



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาและพัฒนาสมรรถนะการยืดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัด
ขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

โดย ผศ.ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ และคณะ

ธันวาคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาและพัฒนาสมบัติการยืดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. ผศ.ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 3. นางสาวรุ่งทิพย์ ปาลวัฒน์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 4. นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	5
เนื้อหา	
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	7
วัตถุประสงค์	8
ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
วิธีการ	12
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	18
สรุปผล	30
ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	34

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาและพัฒนาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

(ภาษาอังกฤษ): Investigation and Improvement on Bond Strength of Compression Overmolded Rubber Parts

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์/โทรสาร 02-942-8555 ต่อ 2121/02-955-1811 E-mail fengsjpc@ku.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวรุ่งทิพย์ ปาลวัฒน์

ผู้ร่วมวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ทําวิจัยและความสำคัญ

ปัจจุบันตลาดมีความต้องการผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถใช้งานได้หลากหลายเพิ่มขึ้น หรือต้องการสีที่สวยงาม ซึ่งไม่สามารถนำยางชนิดเดียวมาใช้ผลิตได้ จำเป็นต้องนำยางที่มีสมบัติเด่นต่างๆ มาผสมกันหรือประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางหล่อดอก ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น วิธีการที่นิยมใช้กัน คือ ยางผสม (blend) และการขึ้นรูปยางโดยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ (over-molding technique) โดยข้อดีของเทคนิคโอเวอร์โมลด์ คือ สามารถประยุกต์เข้ากับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบเดิม ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการฉีดขึ้นรูป กระบวนการกึ่งฉีดขึ้นรูป รวมไปถึงกระบวนการอัดรีดแบบอัดรีดร่วม ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบ่งเป็นการขึ้นรูปวัสดุพื้น (substrate material) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ (overmolded material) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มักมีปัญหาด้านความแข็งแรงในการยึดเกาะ เช่น การขาดหรือลอกออกบริเวณที่ยางสัมผัสกัน (delamination) เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง โดยความแข็งแรงในการยึดเกาะขึ้นอยู่กับสมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ (material compatibility) และการปรับตั้งค่าในกระบวนการผลิต (processing parameter) ที่ใช้ในการขึ้นรูป รวมถึงลักษณะการออกแบบแม่พิมพ์ (mold design) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง รวมไปถึงพัฒนาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางของประเทศรวมถึงใช้ในงานวิจัยในอนาคต

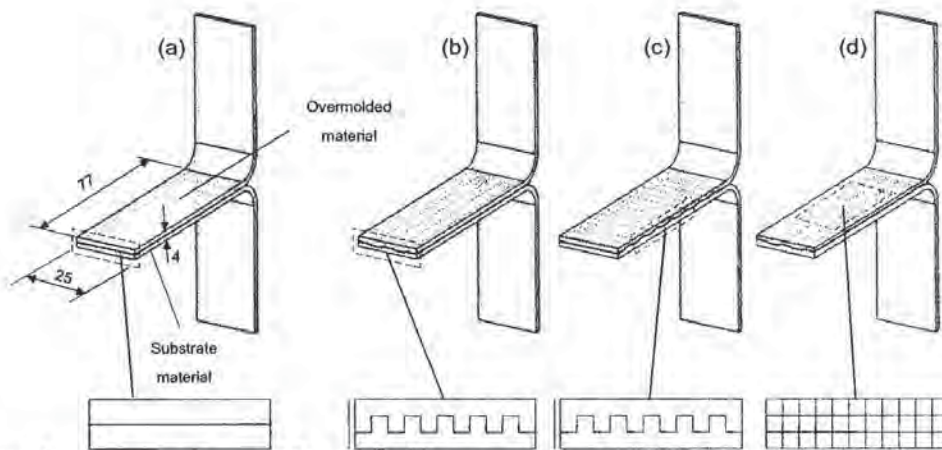
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติการยึดติดระหว่างวัสดุยางโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์
2. เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการ

ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป เพื่อใช้ในการเตรียมวัสดุพื้น วัสดุซ้อนทับ และชิ้นงานทดสอบสำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นเพื่อให้มีรูปแบบ (groove pattern) ต่างๆ กันนั้น จำเป็นต้องใช้อินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยอินเสิร์ตแผ่นเรียบ (smooth) แผ่นลอนทิศทางการไหล (parallel to flow direction) แผ่นลอนทิศทางการขวางการไหล (perpendicular to flow direction) และแผ่นลอนตาราง (cross) โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก เริ่มต้นด้วยการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ มาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D413 ที่มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1(a-d) จากนั้นนำชิ้นงานยางทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งชิ้นงานหลุดลอกออกจากกัน

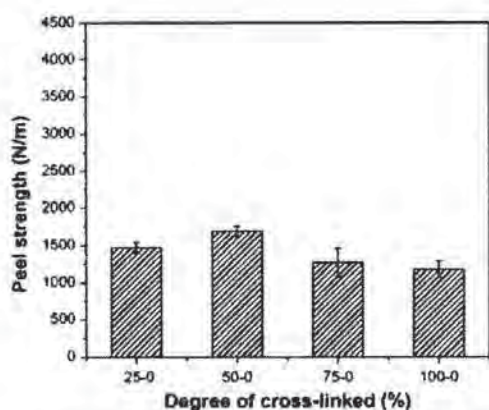


ภาพที่ 1 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอกที่มีลักษณะพื้นที่ยึดเกาะแบบต่างๆ กัน (a) แบบเรียบ (b) แบบลอนตามทิศทางการไหล (c) แบบลอนขวางทิศทางการไหล (d) แบบตาราง

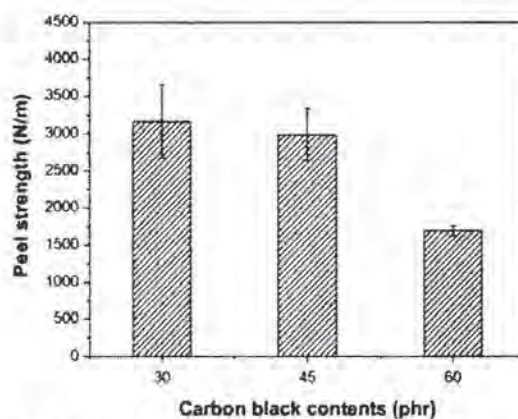
2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

อิทธิพลของปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวด์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้นที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 0 25 50 75 และ 100% และวัสดุซ้อนทับเป็นยางคอมพาวด์ที่ไม่เริ่มคงรูป พบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางเมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แล้วชิ้นงานมีการยึดเกาะกันสมบูรณ์ (perfect bonded) โดยไม่สามารถดึงชิ้นงานทดสอบให้ขาดออกจากกันได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางธรรมชาติสมบัติการยึดติด (tack property) และเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 25% พบว่า มีค่าความแข็งแรงต้านทานต่อการดึงลอกลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติการยึดติดของยางลดลงจากการเชื่อมขวางบางส่วน (premature cross-linked) และนอกจากนี้ที่ระดับการคงรูปดังกล่าวอยู่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการคงรูป ทำให้ชิ้นงานมีฟิวเจอร์และภายในชิ้นงานมีโพรงอากาศ (void) เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเป็น 50% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับการคงรูปดังกล่าวนี้ไม่ปรากฏโพรงอากาศภายในชิ้นงานวัสดุพื้น และชิ้นงานมีฟิวเจอร์นอกที่เรียบ ทำให้สามารถแทรกสัมผัสกันได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับการคงรูปมากกว่า 50% วัสดุพื้นมีลักษณะเป็นรูปร่างที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด แต่ในกรณีที่เพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเป็น 75% และ 100% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกลดลง เนื่องจากสมบัติการยึดเกาะที่ลดลงของวัสดุพื้น และความหนืดของยางเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ยางสัมผัสกันได้น้อยลง



ภาพที่ 2 อิทธิพลของระดับการคงรูปที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



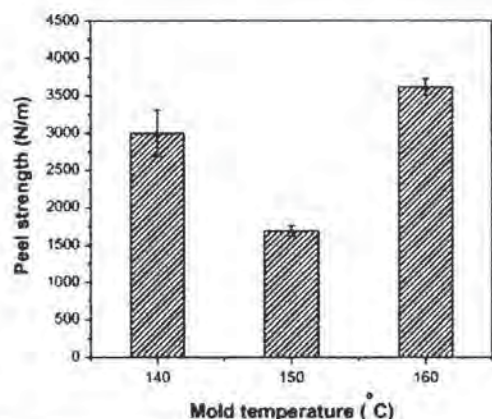
ภาพที่ 3 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางคอมพาวด์ เนื่องจากเขม่าดำมีอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางสูง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุล (chain flexibility) ลดลง จึงแพร่ข้ามระหว่างและเกี่ยวพันกัน (intermolecular diffusion and molecular entanglement) ที่หน้าสัมผัสได้ลดลง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแทรกติดเพื่อสัมผัสกันได้น้อยลง และมีอากาศคั่งค้างที่บริเวณหน้าสัมผัส

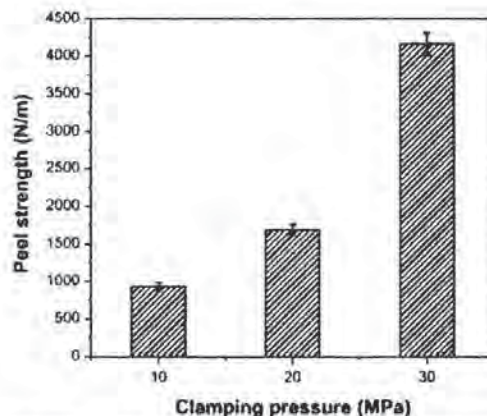
อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก

จากภาพที่ 4 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยาง ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 140°C เป็น 150°C ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 150°C เป็น 160°C ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย คือ เวลาในการสัมผัส (contact time) และอุณหภูมิ (temperature) ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ การขึ้นรูปชิ้นงานที่

อุณหภูมิต่ำ (140°C) ต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารูปที่สมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามได้ในระยะความลึก (depth of diffusion) ที่เพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในขณะที่การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (160°C) ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างหน้าสัมผัสได้ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลที่แพร่ข้ามเกิดการเชื่อมขวางได้ อย่างรวดเร็วและมีความหนาแน่นพันธะที่สูงกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

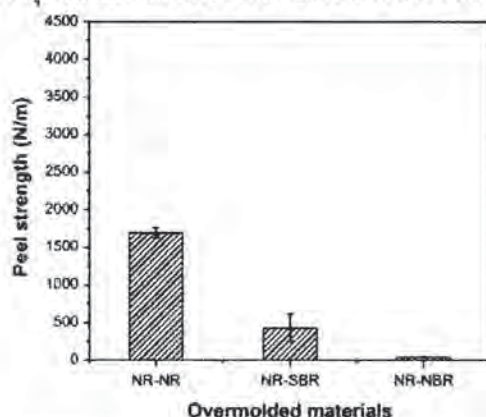


ภาพที่ 5 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

หากพิจารณาอิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ที่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานยางสามารถแทรกสัมผัสกันได้ดี และอากาศที่ตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัสสามารถขับออกได้โดยง่ายเมื่อใช้แรงดันสูง ซึ่งทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking) ที่ดีขึ้น และนอกจากนี้การใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามและเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น

อิทธิพลของชนิดของยางคอมพาวด์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

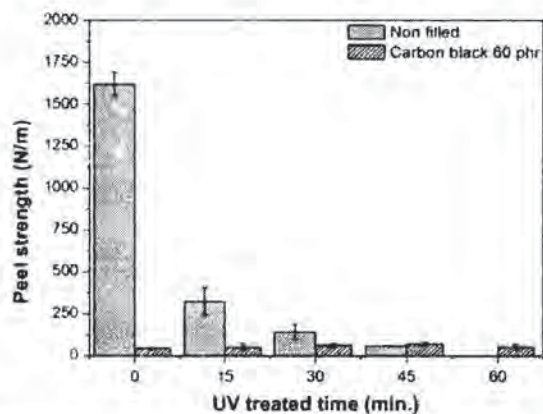
ภาพที่ 6 เป็นผลการศึกษาความต้านทานต่อการดึงลอกระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยาง SBR และยาง NBR โดยใช้ยางธรรมชาติที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% เป็นวัสดุพื้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า คู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติมีความแข็งแรงสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากยางชนิดเดียวกันซึ่งมีความเข้ากันได้ (compatible) ประกอบกับยางธรรมชาติมีสมบัติการยึดติดที่สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับคู่ของยางธรรมชาติกับยาง SBR ซึ่งยางชนิดไม่มีขั้ว (non-polar rubber) เช่นเดียวกัน พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกที่ต่ำกว่าคู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก สมบัติการยึดเกาะของยาง SBR มีค่าต่ำมาก (พงษ์ธร, 2550) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาของคู่ของยางธรรมชาติกับยาง NBR พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกต่ำที่สุด เนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีความเป็นขั้ว ในขณะที่ยาง NBR มีความเป็นขั้ว (polar rubber) สูง



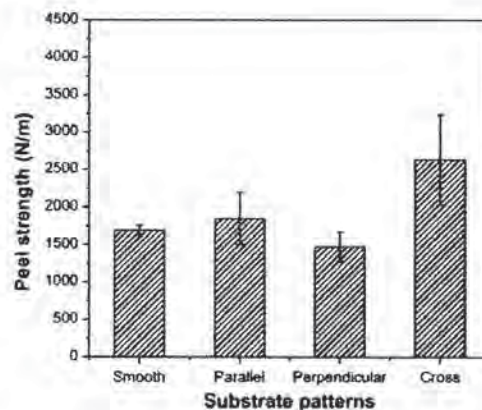
ภาพที่ 6 อิทธิพลของชนิดยางที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

ผลการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง

ผลการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Irradiation) ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการฉายรังสี ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางบางส่วน (premature crosslinked) ที่ผิวหน้ายางก่อนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ เนื่องจากสภาวะในห้องฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 60°C เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างหน้าสัมผัสลดลง สำหรับผลการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนผิวชิ้นงานยางที่ผสมเคมีดำปริมาณ 60 phr ณ เวลาต่างๆ กัน พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเคมีดำมีความสามารถในการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต



ภาพที่ 7 อิทธิพลของการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



ภาพที่ 8 อิทธิพลของการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

ผลจากการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ด้วยการออกแบบอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ซึ่งได้แก่ แผ่นลอนทิศทางการไหล แผ่นลอนทิศทางการขวางการไหล และแผ่นลอนตาราง แล้วเปรียบเทียบกับวัสดุพื้นที่ใช้อินเลอร์แผ่นเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่า ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่ยึดเกาะโดยใช้อินเลอร์ทิศทางการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสกันของยางพื้นสูงขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสโดยใช้อินเลอร์แผ่นลอนขวางทิศทางการไหล พบว่า มีความแข็งแรงลดลง ทั้งที่มีพื้นที่สัมผัสเท่ากับชิ้นงานที่ใช้อินเลอร์แผ่นลอนทิศทางการไหล เนื่องจากการไหลแบบขวางการไหลนั้นใช้ระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น และยางคอมพาวนด์ไหลได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้มีการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการไหลเต็มแม่พิมพ์ และนอกจากนี้การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง อาจมีอากาศที่บริเวณขอบมุมของร่องบากผสมกับเนื้อยางในระหว่างการไหล ทำให้ที่บริเวณส่วนสุดท้ายของระยะการไหลเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้แผ่นลอนตาราง พบว่า ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการสัมผัสเพิ่มขึ้น อีกทั้งยางคอมพาวนด์สามารถไหลได้ดีและไม่ปรากฏโพรงอากาศในส่วนสุดท้ายของชิ้นงาน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30-60 phr ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยศึกษาถึงปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ (ระดับการคงรูป ปริมาณสารตัวเติม) ปัจจัยในกระบวนการผลิต (อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันเปิดแม่พิมพ์) และนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูปและปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นในยางคอมพาวนด์ ทำให้ความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต พบว่า แรงดันเปิดแม่พิมพ์ เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานยางมีสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกที่ดีขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการคงรูปควบคู่กัน โดยเวลาสัมผัสและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น และผลจากการพัฒนาสมบัติการยึดเกาะด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต พบว่า ไม่สามารถเพิ่มความสมบัติการยึดเกาะให้กับชิ้นงานยางได้ ส่วนการพัฒนาสมบัติการยึดเกาะทางกล โดยการสร้างรูปแบบต่างๆ บนวัสดุพื้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาในการออกแบบรูปแบบต่างๆ สำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะ คือ ทิศทางการไหลและระยะทางในการไหลของยาง ซึ่งหากเป็นกรณีรูปแบบที่สร้างขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการไหลหรือขัดขวางการไหลของยาง ส่งผลทำให้ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะลดลง

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม

ควรมีการศึกษากลไกการยึดเกาะทั้งกายภาพ (physically bonded) และการยึดเกาะทางเคมี (chemically bonded) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ ในขณะที่ขึ้นรูป ซึ่งความรู้ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมและกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

อยู่ในระหว่างการเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ

แบบสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาและพัฒนาสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

(ภาษาอังกฤษ): Investigation and Improvement on Bond Strength of Compression Overmolded Rubber Parts

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. สมเจตน์ พชรพันธ์

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่อยู่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์/โทรสาร 02-942-8555 ต่อ 2121/02-955-1811 E-mail fengsjpc@ku.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

นายวัชรพงษ์ ชูแก้ว

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวรุ่งทิพย์ ปาลวัฒน์

ผู้ร่วมวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญ

ปัจจุบันตลาดมีความต้องการผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถใช้งานได้หลากหลายเพิ่มขึ้น หรือต้องการสีที่สวยงาม ซึ่งไม่สามารถนำยางชนิดเดียวมาใช้ผลิตได้ จำเป็นต้องนำยางที่มีสมบัติแตกต่างกัน มาผสมกันหรือประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางห่อดอก ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น วิธีการที่นิยมใช้กัน คือ ยางผสม (blend) และการขึ้นรูปยางโดยเทคนิคโอเวอร์โมลด์ (over-molding technique) โดยข้อดีของเทคนิคโอเวอร์โมลด์ คือ สามารถประยุกต์เข้ากับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบเดิม ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการฉีดขึ้นรูป กระบวนการกึ่งฉีดขึ้นรูป รวมไปถึงกระบวนการอัดรีดแบบอัดรีดร่วม ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบ่งเป็นการขึ้นรูปวัสดุพื้น (substrate material) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ (overmolded material) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มักมีปัญหาด้านความแข็งแรงในการยึดเกาะ เช่น การขาดหรือลอกออกบริเวณที่สัมผัสกัน (delamination) เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง โดยความแข็งแรงในการยึดเกาะขึ้นอยู่กับสมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ (material compatibility) และการปรับตั้งค่าในกระบวนการผลิต (processing parameter) ที่ใช้ในการขึ้นรูป รวมถึงลักษณะการออกแบบแม่พิมพ์ (mold design) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง รวมไปถึงพัฒนาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางของประเทศรวมถึงใช้ในงานวิจัยในอนาคต

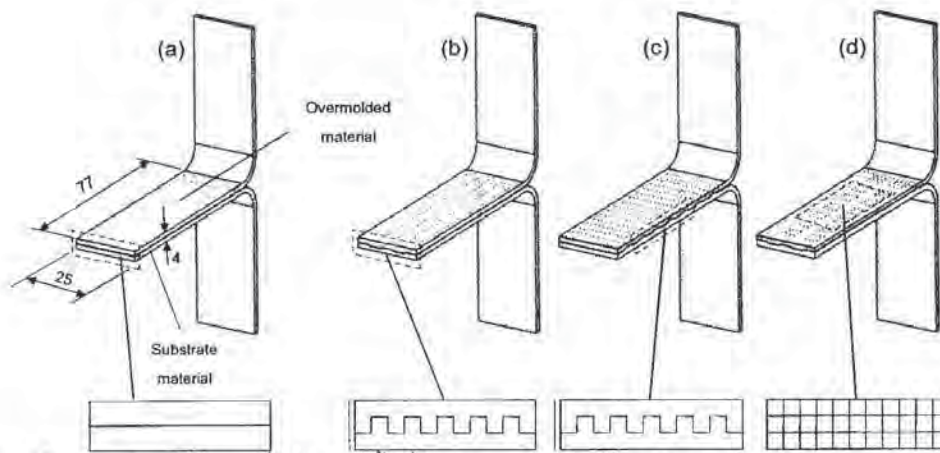
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติการยึดติดระหว่างวัสดุยางโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์
2. เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

ผลการดำเนินงาน

1. วิธีการ

ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป เพื่อใช้ในการเตรียมวัสดุพื้น วัสดุซ้อนทับ และชิ้นงานทดสอบสำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นเพื่อให้มีรูปแบบ (groove pattern) ต่างๆ กันนั้น จำเป็นต้องใช้อินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยอินเสิร์ตแผ่นเรียบ (smooth) แผ่นลอนทิศทางการไหล (parallel to flow direction) แผ่นลอนทิศทางการขวางการไหล (perpendicular to flow direction) และแผ่นลอนตาราง (cross) โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก เริ่มต้นด้วยการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ มาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D413 ที่มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1(a-d) จากนั้นนำชิ้นงานยางทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งชิ้นงานหลุดลอกออกจากกัน

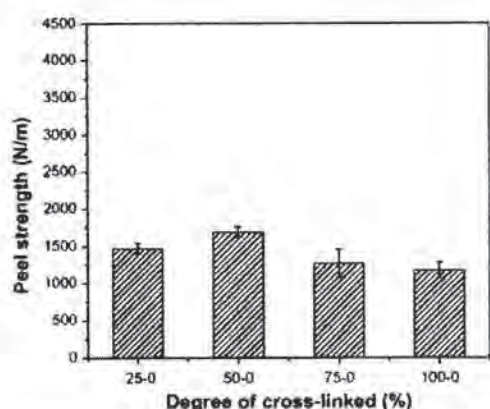


ภาพที่ 1 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอกที่มีลักษณะพื้นที่ยึดเกาะแบบต่างๆ กัน (a) แบบเรียบ (b) แบบลอนตามทิศทางการไหล (c) แบบลอนขวางทิศทางการไหล (d) แบบตาราง

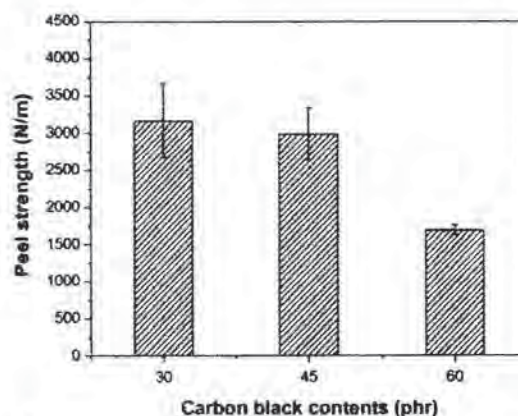
2. ผลการวิจัยและวิจารณ์

อิทธิพลของปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวด์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้นที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 0 25 50 75 และ 100% และวัสดุซ้อนทับเป็นยางคอมพาวด์ที่ไม่เริ่มคงรูป พบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางเมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แล้วชิ้นงานมีการยึดเกาะกันสมบูรณ์ (perfect bonded) โดยไม่สามารถดึงชิ้นงานทดสอบให้ขาดออกจากกันได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางธรรมชาติสมบัติการยึดติด (tack property) และเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 25% พบว่า มีค่าความแข็งแรงต้านทานต่อการดึงลอกลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติการยึดติดของยางลดลงจากการเชื่อมขวางบางส่วน (premature cross-linked) และนอกจากนี้ที่ระดับการคงรูปดังกล่าวอยู่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการคงรูป ทำให้ชิ้นงานมีฟิวเจอร์และภายในชิ้นงานมีโพรงอากาศ (void) เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเป็น 50% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับการคงรูปดังกล่าวนี้ไม่ปรากฏโพรงอากาศภายในชิ้นงานวัสดุพื้น และชิ้นงานมีผิวภายนอกที่เรียบ ทำให้สามารถแทรกสัมผัสกันได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับการคงรูปมากกว่า 50% วัสดุพื้นมีลักษณะเป็นรูปร่างที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด แต่ในกรณีนี้ที่เพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเป็น 75% และ 100% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกลดลง เนื่องจากสมบัติการยึดเกาะที่ลดลงของวัสดุพื้น และความหนืดของยางเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ยางสัมผัสกันได้น้อยลง



ภาพที่ 2 อิทธิพลของระดับการคงรูปที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



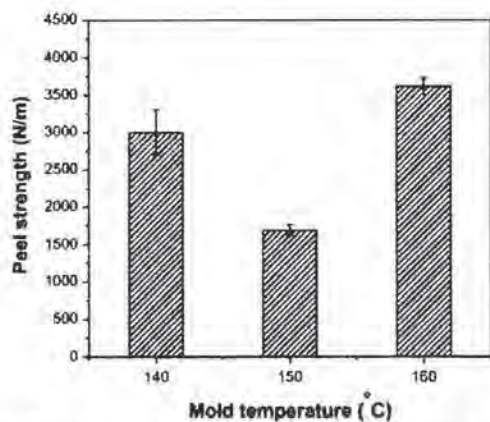
ภาพที่ 3 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางคอมพาวด์ เนื่องจากเขม่าดำมีอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางสูง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุล (chain flexibility) ลดลง จึงแพร่ข้ามระหว่างและเกี่ยวพันกัน (intermolecular diffusion and molecular entanglement) ที่หนาแน่นลดลง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแทรกติดเพื่อสัมผัสกันได้น้อยลง และมีอากาศตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัส

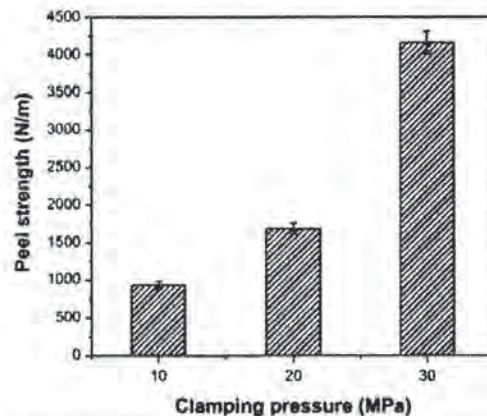
อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก

จากภาพที่ 4 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยาง ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 140°C เป็น 150°C ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 150°C เป็น 160°C ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย คือ เวลาในการสัมผัส (contact time) และอุณหภูมิ (temperature) ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ การขึ้นรูปชิ้นงานที่

อุณหภูมิต่ำ (140°C) ต้องใช้ระยะเวลาสั้นขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่สมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามได้ในระยะความลึก (depth of diffusion) ที่เพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในขณะที่การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (160°C) ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างหน้าสัมผัสได้ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลที่แพร่ข้ามเกิดการเชื่อมขวางได้ อย่างรวดเร็วและมีความหนาแน่นพันธะที่สูงกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

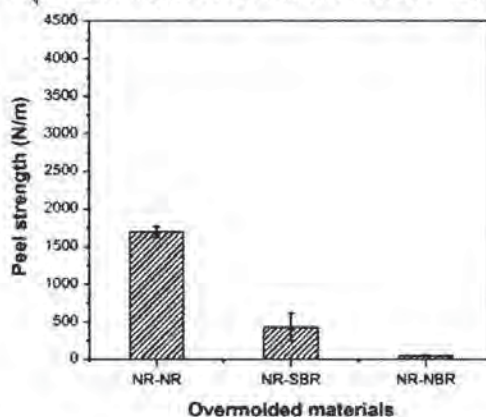


ภาพที่ 5 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

หากพิจารณาอิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ที่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานยางสามารถแทรกสัมผัสกันได้ดี และอากาศที่ตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัสสามารถขับออกได้โดยง่ายเมื่อใช้แรงดันสูง ซึ่งทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking) ที่ดีขึ้น และนอกจากนี้การใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามและเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น

อิทธิพลของชนิดของยางคอมพาวด์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

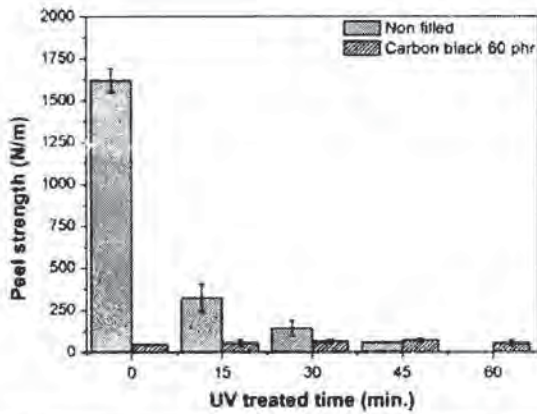
ภาพที่ 6 เป็นผลการศึกษาความต้านทานต่อการดึงลอกระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยาง SBR และยาง NBR โดยใช้ยางธรรมชาติที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% เป็นวัสดุพื้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า คู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ มีความแข็งแรงสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากยางชนิดเดียวกันซึ่งมีความเข้ากันได้ (compatible) ประกอบกับยางธรรมชาติมีสมบัติการยึดติดที่สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับคู่ของยางธรรมชาติกับยาง SBR ซึ่งยางชนิดไม่มีขั้ว (non-polar rubber) เช่นเดียวกัน พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกที่ต่ำกว่าคู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุมาจาก สมบัติการยึดเกาะของยาง SBR มีต่ำมาก (พงษ์ธร, 2550) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคู่ของยางธรรมชาติกับยาง NBR พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกต่ำที่สุด เนื่องจากยางธรรมชาติไม่มีความเป็นขั้ว ในขณะที่ยาง NBR มีความเป็นขั้ว (polar rubber) สูง



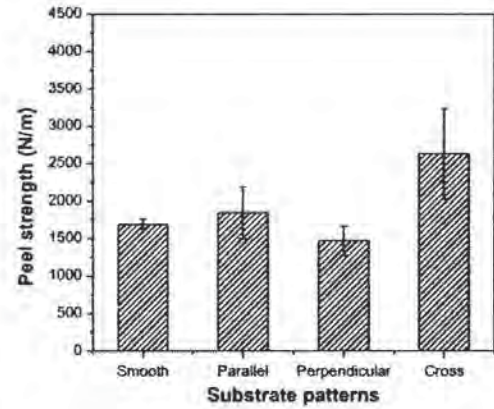
ภาพที่ 6 อิทธิพลของชนิดยางที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

ผลการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง

ผลการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Irradiation) ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการฉายรังสี ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางบางส่วน (premature crosslinked) ที่ผิวหน้ายางก่อนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ เนื่องจากสภาวะในห้องฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 60°C เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างหน้าสัมผัสลดลง สำหรับผลการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนผิวชิ้นงานยางที่ผสมเคมีดำปริมาณ 60 phr ณ เวลาต่างๆ กัน พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเคมีดำมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต



ภาพที่ 7 อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



ภาพที่ 8 อิทธิพลของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

ผลจากการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยการออกแบบอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ซึ่งได้แก่ แผ่นลอนทิศทางการไหล แผ่นลอนทิศทางการขวางการไหล และแผ่นลอนตาราง แล้วเปรียบเทียบกับวัสดุพื้นที่ใช้อินเสิร์ตแผ่นเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่า ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่ยึดเกาะโดยใช้อินเสิร์ตทิศทางการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสกันของยางพื้นสูงขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสโดยใช้อินเสิร์ตแผ่นลอนขวางทิศทางการไหล พบว่า มีความแข็งแรงลดลง ทั้งที่มีพื้นที่สัมผัสเท่ากับชิ้นงานที่ใช้อินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางการไหล เนื่องจากการไหลแบบขวางการไหลนั้นใช้ระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น และยางคอมพาวนด์ไหลได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้มีการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการไหลเต็มแม่พิมพ์ และนอกจากนี้การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง อาจมีอากาศที่บริเวณขอบมุมของร่องบากผสมกับเนื้อยางในระหว่างการไหล ทำให้ที่บริเวณส่วนสุดท้ายของระยะการไหลเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้แผ่นลอนตาราง พบว่า ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการสัมผัสเพิ่มขึ้น อีกทั้งยางคอมพาวนด์สามารถไหลได้ดีและไม่ปรากฏโพรงอากาศในส่วนสุดท้ายของชิ้นงาน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมและที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30-60 phr ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยศึกษาถึงปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ (ระดับการคงรูป ปริมาณสารตัวเติม) ปัจจัยในกระบวนการผลิต (อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันปิดแม่พิมพ์) และนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูปและปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นในยางคอมพาวนด์ ทำให้ความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต พบว่า แรงดันปิดแม่พิมพ์ เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานยางมีสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกที่ดีขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการคงรูปควบคู่กัน โดยเวลาสัมผัสและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น และผลจากการพัฒนาสมบัติการยึดเกาะด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต พบว่า ไม่สามารถเพิ่มความสมบัติการยึดเกาะให้กับชิ้นงานยางได้ ส่วนการพัฒนาสมบัติการยึดเกาะทางกล โดยการสร้างรูปแบบต่างๆ บนวัสดุพื้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาในการออกแบบรูปแบบต่างๆ สำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะ คือ ทิศทางการไหลและระยะทางในการไหล ของยาง ซึ่งหากเป็นกรณีรูปแบบที่สร้างขึ้นตั้งจากกับทิศทางการไหลหรือขัดขวางการไหลของยาง ส่งผลทำให้ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะลดลง

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

ควรมีการศึกษากลไกการยึดเกาะทั้งกายภาพ (physically bonded) และการยึดเกาะทางเคมี (chemically bonded) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ ในขณะที่ขึ้นรูป ซึ่งความรู้ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมและกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตได้ง่ายยิ่งขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

อยู่ในระหว่างการเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ (compression overmolded rubber part) ซึ่งใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพื้น (Substrate material) และใช้ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR เป็นวัสดุซ้อนทับ (overmolded material) โดยได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันปิดแม่พิมพ์ รวมถึงปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ ซึ่งได้แก่ ระดับการคงรูป และปริมาณเคมีดำ จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูป และปริมาณเคมีดำที่เพิ่มขึ้นในยางคอมพาวนด์ ทำให้ความต้านทานต่อการดึงลอก (peel strength) มีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต พบว่า การเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ (อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาสัมผัส ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกที่ดีขึ้น และผลจากการนำยางสังเคราะห์ ได้แก่ ยาง SBR และยาง NBR มาใช้เป็นวัสดุซ้อนทับบนยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานขึ้นอยู่กับสมบัติการยึดติดกัน (tack property) และความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างยางทั้งสองประเภท นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง ด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV radiation) บนวัสดุพื้น (ยางธรรมชาติ) จากนั้นจึงอัดยาง NBR ลงบนผิวเพื่อเป็นวัสดุซ้อนทับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มเวลาการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเคมีดำมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตที่มีพลังงานความร้อนสูง ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการสุกตัวบางส่วน (premature cross-linked) ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงลอกมีค่าลดลง และผลจากพัฒนาสมบัติการยึดเกาะ โดยการสร้างรูปแบบ (groove pattern) ต่างๆ บนวัสดุพื้น แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับเพิ่มมากขึ้น และเกิดการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking)

คำสำคัญ: กระบวนการอัดขึ้นรูป, สมบัติการยึดเกาะของยาง, เทคนิคโอเวอร์โมลด์

Abstract

The objective of this work was to investigate the influence of processing parameters on the bond strength of compression overmolded rubber part. The substrate material used in this study was natural rubber (NR) and the overmolded materials used were natural rubber, Styrene Butadiene Rubber (SBR) and Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR), respectively. The effects of mold temperature, clamping pressure, degree of curing, and carbon black content were our main interest. The experimental results indicated that the increase of degree of cross-linked and carbon black content decreased the peel strength of overmolded rubber part. An increasing clamping pressure, mold temperature, and contact time tended to increase the peel strength. It should be noted 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. Furthermore, the UV radiation technique was proposed in this work to enhance the bond strength of compression overmolded rubber part by use of NR as a substrate and NBR as an overmolded material. It was found that the longer the length of treatment, the higher the polarity of substrate NR. However, it was found that the peel strength for the pairs of NR and NBR decreased with increasing length of treatment. This was associated with the increasing temperature of NR substrate during the UV treatment (approximately 70°C) as a result of premature cross-linked occurred at the substrate surface. Furthermore, the significant improvement of peel strength was found by using the perpendicular and parallel groove patterns on the substrate surface as compared to smooth surface. This was due to the higher contact area and the mechanical interlocking.

Keywords: Compression molding, Bond strength, Over-molding technique

1. ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันตลาดมีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้หลากหลายเพิ่มขึ้น หรือต้องการสีสันทึบสวยงาม ซึ่งไม่สามารถนำยางชนิดเดียวมาใช้ผลิตได้ จำเป็นต้องนำยางที่มีสมบัติเด่นต่าง ๆ มาผสมกันหรือประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น ล้อยาง ยางล้อดอก ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งในส่วนของสูตรยาง (rubber formulation) ที่เหมาะสมกับการใช้งาน การผสมยางหลายชนิดเข้าด้วยกัน (rubber blend) รวมไปถึงกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคใหม่ โดยเทคนิคที่นิยมใช้คือการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง (overmolding technique) เนื่องจากสามารถประยุกต์เข้ากับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศ ได้แก่ กระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) กระบวนการกึ่งฉีดขึ้นรูป (transfer molding) รวมไปถึงกระบวนการอัดรีดแบบอัดรีดร่วม (co-extrusion) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง แบ่งเป็นการขึ้นรูปวัสดุพื้น (substrate material) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ (overmolded material) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีสมบัติการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การใช้ยางธรรมชาติและยางไฮดรินบิวตาไดอินเป็นหน้ายางรถยนต์ การใช้ยางธรรมชาติเป็นชั้นเสริมความแข็งแรงในท่อยาง หรือการใช้สีของยางที่แตกต่างกันในการเพิ่มความสวยงามของผลิตภัณฑ์ นอกจากเทคนิคการโอเวอร์โมลด์ดิ้งระหว่างยางด้วยกันแล้ว ยังมีการนำไปใช้กับวัสดุอื่นๆ อีก ยกตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปยางกับโลหะหรือเทอร์โมพลาสติก โดยผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนดังกล่าวมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นอย่างมากในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งมีการแข่งขันสูงทั้งด้านเรื่องราคาและคุณภาพ แต่อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ้งในประเทศยังอยู่ในเฉพาะบริษัทต่างชาติ ในขณะที่ผู้ประกอบการในประเทศยังไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพเทียบเท่าได้ โดยปัญหาที่พบส่วนใหญ่ คือ การขาดหรือลอกออกบริเวณที่ยางสัมผัสกัน (delamination) เมื่อใช้งานได้ไม่นาน แนวทางการแก้ปัญหาในปัจจุบันยังคงใช้การลองผิดลองถูกซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทั้งในส่วนของเวลาและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยองค์ความรู้ที่จำเป็นสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ประกอบไปด้วยความรู้ในด้านการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสม (mold design) สมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ (material compatibility) และการปรับตั้งค่าในกระบวนการผลิต (processing parameter) ที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการสร้างองค์ความรู้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์ดิ้ง และศึกษาปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นที่เป็นยางธรรมชาติกับยางชนิดต่างๆ รวมไปถึงพัฒนาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะโดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV treated) และเทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางของประเทศรวมถึงใช้ในงานวิจัยในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติการยึดติดระหว่างวัสดุยางโดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง
2. เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง โดยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

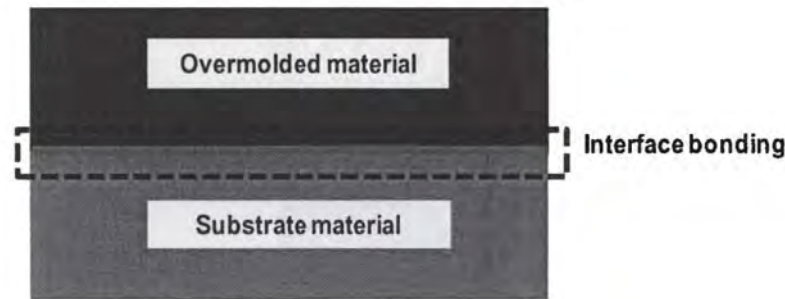
3. ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้งเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากมีข้อดีในด้านต้นทุนด้านเครื่องจักรที่สามารถใช้เครื่องเดิมหรือใช้ต้นทุนในการปรับปรุงต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง มีสีสัมผัสหรือมีวัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิดภายในชิ้นงานเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้งในกระบวนการผลิตเริ่มจากการขึ้นรูปวัสดุพื้น จากนั้นจึงขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง



ภาพที่ 2 เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้ง

เทคนิคการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลดิ้งในกระบวนการผลิตสามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการฉีดและกระบวนการอัดขึ้นรูป หรือสามารถใช้ร่วมกันระหว่างกระบวนการ ยกตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปวัสดุพื้นด้วยกระบวนการฉีด จากนั้นจึงขึ้นรูปวัสดุซ้อนทับโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้ผู้ประกอบการมีทางเลือกในการใช้งานเครื่องจักรที่มีอยู่มากกว่าเทคนิคในกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ นอกจากนี้เทคนิคโอเวอร์โมลดิ้งยังสามารถใช้ได้กับวัสดุพื้นที่เป็นโลหะหรือพอลิเมอร์ ซึ่งมีการใช้งานที่มากขึ้นในอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ยางรองแท่นเครื่องลูกหมากกันโคลงหรือ ยางกันสะเทือนของฮาร์ดดิสก์อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบบ่อยในการใช้เทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง ได้แก่ ความเข้ากันได้ของวัสดุ การเลือกใช้ปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสม และการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการยึดเกาะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพและอายุการใช้งานที่สั้นกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันที่นำเข้าจากต่างประเทศ

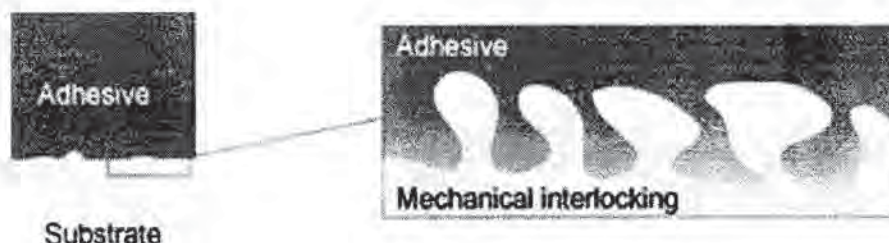
3.2 ทฤษฎีในการยึดเกาะ (theories of adhesion)

กลไกในการยึดเกาะ (mechanisms of adhesion) ของพอลิเมอร์หรือวัสดุชนิดอื่น ที่ผิวสัมผัสเป็นผลมาจากการยึดเกาะทางกล (mechanically bonded) ทางกายภาพ (physically bonded) และทางเคมี (chemically bonded) ซึ่งสามารถแบ่งเป็นทฤษฎีที่สำคัญ 3 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking theory) ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory) และทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory)

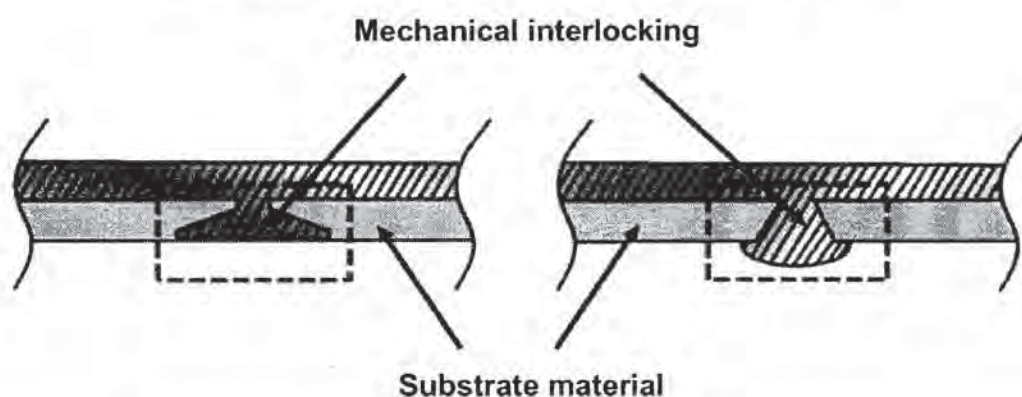
3.2.1 ทฤษฎีการยึดเกาะทางกล (mechanical interlocking theory)

การยึดเกาะทางกลในกระบวนการขึ้นรูปโดยเทคนิคโอเวอร์โมลดิ้ง เกิดจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาสัมผัสกัน ส่งผลให้เกิดการแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นอยู่กับเวลาและขนาดของพื้นที่สัมผัส (Kinloch, 1990; Packham, 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3 นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิว (surface treatment) โดยเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสในระดับไมครอน สามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดติด (Clearfield et al., 1991) โดยทั่วไปแล้วภาคอุตสาหกรรมการผลิตนิยมใช้หลักการยึดเกาะทางกลโดยออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการไหลทะลุของพอลิ

เมอร์หลอมเหลวซึ่งเป็นวัสดุซึ่ซนทั้บไปยังอีกด้านของวัสดุพื้นดั่งที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันแบบทางกลดั่งแสดงในภาพที่ 4



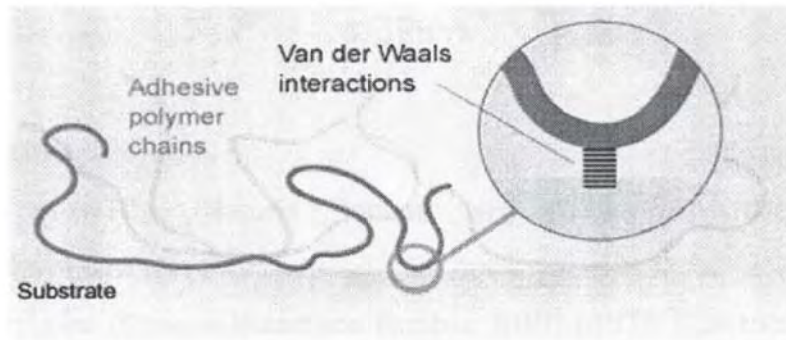
ภาพที่ 3 การแทรกตัวของสายโซ่โม่เลกุลที่บริเวณผิวสัมผัส



ภาพที่ 4 การขึ้นรูปแบบโอเวอร์โม่ดั่งโดยออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการยึดเกาะแบบทางกล

3.2.2 ทฤษฎีการดูดซับ (absorption theory)

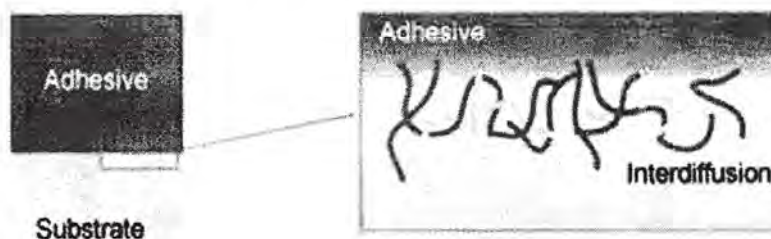
ทฤษฎีการดูดซับถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายถึงการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น ยางหรือเทอร์โมพลาสติก (Lee, 1991) ซึ่งมีพื้นผิวที่สัมผัสหรือเชื่อมติดกัน โดยการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโม่เลกุลในบริเวณที่พอลิเมอร์สองชนิดสัมผัสกัน โดยทั่วไปแล้วแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากแรงทุติยภูมิ (secondary force) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แรงวันเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นในทฤษฎีการดูดซับ

3.2.3 ทฤษฎีการแพร่ข้าม (diffusion theory)

ทฤษฎีการแพร่ข้ามอธิบายการยึดเกาะของวัสดุสองชนิดที่มีผิวสัมผัสกันในระยะที่สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามระหว่างกัน (Pocius, 2002) ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิดกลายเป็นเนื้อเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 6 อย่างไรก็ตามทฤษฎีการแพร่ข้ามไม่สามารถอธิบายได้ถึงการยึดเกาะของวัสดุที่สายโซ่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (rigid) นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาการแพร่ข้ามสูงสุดของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 10 วินาที ที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งทำให้การแพร่ข้ามเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 6 การแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลที่บริเวณผิวสัมผัสที่กลายเป็นเนื้อเดียวกัน

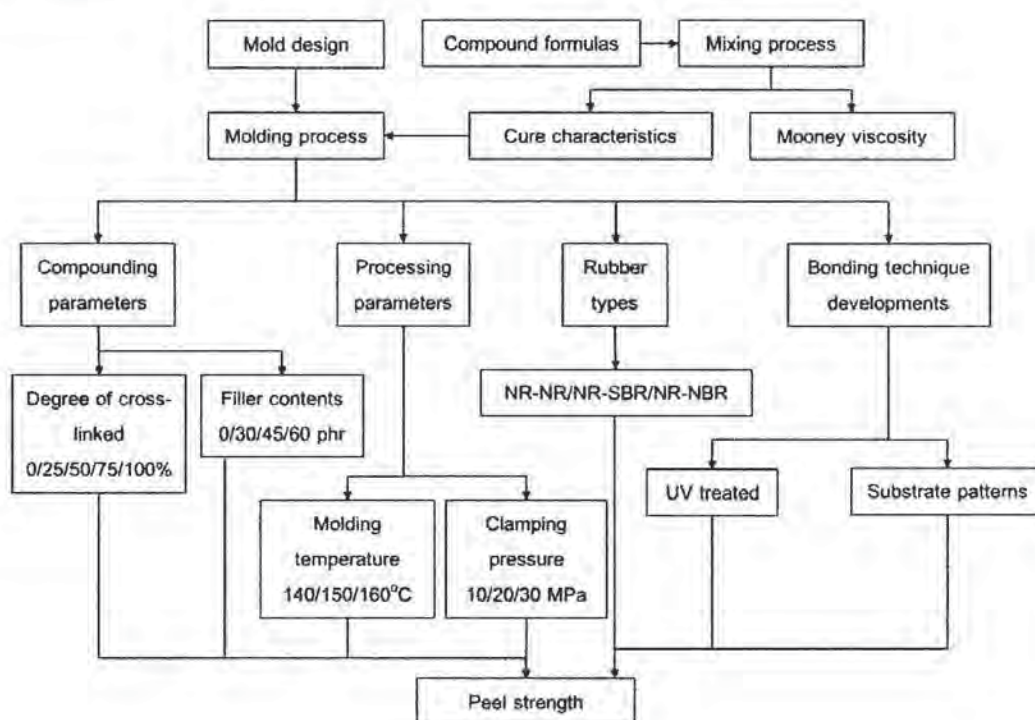
3. วิธีการ

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- ยางธรรมชาติเกรด STR5L (Natural Rubber, NR) (บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน))
- ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) (BSTE SBR1502)
- ยางไนไตรล์บิวตาไดอีน (Nitrile Butadiene Rubber, NBR) (NANCAR)
- ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) (ZnDEC)
- กรดสเตียริก (stearic acid) (เกรดการค้า)
- น้ำมันไดออกทิลฟทาเลท (Dioctyl Phthalate, DOP) (GLOBAL CHEMIE TRADING)
- น้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) (GLOBAL CHEMIE TRADING)
- เขม่าดำ (carbon black) เกรด N660 (ห้างหุ้นส่วนจำกัด กิจไพบูลย์เคมี)
- ไฮสไตรีนเรซิน (high-styrene resin) (เกรดการค้า)
- เทตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl Thiuram Disulfide, TMTD) (เกรดการค้า)
- บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิเนต (N-tert.butyl-2-benzothiazole, TBBS) (บริษัท จี เอส พี โปรดักส์ จำกัด)
- ไดไทโอดิมอร์โฟลีน (Dithiodimorpholine, DTDM) (เกรดการค้า)
- ไดฟีนีลกวานิดีน (Diphenyl Guanidine, DPG) (เกรดการค้า)
- เบนโซไทอะซัลไดซัลไฟด์ (Benzothiazyl disulfide, MBTS) (เกรดการค้า)
- ไชพาราฟิน (paraffin wax) (เกรดการค้า)
- กำมะถัน (sulfur) (SULPHUR POWER 325 MESH, CANADA MATERIALS)
- เครื่องตัดยางแบบไฮดรอลิก (hydraulic cutting machine) ของบริษัท Daina จำกัด รุ่น HD-30
- เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)
- เครื่องทดสอบความหนืดมูนีของยาง (Mooney viscometer) ของ TECHPRO-visTECH รุ่น 123103
- เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer, MDR) ของ TECHPRO-rheoTECH รุ่น 121105
- เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (rubber compression machine) ของ GOTECH รุ่น GT-7014
- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM)

3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก (peel strength) ของชิ้นงานยางธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ระดับการคงรูป (degree of cross-linked) ของวัสดุพื้น อุณหภูมิแม่พิมพ์ (molding temperature) รวมถึงแรงดันปิดแม่พิมพ์ (clamping pressure) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติการยึดเกาะของยางคอมพาวนด์ในแต่ละชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ (NR-NR) ยางธรรมชาติกับยาง SBR (NR-SBR) และยางธรรมชาติกับยาง NBR (NR-NBR) รวมทั้งศึกษาแนวทางการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มสมบัติการยึดเกาะโดยการการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ ดังแสดงในภาพที่ 7

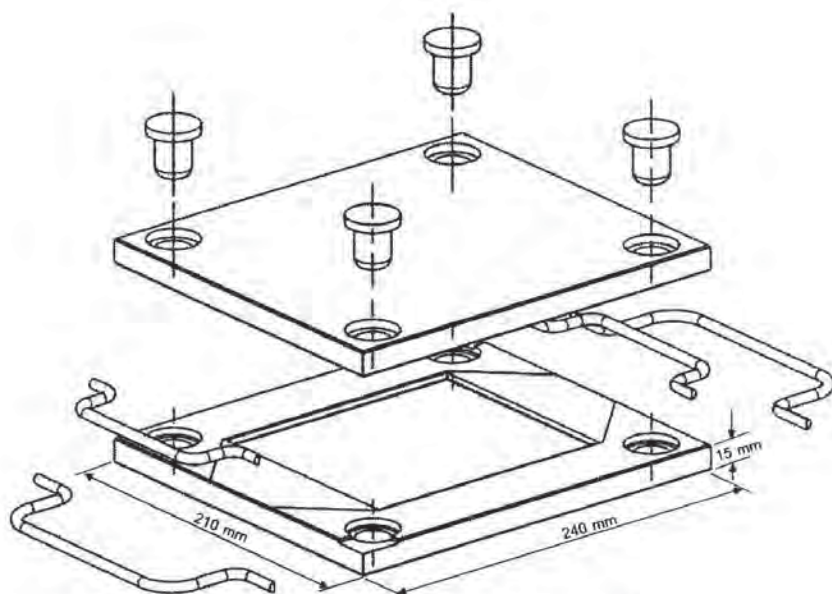


ภาพที่ 7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

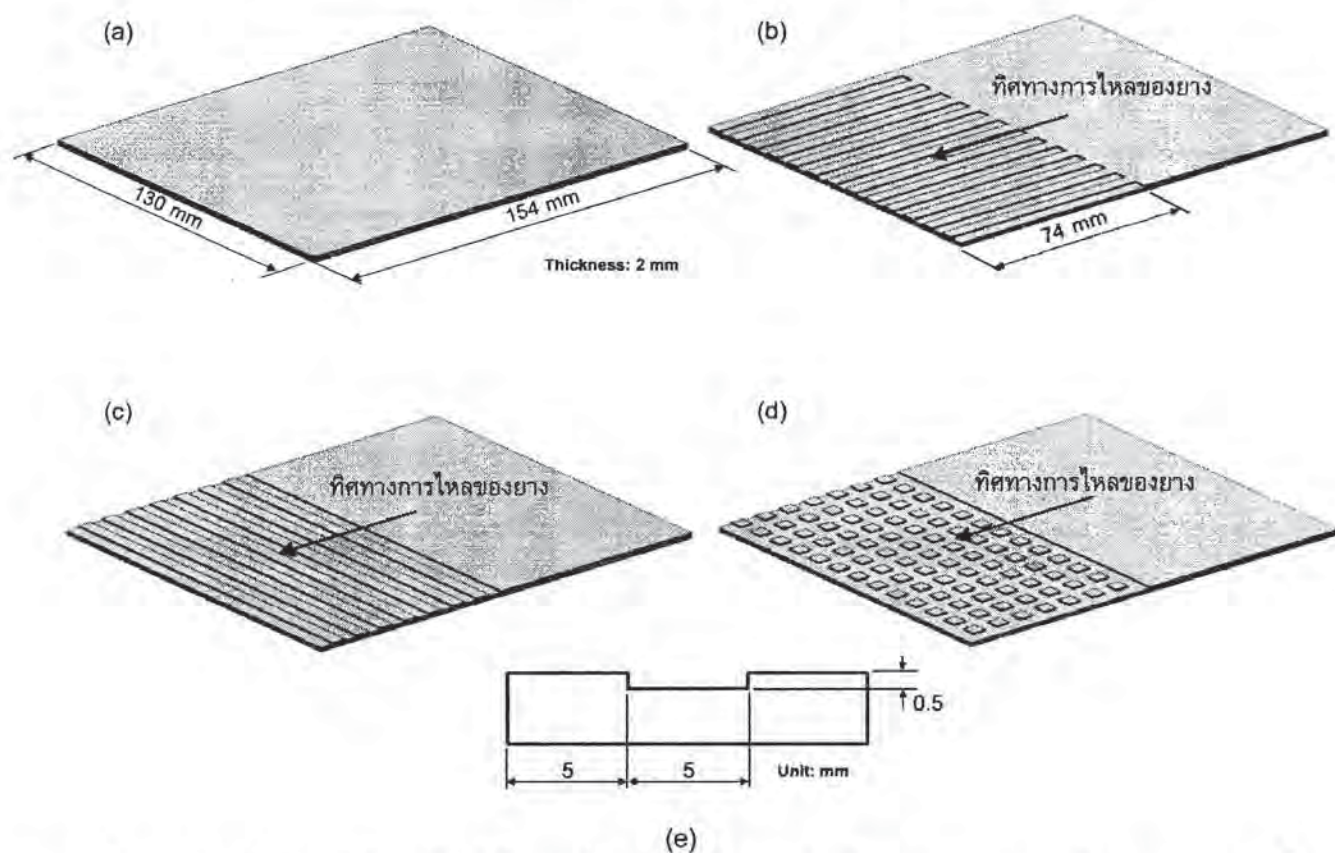
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์

ในการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 8 เพื่อใช้ในการเตรียมวัสดุพื้น วัสดุโอเวอร์โมล และชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีขนาดกว้าง 130 mm และยาว 154 mm สำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นเพื่อให้มีรูปแบบ (pattern) ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้อินเลอร์ภายในแม่พิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยอินเลอร์แผ่นเรียบ (smooth) แผ่นลอนทิศทางการไหล (parallel to flow direction) แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล (perpendicular to flow direction) และแผ่นลอนตาราง (cross) ดังแสดงในภาพที่ 9(a-d) ตามลำดับ ซึ่งแผ่นลอนทิศทางการไหลและแผ่นลอนทิศทางขวาง

การไหลมีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น 5% และแผ่นลอนแบบตารางมีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น 10% เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ



ภาพที่ 8 แบบจำลองสามมิติแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปยาง



ภาพที่ 9 แบบจำลองสามมิติของอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์ (a) แผ่นเรียบ (b) แผ่นลอนทิศทางขนานการไหล (c) แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล (d) แผ่นลอนตาราง (e) ขนาดของร่องบอ

3.2.2 ขั้นตอนการบดผสมยาง

นำยางคอมพาวนด์มาบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ตามสูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่อุณหภูมิ 70 °C โดยขั้นตอนแรกบดยางธรรมชาติเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้สารเคมีผสมเข้ากับเนื้อยางได้ง่ายขึ้น จากนั้นบดผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงบดผสมเขม่าดำ High Styrene Resin พร้อมกับน้ำมันอะโรมาติก โดยแบ่งการบดผสมสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ออกเป็น 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที แล้วบดผสมสารตัวเร่งปฏิกิริยากงรูปเป็นเวลา 2 นาที ลำดับสุดท้ายบดผสมสารช่วยในการคงรูปเป็นเวลา 3 นาที เมื่อสิ้นสุดการบดผสมนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปทดสอบความหนืดมูนี และทดสอบสมบัติการคงรูป (MDR) เพื่อหาระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time, Ts2) ระยะเวลาคงรูป (cure time, Tc90) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และ ASTM D5289 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

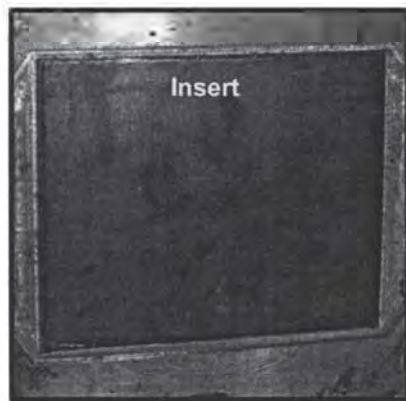
Ingredients	Content (phr*)			
	NR non-filled	NR filled	NBR filled	SBR filled
Rubber	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	3
Stearic Acid	1.5	1.5	0.5	1.5
Carbon Black (N660)	-	30/45/60	60	60
Aromatic Oil	-	6	-	20
High Styrene resin	2	2	-	-
DOP	-	-	8	-
TMTD	-	-	2	-
TBBS	1	1	-	1
DTDM	1	1	-	-
DPG	-	-	-	0.4
Paraffin Wax	-	-	-	0.5
MBTS	-	-	2	-
Sulphur	3.25	3.25	0.5	1.8

*Part per hundred of rubber by weight

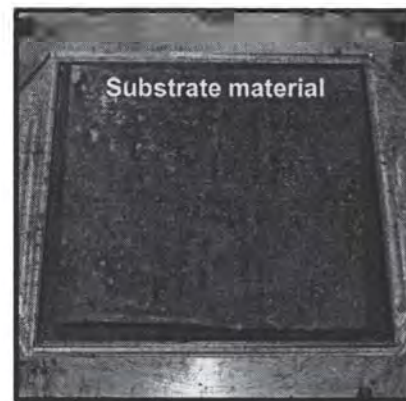
3.2.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

นำยางคอมพาวนด์ที่บดผสมแล้วตัดเป็นแผ่นที่มีน้ำหนัก 60 กรัม เพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นวัสดุที่มีความหนา 2 mm โดยการวางยางคอมพาวนด์บนอินเสิร์ตในแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 10(a-b)

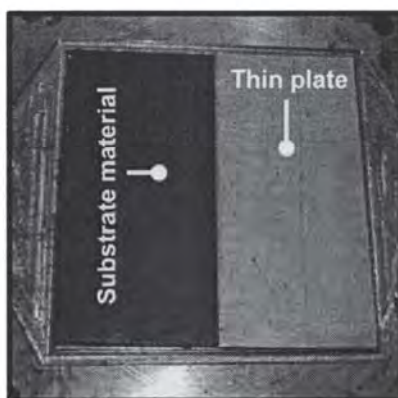
ตามลำดับ แล้วนำวัสดุพื้นที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแช่ลงในน้ำเย็นเพื่อป้องกันการเชื่อมขวางหลังการคงรูป (Post Curing) และนำแผ่นอินเลอร์ออกจากแม่พิมพ์ วางวัสดุพื้นลงไปแม่พิมพ์ วางเหล็กแผ่นบางลงบนวัสดุพื้น ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้ชิ้นงานยางติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 10 (c) จากนั้นวางวัสดุซ้อนทับที่ไม่ผ่านการคงรูปและอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 10(d-e) ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ขึ้นรูปที่ระดับการคงรูปต่างๆ นั้นได้จากการผลทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง



(a)



(b)



(c)



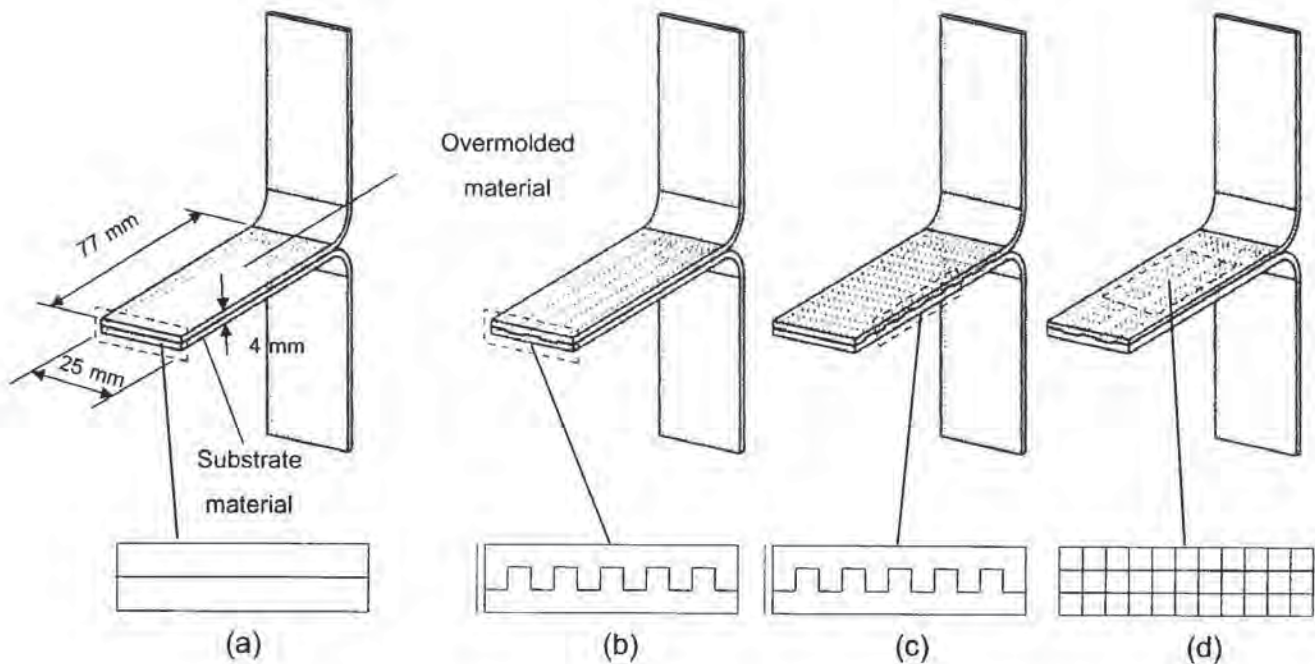
(d)



(e)

ภาพที่ 10 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์
 (a) วางอินเลอร์ (b) วางยางคอมพาวนด์ของวัสดุพื้น (c) วางเหล็กแผ่นบาง
 (d) วางยางคอมพาวนด์ของวัสดุซ้อนทับ (e) ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป

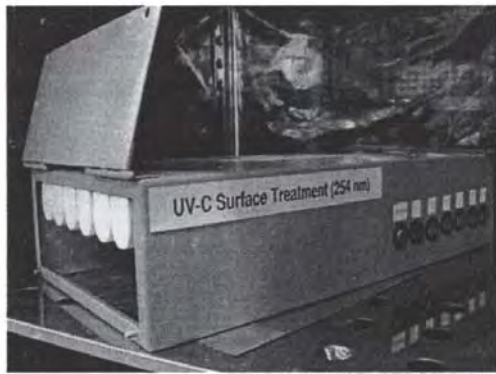
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอก เริ่มต้นโดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ดังแสดงในภาพที่ 10(e) มาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D413 ที่มีขนาดความกว้าง 25 mm หนา 4 mm ดังแสดงในภาพที่ 11(a-d) จากนั้นนำชิ้นงานยางทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min. จนกระทั่งชิ้นงานหลุดลอกออกจากกัน



ภาพที่ 11 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงลอกที่มีลักษณะพื้นผิวยึดเกาะแบบต่างๆ กัน
(a) แบบเรียบ (b) แบบลอนทิศทางขนานการไหล (c) แบบลอนทิศทางขวางการไหล (d) แบบลอนตาราง

3.2.4 ขั้นตอนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้รังสีอัลตราไวโอเลต ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุพื้น โดยการออกแบบเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวยึดเกาะ ซึ่งชิ้นงานถูกวางไว้ในเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต ดังแสดงในภาพที่ 12(a) ภายในเครื่องประกอบด้วยหลอดเมอคิวรี (mercury lamp) จำนวน 6 หลอด ดังแสดงในภาพที่ 12(b) ซึ่งมีความสามารถในการปลดปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 253.7 nm แต่ละหลอดให้พลังงานเท่ากับ 7.2 W และระยะห่างระหว่างหลอดเมอคิวรีกับชิ้นงานตัวอย่างเท่ากับ 30 mm ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสีประมาณ 60°C โดยเครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต ถูกจัดวางไว้ในตู้ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีและสามารถควบคุมรังสีอัลตราไวโอเลตให้ปลดปล่อยพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอ



(a)



(b)

ภาพที่ 12 เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต (a) ลักษณะเครื่อง (b) หลอดเมอคิวรี

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำและอุณหภูมิทดสอบที่มีต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี้ของยางยางธรรมชาติคอมพาวนด์ (NR non-filled, NR filled ในตารางที่ 2) พบว่า ปริมาณเขม่าดำในยางคอมพาวนด์มีผลทำให้ค่าความหนืดมูนนี้เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากเขม่าดำมีอนุภาคนาขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจึงเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับเนื้อยางได้มาก เมื่ออบผสมในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากเขม่าดำซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเกิดความร้อนสะสม (heat build up) ในระหว่างการอบผสมด้วยเครื่องอบผสมแบบสองลูกกลิ้ง ส่งผลทำให้ยางคอมพาวนด์พร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยา (Rattanasom and Prasertsri, 2008) ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบความหนืดมูนนี้ที่อุณหภูมิ 100 °C อาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางบางส่วน ซึ่งทำให้ยางยางธรรมชาติมีค่าความหนืดมูนนี้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ค่าความหนืดมูนนี้ เวลาเริ่มคงรูป และเวลาคงรูปของยางยางธรรมชาติคอมพาวนด์

Carbon black contents (phr)	Mooney viscosity	Testing temperature (°C)	Scorch time (min.)	Cure time (min.)
Non filled	36.50	150	2.30	16.65
30	41.50	150	1.65	14.03
45	48.20	150	1.50	11.84
60	57.10	140/150/160	2.15/0.90/0.4	7.14/4.03/2.45

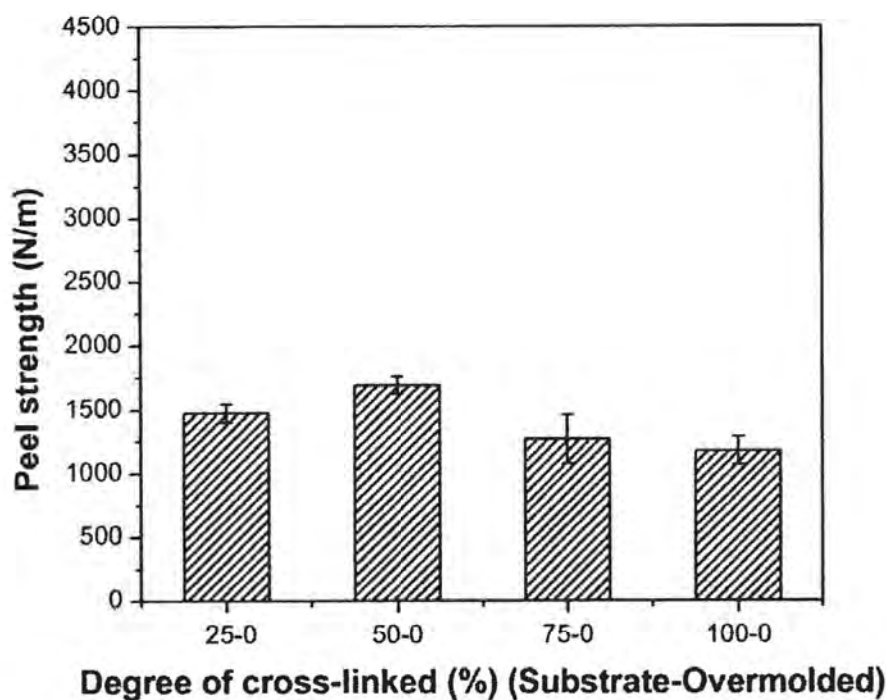
เมื่อพิจารณาเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลงเมื่อบดผสมเขม่าดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำมีค่าการนำความร้อนสูง รวมถึงสามารถบดผสมกับเนื้อยางได้ดี ส่งผลให้ความร้อนแพร่กระจาย (thermal distribution) เข้าสู่เนื้อยางได้ดี อีกทั้งที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บางกลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก (phenolic) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ควิโนน (quinone) คาร์บอกซิล (carboxyl) และแล็กโตน (lactone) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลยางได้ดี (Hofmann, 1989; Rattanasom and Prasertsri, 2008) นอกจากนี้เขม่าดำที่ใช้เป็นประเภท Furnace Black ซึ่งมีความเป็นด่าง (alkalinity) และพื้นผิวของเขม่าดำมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ (พงษ์ธร, 2550; Rattanasom and Prasertsri, 2009) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้ยางที่ผสมเขม่าดำเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นยางที่บดผสมกับเขม่าดำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีระยะเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่สั้นลง และนอกจากนี้ พบว่า อิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบส่งผลให้ยางคอมพาวนด์ มีเวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปที่ลดลง ซึ่งไปตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) กล่าวคือ ปฏิกิริยาการคงรูปเร็วขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 10°C

4.2 อิทธิพลของปัจจัยที่มาจากยางคอมพาวนด์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

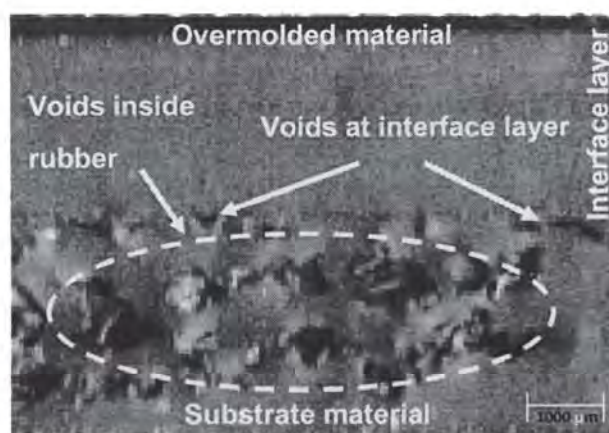
4.2.1 อิทธิพลของระดับการคงรูปวัสดุพื้น

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปของวัสดุพื้นที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติ โดยใช้เทคนิคโอเวอร์โมลด์ในการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 0 25 50 75 และ 100% และวัสดุซ้อนทับเป็นยางคอมพาวนด์ที่ยังไม่เริ่มคงรูป พบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางเมื่อนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคโอเวอร์โมลด์แล้ว ชิ้นงานมีการยึดเกาะกันสมบูรณ์ (perfect bonded) ส่งผลให้เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต้านทานต่อการดึงลอก ชิ้นงานไม่สามารถขาดออกจากกันได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางธรรมชาติสมบัติการยึดติด (tack property) ที่สูงเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางที่ยังไม่ผ่านการคงรูปมีการเคลื่อนไหว (flexible) ได้ดี ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามและมีการเกี่ยวพัน (intermolecular diffusion and molecular entanglement) ได้ดี และเมื่อเพิ่มระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 25% แสดงให้เห็นว่า มีค่าความแข็งแรงต้านทานต่อการดึงลอกลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติการยึดติดของยางลดลงจากการเชื่อมขวางบางส่วนภายในยางคอมพาวนด์ และนอกจากนี้ที่ระดับการคงรูปดังกล่าวอยู่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการคงรูป ทำให้ที่บริเวณผิวชิ้นงานมีลักษณะขรุขระและภายในชิ้นงานมีโพรงอากาศ (void) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 14 ส่งผลให้เมื่อนำไปทดสอบชิ้นงานจึงไม่แข็งแรงมากนัก และนอกจากนี้การใช้ชิ้นงานวัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปที่ต่ำ (0-25%) มากเกินไปนั้น ชิ้นงานมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุหลายชนิด (multi component) หรือมีหลากหลายสี ตัวอย่างเช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 50% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบที่เป็นวัสดุพื้นมีระดับการคงรูปเท่ากับ 25% เนื่องจากที่ระดับการคงรูปยาง

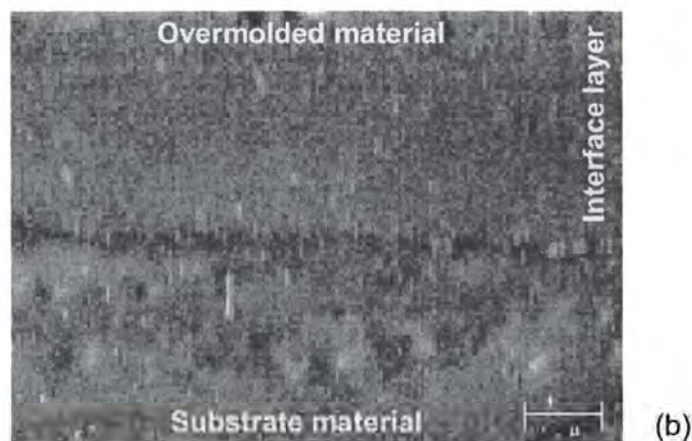
50% ไม่ปรากฏโพรงอากาศภายในชิ้นงานวัสดุพื้น ดังแสดงในภาพที่ 14(b) และชิ้นงานมีผิวภายนอกที่เรียบ ทำให้สามารถแทรกตัวเพื่อสัมผัสกันได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับการคงรูปมากกว่า 50% วัสดุพื้นมีลักษณะเป็นรูปร่างที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด แต่ในกรณีที่ใช้ระดับการคงรูปของวัสดุพื้นเท่ากับ 75% และ 100% พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกลดลง เนื่องจากสมบัตการยึดเกาะที่ลดลงของวัสดุพื้น และความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการแทรกตัวที่บริเวณผิวสัมผัสลดลง ดังแสดงในภาพที่ 15



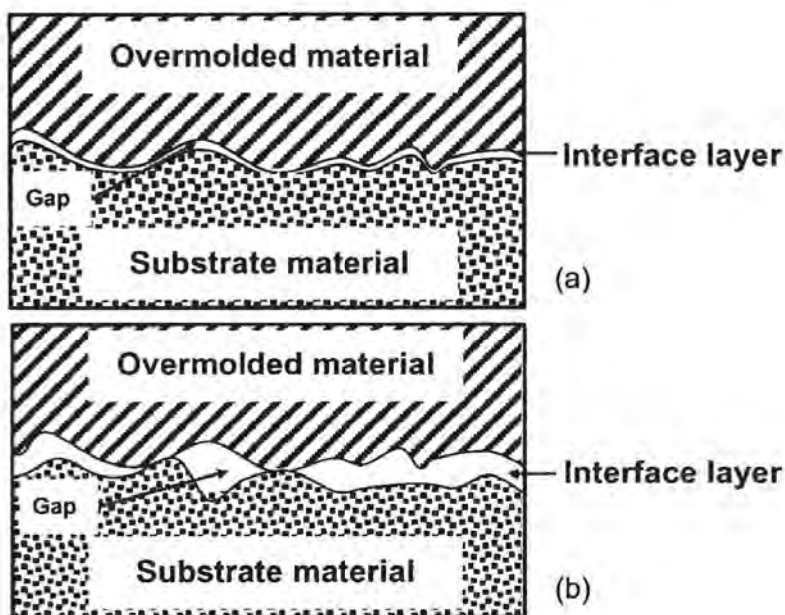
ภาพที่ 13 อิทธิพลของระดับการคงรูปที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



(a)



ภาพที่ 14 ภาคตัดขวางชิ้นงานที่ใช้ระดับการคงรูปต่างกัน
(a) ระดับการคงรูป 25% (b) ระดับการคงรูป 50 75 และ 100%

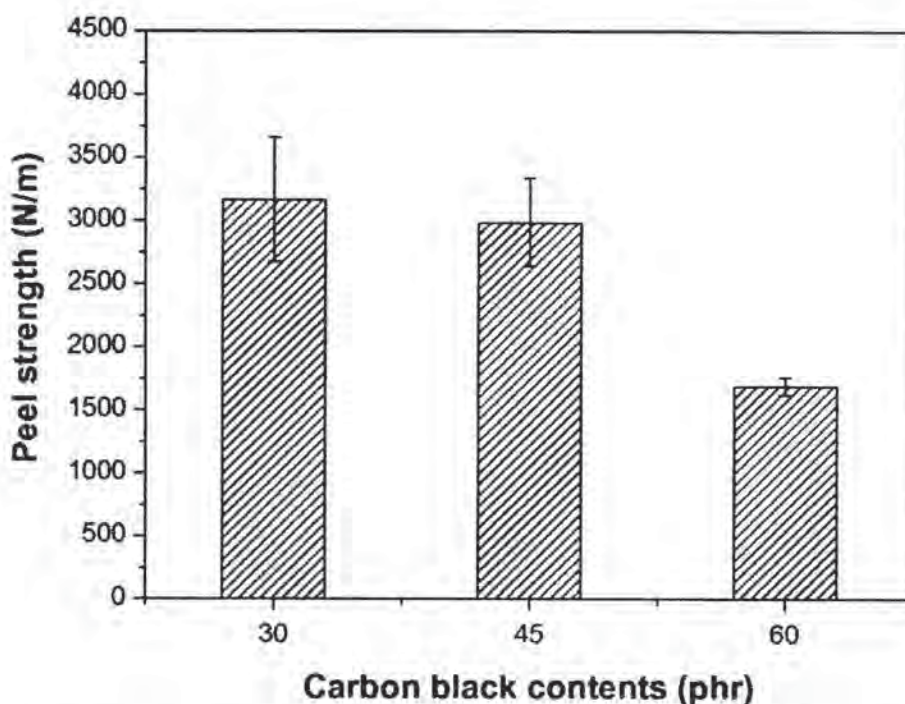


ภาพที่ 15 แบบจำลองกลไกการแทรกตัวที่หน้าสัมผัสในกระบวนการโอเวอร์โมลด์ดิ้ง
(a) ยางความหนืดต่ำ (b) ยางความหนืดสูง

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระดับการคงรูปที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก พบว่า เมื่อวัสดุพื้นมีระดับการคงรูปที่ 50% มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ดิ้ง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำ จึงใช้วัสดุพื้นที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% เช่นเดียวกัน จากผลการศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 16 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกลดลง เมื่อ

เพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางคอมพาวนด์ เนื่องจากเขม่าดำมีอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางสูง ซึ่งส่งผลให้ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุล (chain flexibility) ลดลง จึงแพร่ข้ามระหว่างและเกี่ยวพันกันที่หน้าสัมผัสได้ลดลง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเขม่าทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกตัวเพื่อสัมผัสกันได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่มีความหนืดต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 15 และอาจมีอากาศดักค้างที่บริเวณหน้าสัมผัส เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น อากาศจึงไม่สามารถขับออกได้หมดด้วยแรงดันที่ใช้ในขณะขึ้นรูป



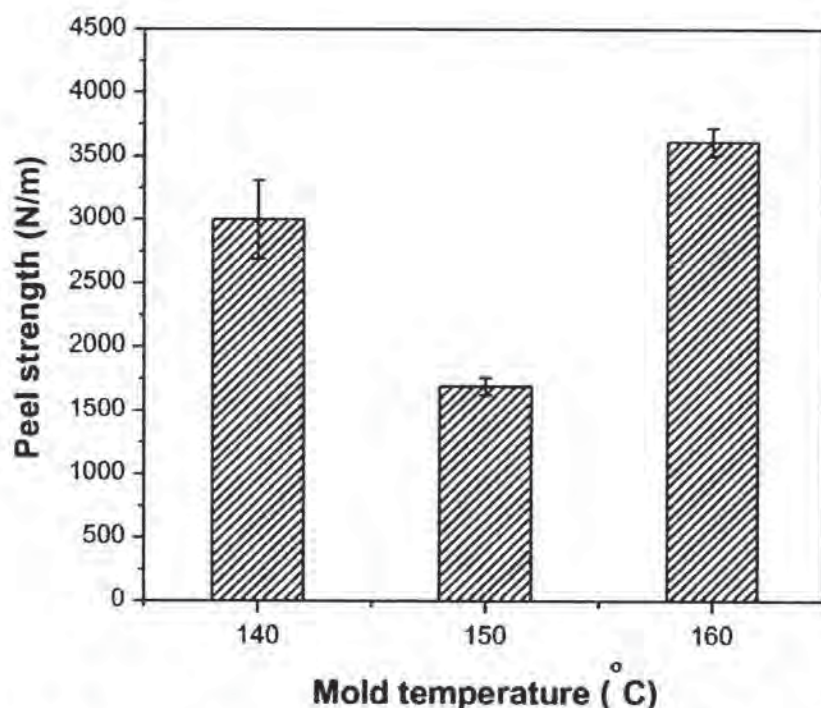
ภาพที่ 16 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

4.3 อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอก

4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์

จากภาพที่ 17 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยาง ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 140°C เป็น 150°C ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 150°C เป็น 160°C ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย คือ เวลาในการสัมผัส (contact time) และอุณหภูมิ (temperature) ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (140°C) ต้องใช้ระยะเวลาขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการรูปที่สมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแพร่ข้ามได้ในระยะความลึก (depth of diffusion) ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในขณะที่การขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (160°C) ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสายโซ่โมเลกุลยางสามารถแพร่ข้าม

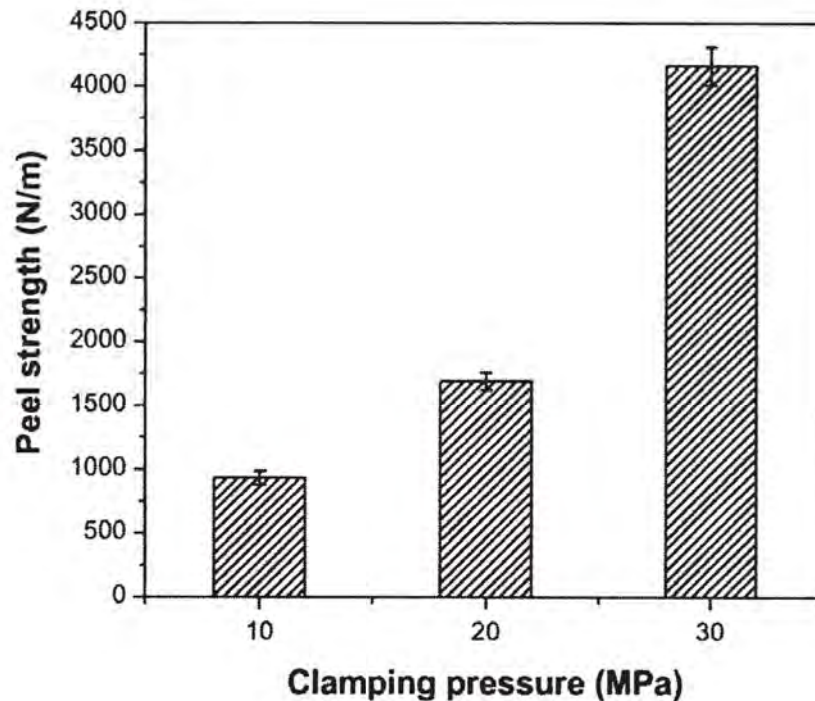
ระหว่างหน้าสัมผัสได้ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลที่แพร่ข้ามเกิดการเชื่อมขวางได้อย่างรวดเร็วและมีความหนาแน่นพันธะที่สูงกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน



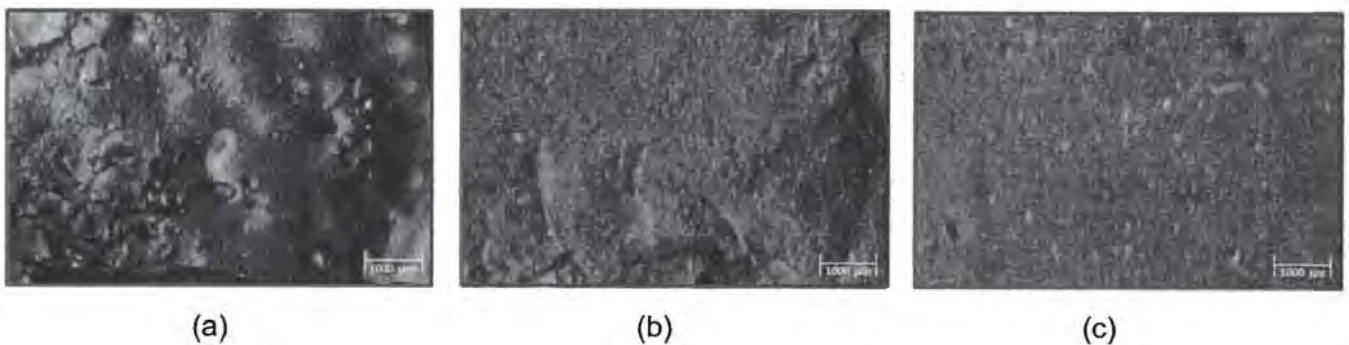
ภาพที่ 17 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

4.3.2 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์

หากพิจารณาอิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ที่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานยังสามารถแทรกสัมผัสกันได้ดี และอากาศที่ตกค้างที่บริเวณหน้าสัมผัสสามารถขับออกได้โดยง่ายเมื่อใช้แรงดันสูง ซึ่งทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการยึดเกาะทางกลที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผิวสัมผัสหลังการดึงลอกของชิ้นงานยากที่ใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบมากขึ้นเมื่อใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 19(a-c) และนอกจากนี้การใช้แรงดันสูงทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถแพร่ข้ามและเกี่ยวพันกันเพิ่มมากขึ้น (Patcharaphun *et al.*, 2011)



ภาพที่ 18 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

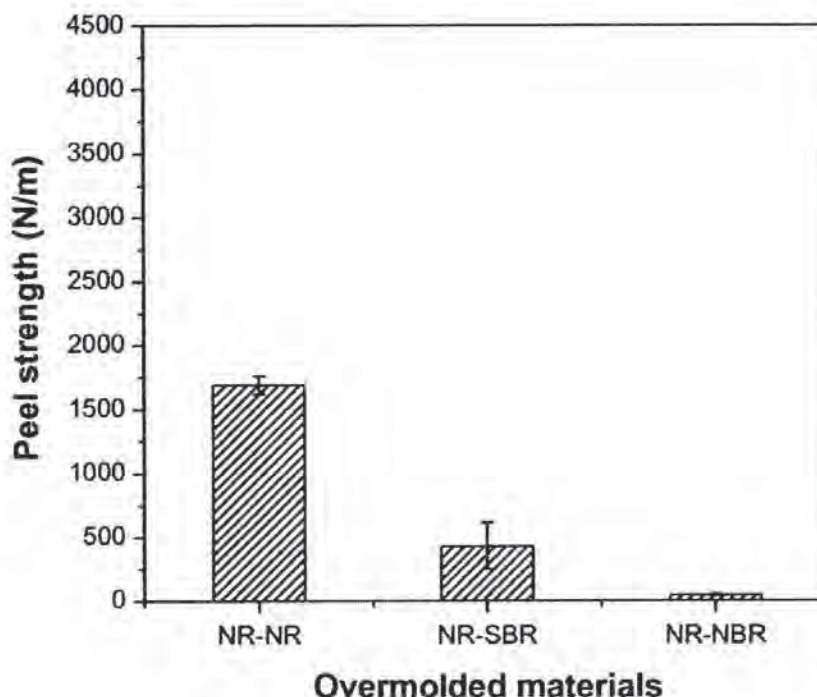


ภาพที่ 19 ผิวของชิ้นงานที่ใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ต่างกัน (a) 10 MPa (b) 20 MPa (c) 30 MPa

4.4 อิทธิพลของชนิดของยางคอมพาวนด์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

ภาพที่ 20 เป็นผลการศึกษาความต้านทานต่อการดึงลอกระหว่างยางธรรมชาติกับธรรมชาติ (NR-NR) และยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ยางธรรมชาติกับยาง SBR (NR-SBR) และยางธรรมชาติกับยาง NBR (NR-NBR) โดยใช้ยางธรรมชาติที่มีระดับการคงรูปเท่ากับ 50% เป็นวัสดุพื้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า คู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติมีความแข็งแรงสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากยางชนิดเดียวกันซึ่งมีความเข้ากันได้ (compatible) ประกอบกับยางธรรมชาติมีสมบัติการยึดติดที่สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับคู่ของยางธรรมชาติกับยาง SBR ซึ่งยางชนิดไม่มีขั้ว (non-polar rubber) เช่นเดียวกัน พบว่า มี

ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกที่ต่ำกว่าคู่ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสมบัติการยึดติดของยาง SBR มีค่าต่ำ (พงษ์ธร, 2550) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคู่ของยางธรรมชาติกับยาง NBR พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกต่ำที่สุด เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางชนิดไม่มีขั้ว (non polar rubber) ในขณะที่ยาง NBR มีความเป็นขั้ว (polar rubber) สูง

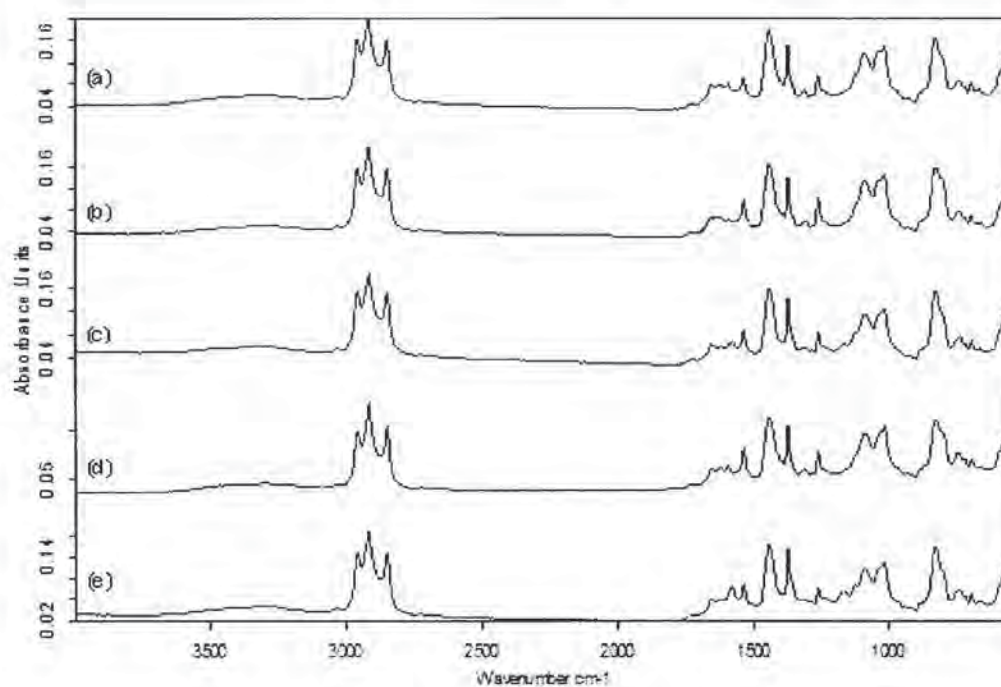


ภาพที่ 20 อิทธิพลของชนิดยางที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก

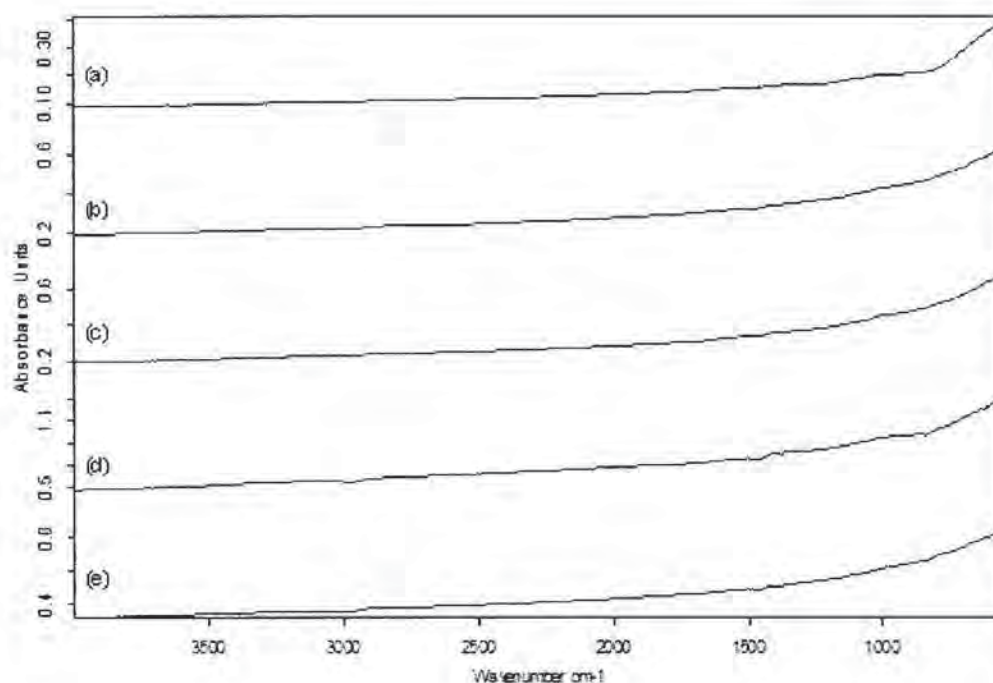
4.5 ผลการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง

4.5.1 เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Irradiation)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุพื้น เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เครื่องมือราคาถูก ไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นกระบวนการแห้ง (dry process) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีสมมติฐาน คือ หากมีการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่พลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนขาดลง ซึ่งช่วยให้วัสดุนั้นสามารถแสดงความเป็นขั้วได้มากขึ้น ซึ่งพบว่า ทั้งยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมเขม่าดำ 60 phr ไม่ปรากฏพีก (peak) ของหมู่ฟังก์ชัน ดังแสดงในภาพที่ 21 และ 22

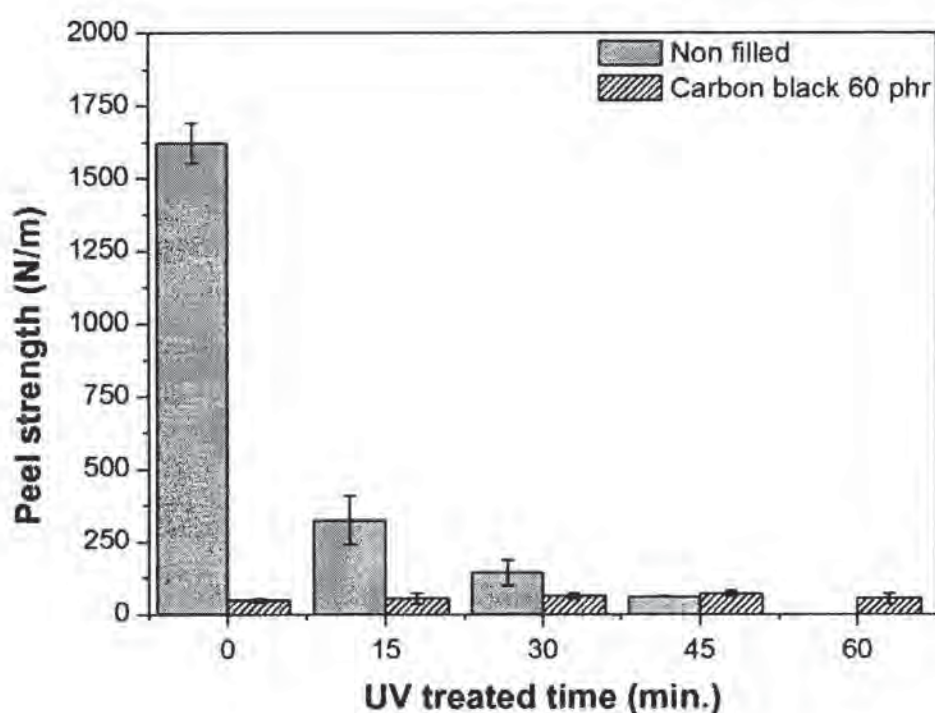


ภาพที่ 21 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเดิม (a) ไม่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (b) ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 15 นาที (c) 30 นาที (d) 45 นาที (e) 60 นาที

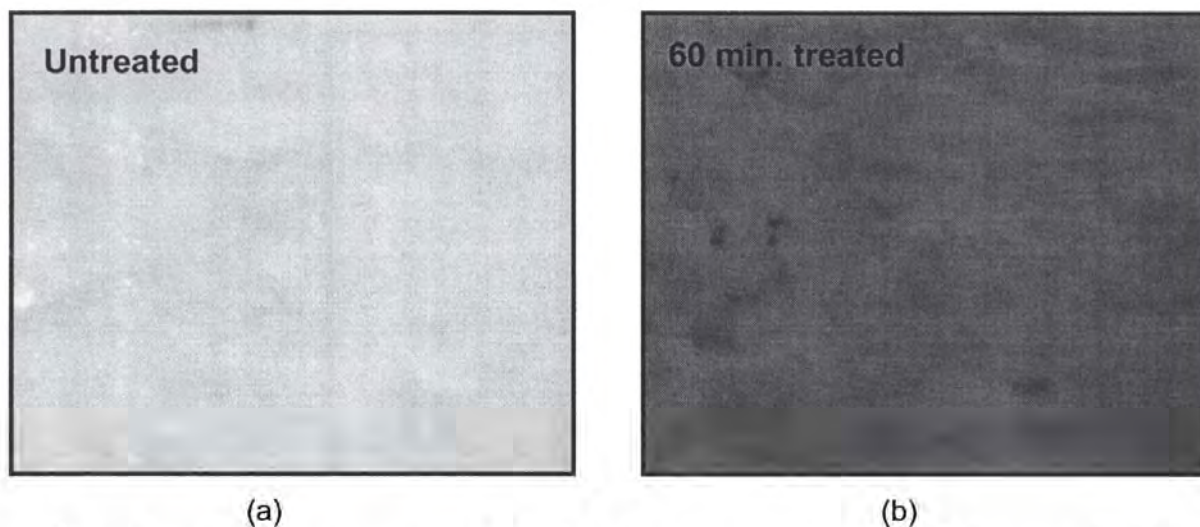


ภาพที่ 22 FTIR สเปกตรัมของยางที่ผสมเขม่าดำ 60 phr (a) ไม่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (b) ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 15 นาที (c) 30 นาที (d) 45 นาที (e) 60 นาที

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการฉายรังสี โดยสามารถอธิบายได้ว่า ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางบางส่วน ที่ผิวหน้าอย่างก่อนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะในห้องฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 60°C เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุลระหว่างหน้าสัมผัสลดลง โดยสามารถสังเกตได้จากสีของยางที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในภาพที่ 24 สำหรับผลการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตบนผิวชิ้นงานยางที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 60 phr ณ เวลาต่างๆ กัน พบว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากเขม่าดำมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต



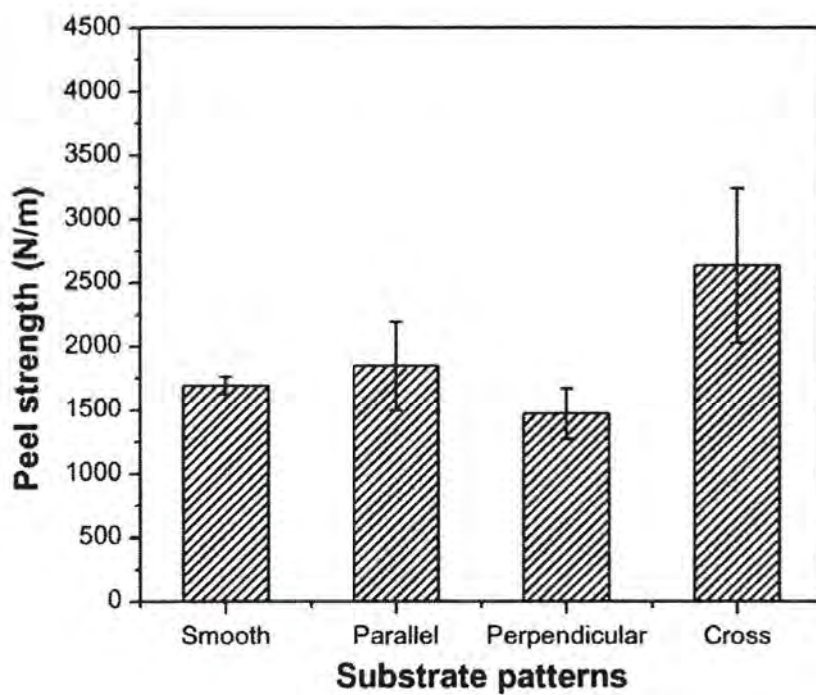
ภาพที่ 23 อิทธิพลของระยะเวลาการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อความต้านทานต่อการดึงลอกของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม และยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ 60 phr



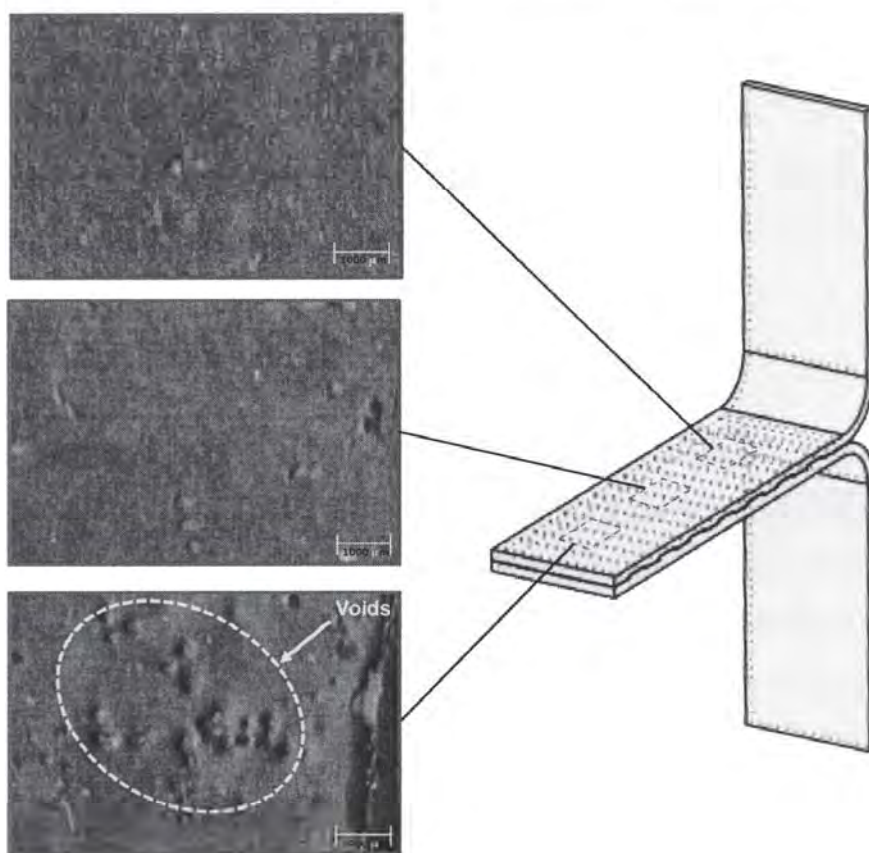
ภาพที่ 24 พื้นผิวก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม
(a) ก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (b) ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 60 นาที

4.5.2 เทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับ

ผู้วิจัยได้ปรับปรุงความแข็งแรงการยึดเกาะของชิ้นงานยาง โดยใช้เทคนิคการเพิ่มพื้นผิวในการยึดเกาะด้วยการออกแบบอินเสิร์ตภายในแม่พิมพ์เพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปวัสดุพื้นให้มีรูปแบบต่างๆ ดังนี้ คือ แผ่นลอนทิศทางขนานการไหล แผ่นลอนทิศทางขวางการไหล และแผ่นลอนแบบตาราง โดยกำหนดให้วัสดุซ้อนทับไหลเป็นระยะทาง 11 mm ผ่านลอนรูปแบบต่างๆ ที่ออกแบบไว้ แล้วเปรียบเทียบวัสดุพื้นที่ใช้อินเสิร์ตแผ่นเรียบ จากผลการทดสอบในภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่ยึดเกาะตามแนวทิศทางขนานการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ในการสัมผัสกันของยางพื้นสูงขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานยางที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสโดยใช้อินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางขวางการไหล พบว่า มีความแข็งแรงลดลง ทั้งที่มีพื้นที่สัมผัสเท่ากับชิ้นงานที่ใช้อินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางขนานการไหล เนื่องจากการไหลผ่านสิ่งกีดขวางใช้ระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น และยางคอมพาวนด์ไหลได้ยากยิ่งขึ้น ส่งผลให้อาจมีการเชื่อมขวางบางส่วนก่อนการไหลเต็มแม่พิมพ์ และอาจมีอากาศที่บริเวณขอบมุมของร่องผสมเข้ากับเนื้อยางในระหว่างการไหล ส่งผลให้ที่บริเวณส่วนสุดท้ายของระยะการไหลเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 26 เป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้แผ่นลอนแบบตารางพบว่า ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการสัมผัสเพิ่มขึ้น อีกทั้งยางคอมพาวนด์สามารถไหลได้ดี ซึ่งไม่ปรากฏโพรงอากาศในส่วนสุดท้ายของชิ้นงาน



ภาพที่ 25 อิทธิพลของการปรับปรุงพื้นผิวที่มีผลต่อความต้านทานต่อการดึงลอก



ภาพที่ 26 ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานที่ใช้อินเสิร์ตแผ่นลอนทิศทางขวางการไหล

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมเขม่าดำที่ปริมาณ 30-60 phr ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ซึ่งใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพื้น และใช้ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR เป็นวัสดุซ้อนทับ โดยศึกษาถึงปัจจัยจากยางคอมพาวนด์ (ระดับการคงรูป ปริมาณสารตัวเติม) ปัจจัยในกระบวนการผลิต (อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันปิดแม่พิมพ์) และนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับการคงรูปและปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นในยางคอมพาวนด์ ทำให้ความต้านทานต่อการดึงลอกมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิต พบว่า แรงดันปิดแม่พิมพ์ เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานยางมีสมบัติความต้านทานต่อการดึงลอกที่ดีขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการคงรูปควบคู่กัน ซึ่งผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เวลาสัมผัส และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีค่าความต้านทานต่อการดึงลอกเพิ่มขึ้น และผลจากการนำยางสังเคราะห์ ได้แก่ ยาง SBR และยาง NBR มาโอเวอร์โมลด์กับยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกของชิ้นงานขึ้นอยู่กับสมบัติการยึดติดกัน และสมบัติความเข้ากันได้ของวัสดุ และนอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะของชิ้นงานยาง ด้วยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนวัสดุพื้น (ยางธรรมชาติ) แล้วโอเวอร์โมลด์กับยาง NBR พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตที่มีพลังงานและความร้อนสูง ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการคงรูปบางส่วน ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการดึงลอกมีค่าลดลง และผลจากพัฒนาสมบัติการยึดเกาะทางกล โดยการสร้างรูปแบบต่างๆ บนวัสดุพื้น แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้นเมื่อพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีประกอบด้วยยางมากกว่าหนึ่งชนิด โดยเน้นไปที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสวยงามและความแข็งแรงของชิ้นงานที่ดี สามารถนำผลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้ โดยมีสิ่งที่ควรพิจารณา คือ ระดับการคงรูปที่มีความเหมาะสมที่ชิ้นงานยังคงมีลักษณะเป็นรูปร่างที่ต้องการ หลังจากผ่านกระบวนการโอเวอร์โมลด์ (ไม่เกิดการไหลปนกันของยางแต่ละสี) ซึ่งพบว่า ระดับการคงรูปที่ 50% มีความเหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูป และหากชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมีปัญหาด้านความแข็งแรงในการยึดเกาะสามารถปัญหาได้สองแนวทาง คือ ด้านยางคอมพาวนด์ แก้ไขโดยการลดปริมาณสารตัวเติม และด้านกระบวนการผลิต แก้ไขได้โดยการเพิ่มเวลาในการคงรูป และ/หรือเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ สำหรับผลของการใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตกับวัสดุยางในงานวิจัยนี้ พบว่า ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับการยึดเกาะระหว่างยางสองชนิดได้ และนอกจากนี้ในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ประกอบด้วยยางมากกว่าหนึ่งชนิด หากมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุซ้อนทับจะช่วยให้

ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา คือ ทิศทางการไหลและระยะทางในการไหลของยาง ซึ่งหากเป็นกรณีรูปแบบที่สร้างขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการไหลหรือขัดขวางการไหลของยาง ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีสมบัติการยึดเกาะลดลง

นอกจากนี้ควรมีการศึกษากลไกการยึดเกาะทั้งกายภาพ (physically bonded) และการยึดเกาะทางเคมี (chemically bonded) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันในขณะที่ยื่นรูป ซึ่งความรู้ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมและกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตได้ง่ายยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ASTM D1646. **Standard Test Methods for Rubber—Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer).**
- ASTM D5289. **Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters.**
- ASTM D413. **Standard Test Methods for Rubber Property—Adhesion to Flexible Substrate.**
- ASTM G154. **Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.**
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2550. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), ปทุมธานี.
- Clearfield, H. M., McNamara, D.K., and Davis, G.D. 1991. **Adhered Surface Preparation for Structural Adhesive Bonding.** Plenum Press, New York.
- Hofmann, W. 1989. **Rubber Technology Handbook.** Hanser Publishers, Munich Vienna, New York, United State.
- Kinloch, A.J. 1990. **Adhesion and Adhesives: Science and Technology.** Chapman and Hall, London.
- Lee, L. H. 1991. **Adhesive Bonding.** Plenum Press, New York.
- Packham, D.E. 2005. **Handbook of Adhesion.** John Wiley & Sons, New York.
- Patcharaphun, 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.

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.

ภาคผนวก: ร่างโปสเตอร์

การศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์

Investigation and Improvement on Bond Strength of Compression

Overmolded Rubber Parts

ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์

(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

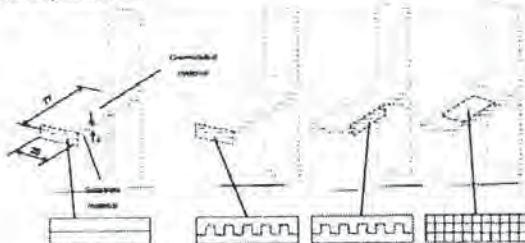


บทนำ

ผลิตภัณฑ์ยาง เช่น ท่อยาง ล้อรถยนต์ ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น มักประกอบด้วยวัสดุยางมากกว่าหนึ่งชนิด เนื่องจากต้องการสมบัติที่ต่างกัน เช่น ความแข็งแรงทนทาน ความยืดหยุ่น โดยผลิตภัณฑ์ยางที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด นิยมขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ ซึ่งไม่ใช่วิธีการขึ้นรูปวัสดุพื้น (molded material) จากนั้นจึงนำวัสดุชั้นบน (overmolded material) มาอัดขึ้นรูปทับวัสดุชั้นล่าง (molded material) จากงานวิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตด้วยวิธีนี้ มักมีปัญหาการยึดเกาะระหว่างวัสดุชั้นบนและชั้นล่าง ซึ่งอาจเกิดจากการที่วัสดุชั้นบนและชั้นล่างมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน (incompatibility) การขาดความเข้ากันได้ทางเคมี (compatibility) การขาดความเข้ากันได้ทางกายภาพ (physical compatibility) การขาดความเข้ากันได้ทางเคมี-กายภาพ (chemo-physical compatibility) เป็นต้น การขาดความเข้ากันได้เหล่านี้ อาจทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุชั้นบนออกจากวัสดุชั้นล่างได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางได้ การศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและปลอดภัย

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จำเป็นต้องมีการเตรียมวัสดุชั้นบนและชั้นล่างให้เหมาะสมก่อนการอัดขึ้นรูป โดยวัสดุชั้นบน (overmolded material) จะใช้ยางชนิดที่ 1 (ยางธรรมชาติ) และวัสดุชั้นล่าง (molded material) จะใช้ยางชนิดที่ 2 (ยางสังเคราะห์) การเตรียมวัสดุชั้นบนและชั้นล่างจะดำเนินการดังนี้

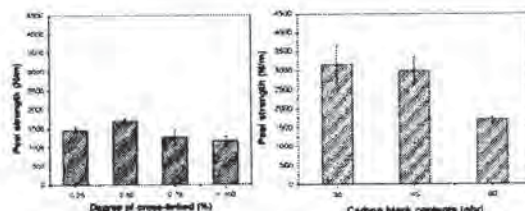


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุชั้นบนและชั้นล่างสำหรับการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ (a) การเตรียมแม่พิมพ์ (b) การฉีดวัสดุชั้นบน (c) การฉีดวัสดุชั้นล่าง (d) การอัดขึ้นรูป (e) การถอดแม่พิมพ์

ผลและการอภิปรายผล

อิทธิพลของอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ

จากการวิจัยพบว่า อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปมีผลต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปที่สูงขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุยางได้ การศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและปลอดภัย

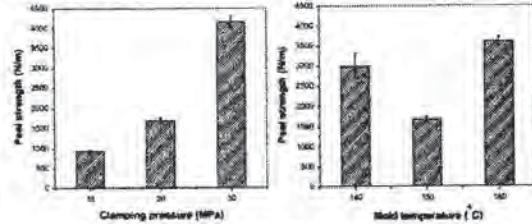


ภาพที่ 2 อิทธิพลของอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปและปริมาณคาร์บอนดำต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ (a) ระดับการอัดขึ้นรูป (b) ปริมาณคาร์บอนดำ

อิทธิพลของอัตราส่วนการผสมยางต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนการผสมยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จะพบว่า อัตราส่วนการผสมยางมีผลต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยอัตราส่วนการผสมยางที่สูงขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนการผสมยางที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุยางได้ การศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและปลอดภัย

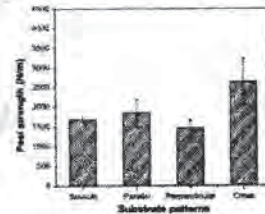
งานวิจัยและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการอัดขึ้นรูป ปริมาณคาร์บอนดำ และอัตราส่วนการผสมยาง



ภาพที่ 3 อิทธิพลของแรงดันการอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ (a) แรงดันอัดขึ้นรูป (b) อุณหภูมิแม่พิมพ์

การปรับปรุงสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยาง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เพื่อศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการอัดขึ้นรูป ปริมาณคาร์บอนดำ และอัตราส่วนการผสมยาง การปรับปรุงสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จะดำเนินการดังนี้



ภาพที่ 4 อิทธิพลของรูปแบบพื้นผิวของวัสดุชั้นบนที่มีต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการอัดขึ้นรูป ปริมาณคาร์บอนดำ และอัตราส่วนการผสมยาง การปรับปรุงสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จะดำเนินการดังนี้

เอกสารอ้างอิง

- Kriech, A.J. 1990. *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Chapman & Hall, London.
- Packham, D.E. 2005. *Handbook of Adhesion*. John Wiley & Sons, New York.
- Pacharaphan, S., W. Chokkew, T. Tongpradit, and N. Na-Rangin. 2011. Effects of fill contents and processing parameters on the weldline strength of compression molded natural rubber. *Polymer Engineering and Science* 51: 2355-2359.

คำขอขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เพื่อศึกษาและพัฒนาสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการอัดขึ้นรูป ปริมาณคาร์บอนดำ และอัตราส่วนการผสมยาง การปรับปรุงสมมติการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบโอเวอร์โมลด์ จะดำเนินการดังนี้