis, Mahidol University.
- Hofmann, W. 1989. **Rubber Technology Handbook**. Hanser Publishers, Munich Vienna, New York, United State.
- Isayev, A.I. and J.S. Deng. 1991. Injection Molding of Rubber Compound Experimentation and Simulation. **Rubber Chemistry and Technology** 64: 296-324.
- Johnson, P.S. 2001. **Rubber Processing: An Introduction**. Carl Hanser Verlag. Munich, Germany.
- Kamal, M.R. and S. Sourour. 1973. Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure. **Polymer Engineering and Science** 13: 59-64.
- Kaynak, C., C. Celikbilek and G. Akovali. 2003. Use of Silane Coupling Agents to Improve Epoxy-Rubber Interface. **European Polymer Journal** 39: 1125-1132.
- Kim, S.G. and N.P. Suh. 1986. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. **Polymer Engineering and Science** 26(17): 1200-1207.

- Kinloch, A.J. 1990. **Adhesion and Adhesives: Science and Technology**. Chapman and Hall. London.
- 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, M., A.R. Horrocks. 2001. Effect of Carbon Black on UV Stability of LLDPE Flms Under Artificial Weathering Conditions. **Polymer Degradation and Stability** 75: 485–499.
- Mark, J. E., B. Erman and F. R. Eirich. 2005. **Science and Technology of Rubber**. 3<sup>rd</sup> ed. Elsevier Inc., Burlington.
- Martinez, A., J. Castany and D. Mercado. 2011. Characterization of Viscous Response of A Polymer During Fabric IMD Injection Process by Means A Spiral mold. **Measurement** 44: 1806–1818.
- Modic, M.J. 1999. **Block Copolymers with Improved Overmolding Adhesion**. U.S. Patents 5969034.
- Morton, M. 1973. **Introduction to Rubber Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Reinhold. Publishing.
- Nichetti, D. 2004. Determination of Mechanical Properties of Silica Compounds Using a Curing Kinetic Model. **European Polymer Journal** 40: 2401–2405.
- Oosterom, R., T.J. Ahmed, J.A. Poulis and H.E.N. Bersee. 2006. Adhesion Performance of UHMWPE After Different Surface Modification Techniques. **Medical Engineering and Physics** 28: 323–330.

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

Pacharaphun, S., W. Chookaew, T. Tungkeunkunt and N. Na-Ranong. 2011. Effects of Filler Contents and Processing Parameters on The Weldline Strength of Compression Molded Natural Rubber. **Polymer Engineering and Science** 51: 2353-2359.

\_\_\_\_\_ and J. Krongthanin. 2010. Effect of Processing Parameters on the Bond Strength of Injection-Overmolded Parts. In **1<sup>st</sup> Polymer Conference of Thailand**, 7-8 october 2010, Bangkok, Thailand.

Persson, S., M. Goude and T. Olsson. 2003. Studying The Cure Kinetics of Rubber-to-Metal Bonding Agents Using Dmta. **Polymer Testing** 22: 671-676.

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

Rattanasom, N. and S. Prasertsri. 2009. Relationship Among Mechanical Properties, Heat Ageing Resistance, Cut Growth Behavior and Morphology in Natural Rubber: Partial Replacement of Clay with Various Types of Carbon Black at Similar Hardness Level. **Polymer Testing** 28: 270 -276.

Romero-Sanchez, M.D., M.J. Walzak, R. Torregrosa-Macia and Jose Miguel Martin-Martinez. 2006. Surface Modifications and Adhesion of SBS Rubber Containing Calcium Carbonate Filler by Treatment with UV Radiation. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 27: 434-445.

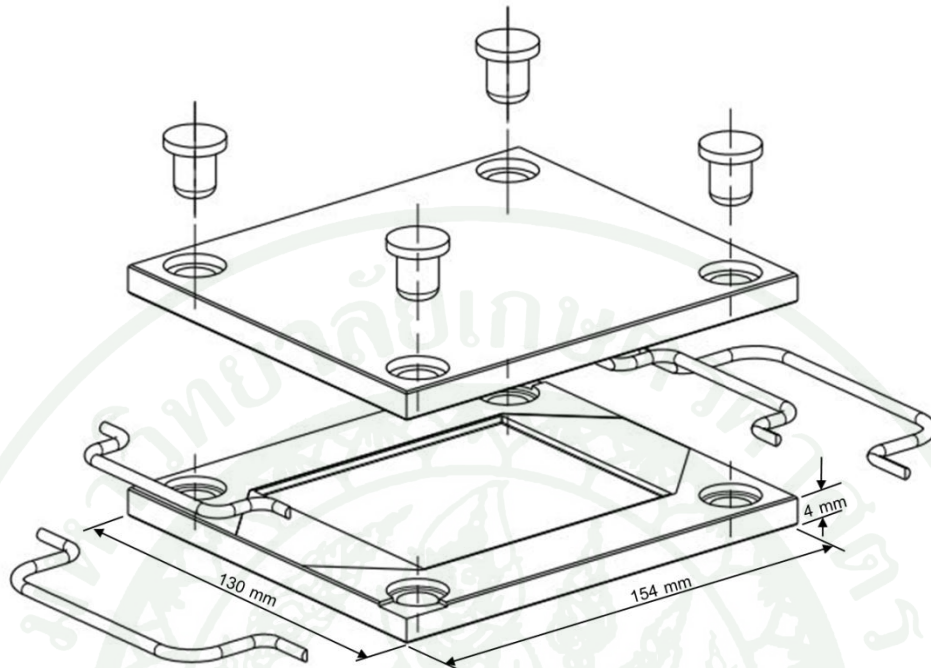
\_\_\_\_\_ and J.M. Martín-Martínez. 2005. Ultrasonic Cleaning of SBR Rubber to Improve the Performance of Subsequent Plasma Torch Treatment. **Adhesion Science and Technology** 19(11): 927-946.

- \_\_\_\_\_, M.M. Pastor-Blas, J.M. Martín-Martínez and M.J. Walzak. 2005. Addition of Ozone in The UV Radiation Treatment of A Synthetic Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Rubber. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 25: 358-370.
- Sasidharan, P.A., C. Gouri and R. Ramaswamy. 1999. Reactive Bonding of Natural Rubber to Metal by A Nitrile-Phenolic Adhesive. **Applied Polymer Science** 81: 2597-2609.
- Sezna, J.A. and P.J. DiMauro. 1984. Processability Testing of Injection Molding Rubber Compounds. **Rubber Chemistry and Technology** 57: 826-842.
- Singh, B. and N. Sharma. 2008. Mechanistic Implications of Plastic Degradation. **Polymer Degradation and Stability** 93: 561-584.
- The University of Houston. 2011. **Spectroscopy**. Available Source: <http://www.ine.uh.edu/research/spectroscopy/index.php>, October 2011.
- Todd, G. 2009. **The Overmolding Process**. Objet Geometries Ltd., London.
- Venkataswam, K. and J. Gu. 2006. Universal Polyamide Overmold TPE. **Rubber World** 235: 32-35.
- Voyutskii, S.S. 1963. **Autohesion and Adhesion of High Polymers**. Interscience Publishers. United State.
- Wang, M.J. and S. Wolff. 1992. **Rubber Chemistry and Technology**. 65(4): 715-735.

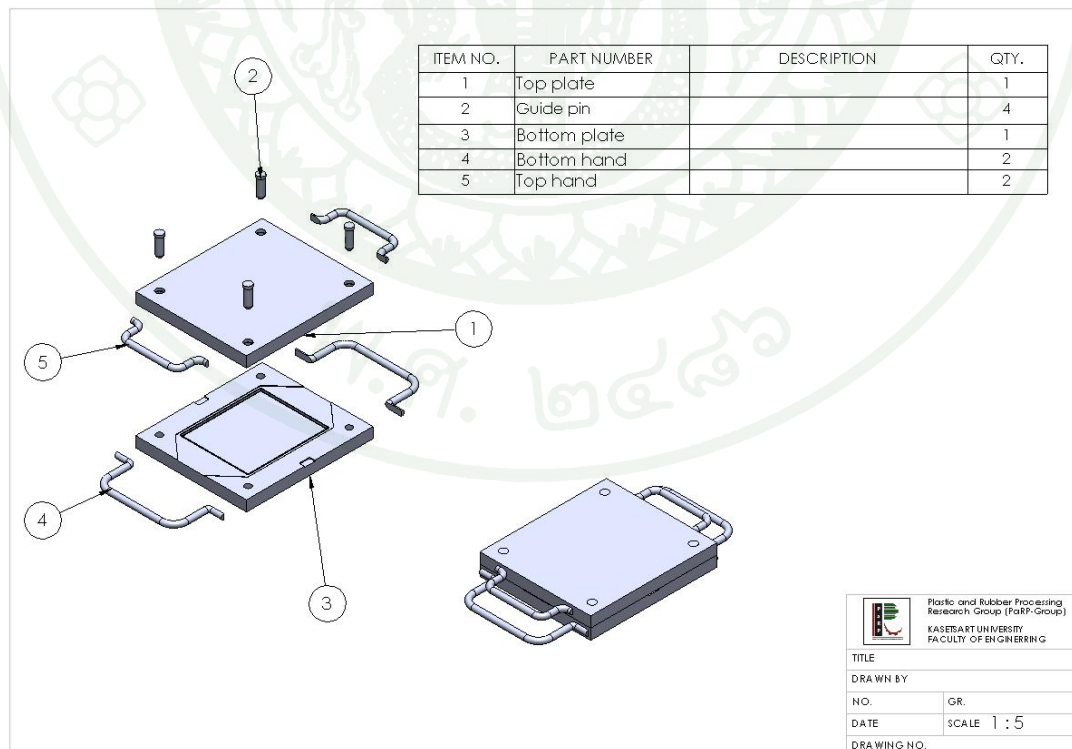




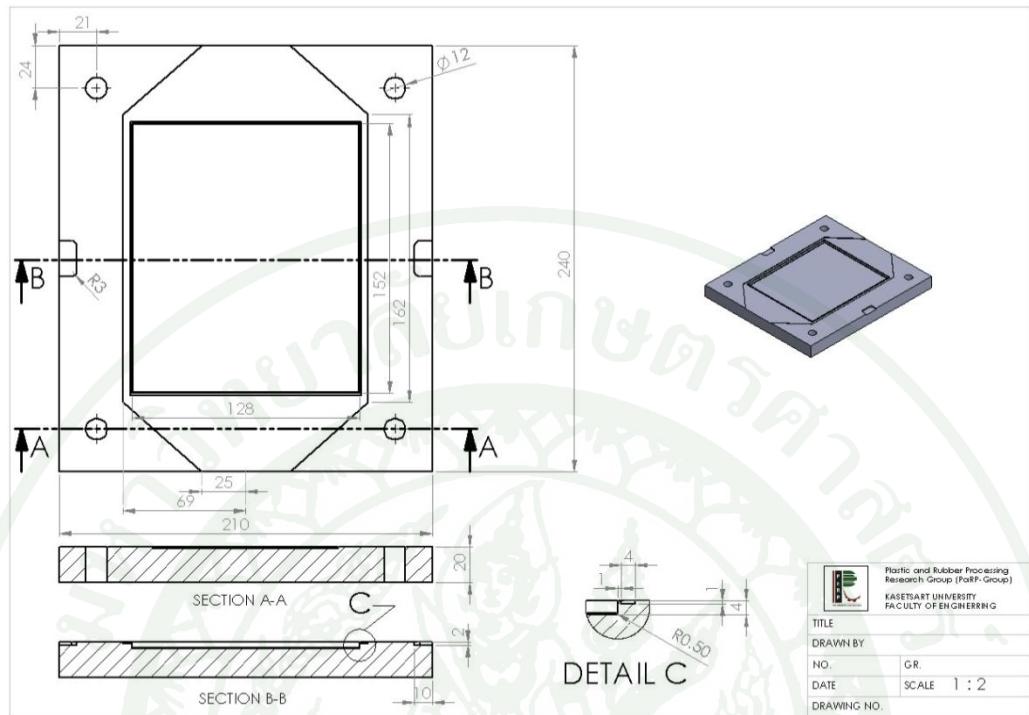
ภาคผนวก ก  
การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์



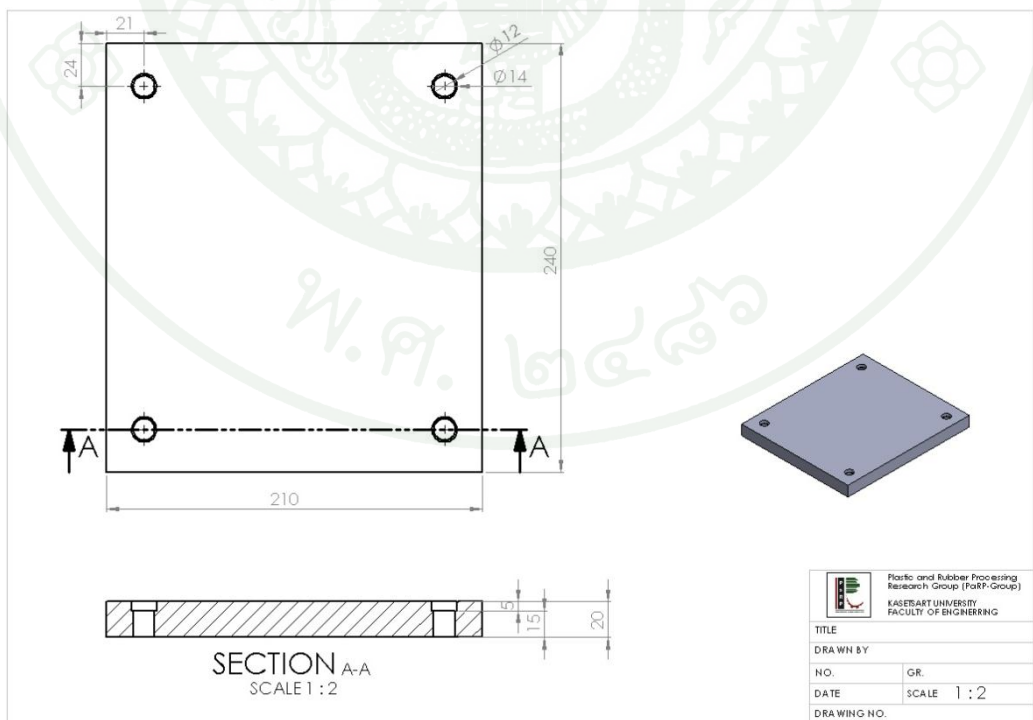
ภาพผนวกที่ ก1 รายละเอียดขนาดแม่พิมพ์



ภาพผนวกที่ ก2 รายละเอียดส่วนประกอบแม่พิมพ์



ภาพผนวกที่ ก3 รายละเอียดขนาด bottom plate



ภาพผนวกที่ ก4 รายละเอียดขนาด top plate



ภาคผนวก ข  
สมบัติของยางก่อนการคงรูป

ตารางผนวกที่ ข1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

filler contents (phr)	Mooney viscosity		
	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CB
0	31.7	31.7	31.7
30	32.2	56.5	45.4
60	26.3	88.2	72.5

ตารางผนวกที่ ข2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

filler contents (phr)	scorch time (min)			cure time (min)		
	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CB	CaCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CB
0	8.91	8.91	8.91	13.5	13.5	13.5
30	6.54	10.79	4.89	10.79	20.93	10.25
60	6	9.15	3.73	10.69	33.02	9.61



ภาคผนวก ค  
อิทธิพลของปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

ตารางผนวกที่ ค1 อิทธิพลของระดับการคงรูปของยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงยึดเกาะ

degree of crosslinking (substrate)	peel strength (N/m)	S.D.
50-0	877.17	103.49
75-0	783.61	87.03
100-0	101.02	16.37

ตารางผนวกที่ ค2 ชนิดและปริมาณสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

filler contents (phr)	CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	peel strength (N/m)	S.D.	peel strength (N/m)	S.D.	peel strength (N/m)	S.D.
0	878.00	102.56	878.00	102.56	878.00	102.56
30	1266.60	194.82	849.39	158.01	2411.36	191.85
60	1240.30	2689.58	2689.58	113.89	3559.33	161.38



ภาคผนวก ง  
อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

ตารางผนวกที่ ง1 แรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำ เป็นสารตัวเติมปริมาณ 30 phr

clamping pressure (MPa)	peel strength (N/m)	S.D.
10	393.95	10.92
20	555.41	14.97
30	1137.86	108.52

ตารางผนวกที่ ง2 อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ ปริมาณ 30 phr และ 60 phr

temperature (°C)	CB (30 phr)		CB (60 phr)	
	peel strength (N/m)	S.D.	peel strength (N/m)	S.D.
140	520.93	42.59	650.15	77.24
150	849.40	158.02	2689.59	113.90
160	1461.37	69.47	1914.80	61.28

ตารางผนวกที่ ง3 ระยะทางการไหลที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ ปริมาณ 30 phr

flow length (mm)	peel strength (N/m)	S.D.
11	1690.4	68.12
30	998.30	124.70
70	423.19	31.21
110	385.48	165.54



ตารางผนวกที่ จ1 อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสวัสดุพื้นที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

substrate patterns	flow distance = 0 mm		flow distance = 11 mm	
	peel strength	S.D.	peel strength	S.D.
	(N/m)		(N/m)	
smooth	849.39	158.01	1690.4	68.12
parallel	1722.43	134.23	1847.83	347.7
perpendicular	1734.21	95.81	1469.29	199.11
cross	2060.10	134.90	2633.3	604.32



ภาคผนวก ฉ

ผลการทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ของยาง ก่อนและภายหลังการฉายรังสี UV ที่ระยะเวลาต่างๆ

ตารางผนวกที่ ๑1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	$\sigma$ (MPa)	S.D.	$\sigma$ (MPa)	S.D.	$\sigma$ (MPa)	S.D.	$\sigma$ (MPa)	S.D.
0	15.3	2.31	20	2.81	24.4	1.96	31.2	1.63
15	19.65	1.78	12.11	2.36	23.8	0.62	22.48	0.43
30	15.85	1.44	12.83	2.74	21.15	0.22	31.83	0.52
45	16.53	1.22	20.89	0.35	16.3	1.07	31.18	1.21
60	17.23	1.28	10.73	0.88	26.8	1.38	26.42	0.88

$\sigma$  แทน tensile strength

ตารางผนวกที่ ๑2 ผลการทดสอบสมบัติความสามารถในการยืดออก

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	$\epsilon$	S.D.	$\epsilon$	S.D.	$\epsilon$	S.D.	$\epsilon$	S.D.
0	642	2.30	676.6	2.30	538	10.52	556	10.43
15	552	10.78	603	5.78	594.2	20.74	589.95	20.81
30	511	10.44	542	4.44	571.49	10.35	590.63	20.36
45	511	10.22	524.5	10.63	616.97	10.88	589.74	10.74
60	530	10.28	483.6	3.43	585.48	10.38	563.11	10.63

$\epsilon$  แทน elongation

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการทดสอบค่ามอดูลัส

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	E (N/m <sup>2</sup> )	S.D.	E (N/m <sup>2</sup> )	S.D.	E (N/m <sup>2</sup> )	S.D.	E (N/m <sup>2</sup> )	S.D.
0	0.8	0.10	1.16	0.05	1.3	0.1	1.63	0.30
15	0.6	0.01	1.26	0.05	1.43	0.11	1.78	0.16
30	0.65	0.05	1.3	0	1.46	0.05	1.78	0.12
45	1.00	0.07	1.33	0.05	1.93	0.05	1.66	0.04
60	0.53	0.08	1.43	0.05	1.7	0.1	1.56	0.09

E แทน modulus

ตารางผนวกที่ ๔ ผลทดสอบความแข็ง

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	hardness	S.D.	hardness	S.D.	hardness	S.D.	hardness	S.D.
0	36.6	0.54	36.6	0.89	42.6	1.11	51.54	0.75
15	37.6	1.51	33.2	0.44	42.9	0.74	50.6	0.82
30	37.8	0.83	40	0.97	45.4	0.89	57.6	2.96
45	37.6	0.89	39.1	1.14	43.2	0.83	49.2	1.14
60	30.56	0.41	39.1	1.14	44.6	0.54	48.26	1.14

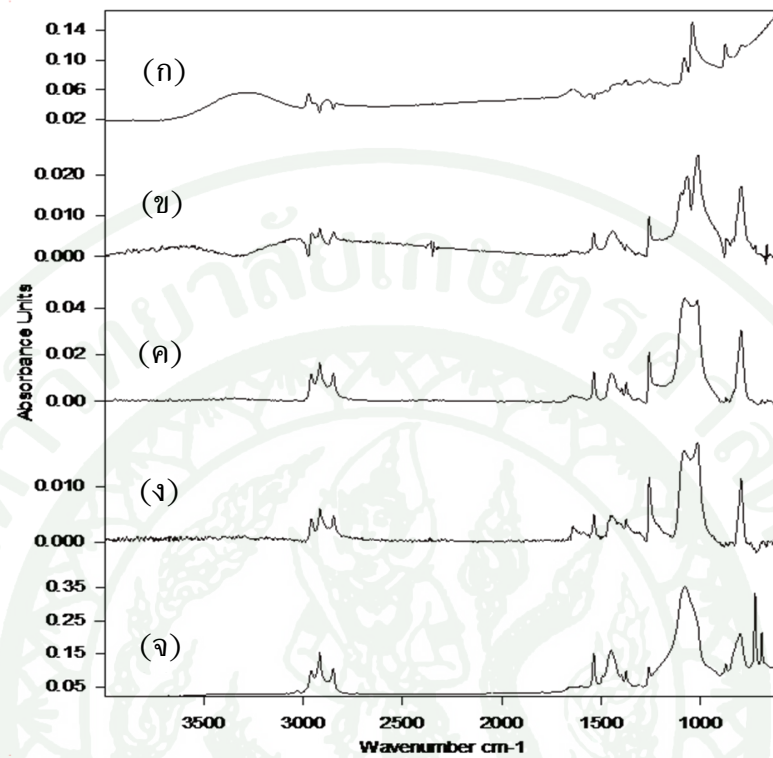
ตารางผนวกที่ ๑๕ สมบัติการบวมตัว

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	swell (%)	S.D.	swell (%)	S.D.	swell (%)	S.D.	swell (%)	S.D.
0	91.95	1.96	82.96	1.46	75.29	2.81	73.92	1.63
15	90.98	0.62	81.88	1.52	77.18	2.36	73.37	0.43
30	89.40	0.22	80.45	1.83	75.02	2.74	72.89	0.52
45	88.47	1.07	75.45	2.31	76.23	0.35	73.55	1.21
60	86.59	1.38	74.45	0.25	75.51	0.88	71.83	0.88

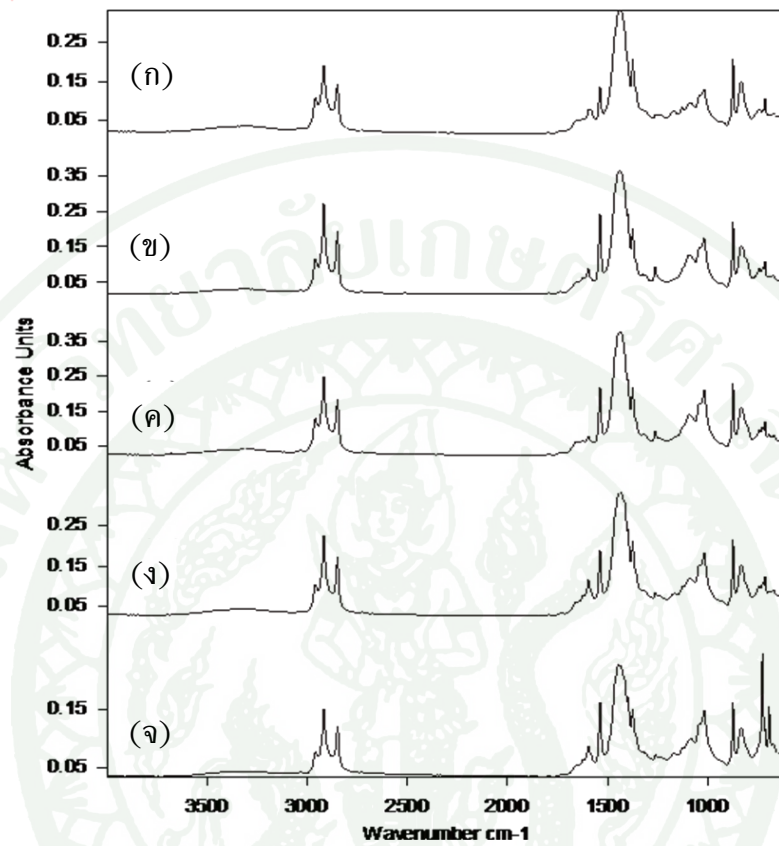
ตารางผนวกที่ ๑๖ ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย

length of treatment (min)	non-filled		CaCO <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CB	
	C (θ)	S.D.	C (θ)	S.D.	C (θ)	S.D.	C (θ)	S.D.
0	0	117.28	1.46	130.15	1.96	114.61	2.81	115.25
15	15	101.64	3.52	124.01	0.62	114.61	2.36	117.15
30	30	95.006	1.83	121.42	0.22	115.37	2.74	117.12
45	45	100.74	2.31	119.59	1.07	107.11	0.35	111.37
60	60	81.770	0.25	114.66	1.38	91.45	0.88	110.77

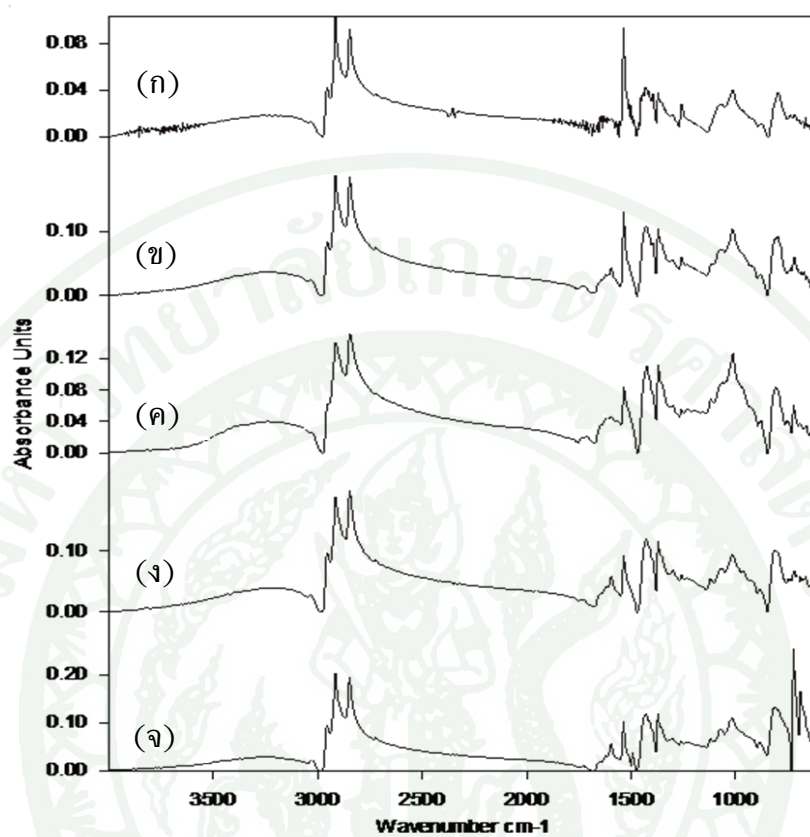
C แทน contact angle



ภาพผนวกที่ ๑1 ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  (ก) ก่อนฉายรังสี (ข) ฉายรังสี UV 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที



ภาพผนวกที่ ๑๒ ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม SiO<sub>2</sub> (ก) ก่อนฉายรังสี (ข) ฉายรังสี 15 นาที (ค) 30 นาที (ง) 45 นาที และ (จ) 60 นาที



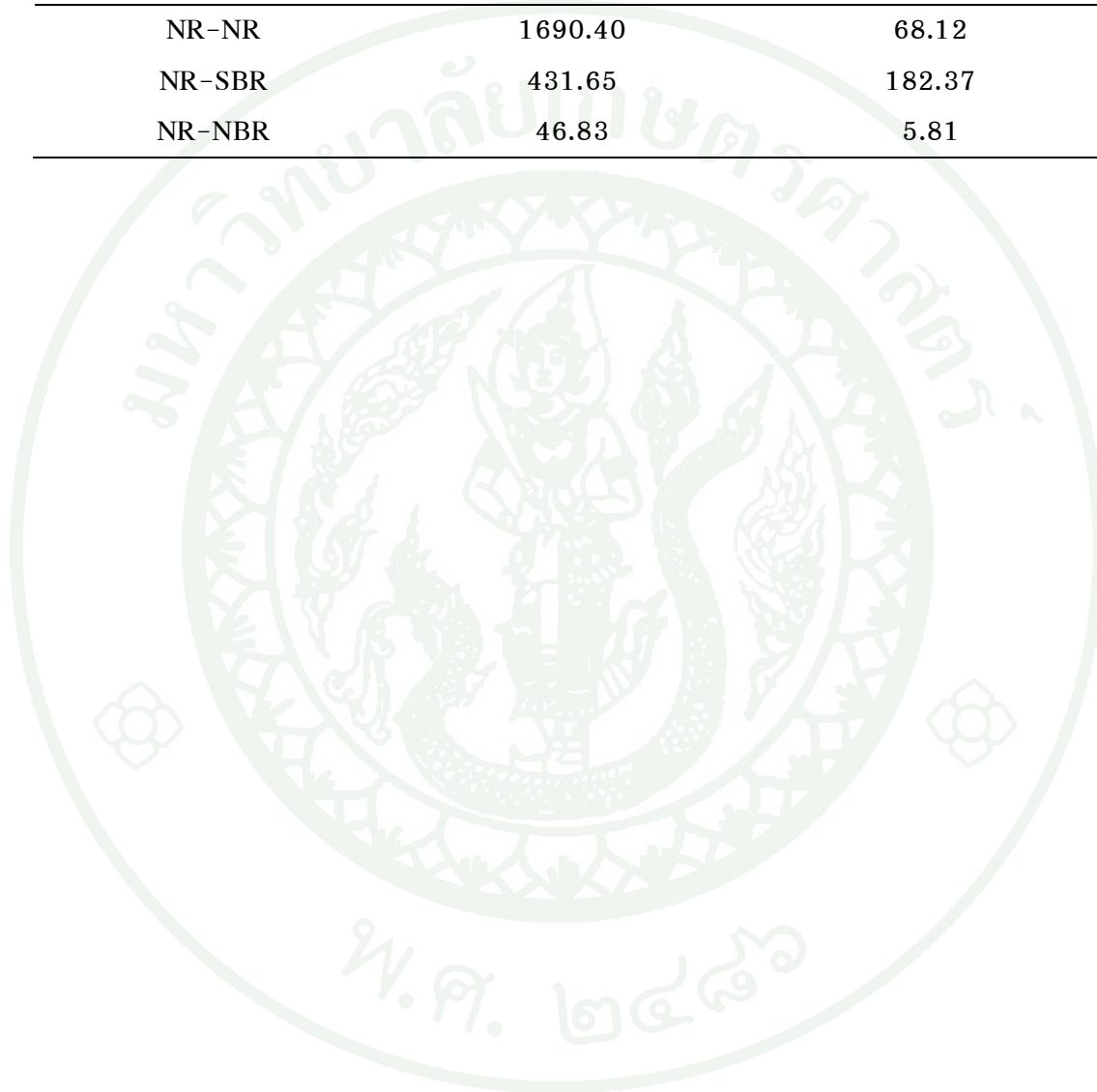
ภาพผนวกที่ ๓ ผลทดสอบ FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมสารตัวเติม CB (ก) ก่อนฉายรังสี (ข) ฉายรังสี UV 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที



ภาคผนวก ช  
การศึกษาสมบัติการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ตารางผนวกที่ ข1 อิทธิพลของชนิดยางที่มีต่อความแข็งแรงยึดเกาะ

rubber pairs	peel strength (N/m)	S.D.
NR-NR	1690.40	68.12
NR-SBR	431.65	182.37
NR-NBR	46.83	5.81





ภาคผนวก ช  
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความแข็งแรงยึดเกาะ

ตารางผนวกที่ ช1 ความแข็งแรงยึดเกาะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

degree of cure	peel strength (N/m)		
	140°C	150°C	160°C
20	2561.48	1453.00	66.64
40	2132.38	2178.77	143.29
60	1769.47	1157.40	114.53
80	1413.65	1086.53	162.32
100	1080.56	1053.10	102.61

ตารางผนวกที่ ช2 ความแข็งแรงยึดเกาะจากผลการทดลอง

degree of cure	peel strength (N/m)					
	140°C	S.D.	150°C	S.D.	160°C	S.D.
20	1453.00	66.64	2835.55	1048.84	157.37	1274.29
40	2178.77	143.29	2446.72	2124.65	59.43	1014.25
60	1157.40	114.53	2046.68	2015.60	50.20	747.71
80	1086.53	162.32	1643.99	1535.64	265.86	460.94
100	1053.10	102.61	1254.38	1251.88	208.35	186.87

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวณัฐนันท์ งามสอาด
เกิดวันที่	29 พฤษภาคม 2531
สถานที่เกิด	เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 51 ระหว่างวันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2556 จัดที่จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย นำเสนอต่อที่ประชุมวิชาการ เรื่อง การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์-โมลด์