

สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนจากพอลิไซลอกเซน-กร๊าฟ-ยางธรรมชาติเหลวตัดแปร

ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์* และสุพรรณิ ขันทะเลเสน

Polyurethane Coating from Polysiloxane-Graft- Modified Liquid Natural Rubber

Chor.Wayakron Phetphaisit* and Suphannee Kunthasen

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

*Corresponding author. E-mail: chorwayakronp@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้พอลิไซลอกเซน-กร๊าฟ-ยางธรรมชาติเหลวตัดแปร (PDMS-g-LENR) เป็นสารเคลือบผิว โดยการทำปฏิกิริยาของหมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างของกร๊าฟโคพอลิเมอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับหมู่ไดไอโซไซยานาตของ 1,6-ไดไอโซไซยานาโทเฮกเซน (HDI) ในระบบที่ปราศจากตัวทำละลาย และทำการเคลือบลงบนแผ่นเหล็กและแผ่นดีบุก สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของสารเคลือบผิว เช่น ความแข็ง การยึดติด การทนแรงกระแทก การโค้งงอ และความต้านทานต่อสารเคมี พบว่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยานาตของ HDI เพิ่มขึ้น และสารเคลือบผิวที่เตรียมจาก PDMS-g-LENR ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานาต พบว่าให้ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของสารเคลือบผิวดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไดไอโซไซยานาตเท่ากับ 1:0.75 โดยมีค่าผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ ยกเว้นเพียง การทดสอบด้านความแข็ง

คำสำคัญ: กร๊าฟโคพอลิเมอร์ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ยางธรรมชาติ การเคลือบผิว

Abstract

This research studied the application of polysiloxane-graft-modified liquid natural rubber (PDMS-g-LENR) used as a coating material. The reaction of hydroxyl on the graft copolymer and hydroxyl of polydimethylsiloxane (PDMS) with 1,6-diisocyanatohexane (HDI) was carried out in the free-solvent system. The materials were coated on steel and tin sheet substrates. The mechanical and physical properties of coated film i.e. hardness, adhesion, impact strength, bending and chemical resistance increased with mole ratios of isocyanate group of HDI. The mechanical and physical tests of coated film prepared from the reaction of PDMS-g-LENR with diisocyanate found that the optimum result of this coating material is the mole ratio of hydroxyl group to 1:0.75. This result satisfied the requirement of the industries standard for the coating material of automobile industry except the result of hardness test.

Keywords: graft copolymer, polydimethylsiloxane, natural rubber, coating

บทนำ

การประยุกต์ใช้งานของสารเคลือบผิวนั้น สารเคลือบผิวจำเป็นต้องทนต่อการกระแทก ทนต่อการขีดขีด มีความแข็ง และทนต่อมลภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี ซึ่งถ้าหากสารเคลือบผิวมีสมบัติพิเศษ นอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้น จะยิ่งทำให้สารเคลือบผิวมีความน่าสนใจในการใช้งานเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสมบัติของสารเคลือบผิวอย่างต่อเนื่อง และในปัจจุบันสารเคลือบผิวที่มีซิลิโคนเป็นส่วนผสมกำลังเป็นที่นิยมในท้องตลาด ทั้งนี้เนื่องจากซิลิโคนมีพื้นผิวลื่น (Surface release properties) ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ต่ำมาก ประมาณ -127°C จึงช่วยทำให้ลดการเกาะติดของสิ่งสกปรก และมีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้พอลิไซลอกเซนมีความทนต่อสภาพอากาศ โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการใช้ซิลิโคนเป็นสารเคลือบผิวชิ้นงานโดยตรง เนื่องจากซิลิโคนมีราคาแพง และยังมีข้อจำกัดของสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ทนต่อแรงกระแทก และทนต่อการขีดขีดได้ไม่ดี เป็นต้น (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548; Rutnakomputik *et al.*, 2006) จึงทำให้การใช้งานของพอลิไซลอกเซนถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้งานชนิดอื่นได้ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง เนื่องจากการนำไซลอกเซนไปใช้งานทำให้มีต้นทุนสูงขึ้น ในขณะที่ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทานต่อแรงดึงดี มีสมบัติด้านการเหนียวติดกันที่ดี มีความทนต่อการฉีกขาด และทนทานต่อการขีดขีดสูง (พงษ์ธร แซ่ฮุย,

2548) ทั้งมีพันธะคู่จำนวนมากในโครงสร้างจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถถูกดัดแปรโครงสร้างได้ง่าย ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่สนใจลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติเพื่อการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ เช่น การทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ทนต่อตัวทำละลายมีขั้วได้มากขึ้น หรือการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นพลาสติกให้กับยางธรรมชาติ หรือการทำปฏิกิริยาลดน้ำหนักโมเลกุล เพื่อประยุกต์ใช้งานที่ต้องการยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารยึดติด หรือสารเคลือบผิว (Klinklai *et al.*, 2003; Phinyocheep *et al.*, 2005)

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมกราฟโคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติเหลวอีพอกไซด์ (LENR) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (OHTPDMS) เพื่อดัดแปรเป็นสารเคลือบผิว โดยหมู่ไฮดรอกซิลของกราฟโคพอลิเมอร์ (PDMS-g-LENR) และของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (OHTPDMS) ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกราฟโคพอลิเมอร์เรซิน ทำปฏิกิริยากับหมู่ไดไอโซไซยานาตของ 1,6-ไดไอโซไซยานาโตเฮกเซน ได้พอลิยูรีเทน: diisocyanate group equal เป็นสารเคลือบผิว ซึ่งพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ตัวหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ และเรือเดินทะเล เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ทนต่อการขีดข่วน ทนต่อการฉีกขาด ทนต่อการสึกกร่อน ทนสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนความร้อน และมีความแข็งแรงสูง (Park and Lee, 2001; Stanciu *et al.*, 1999; Bayer Material Science, 2005)

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

กราฟโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และยางธรรมชาติเหลวอีพอกไซด์ ที่ใช้ในการทดลอง (PDMS-g-LENR) เตรียมจากยางธรรมชาติเหลวอีพอกไซด์ (LENR) ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงความหนืด (\bar{M}_v) เท่ากับ 17.5% และ 13,000 g/mol (1 mole of epoxide, 1g) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งปลาย (OHTPDMS) ที่มี $\bar{M}_n = 12,000$ g/mol (1 mole of hydroxyl, 0.1g) เตรียมโดยห้องวิจัยเรื่องยางพารา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยกราฟโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะมี 2 แบบ ดังนี้ แบบที่ 1 PDMS-g-LENR ที่มีปริมาณ PDMS บนโครงสร้างของยางเหลวดัดแปร 2.9% เมื่อเทียบกับหน่วยซ้ำทั้งหมดในโครงสร้างของไอโซพรีน (PDMS-g-LENR, purified) และแบบที่ 2 PDMS-g-LENR ที่มีปริมาณ PDMS บนโครงสร้างของยางเหลวดัดแปร 2.9% และ OHTPDMS ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา 12.6% เมื่อเทียบกับหน่วยซ้ำทั้งหมดในโครงสร้างของไอโซพรีน (PDMS-g-LENR, without purified) และสารเคมีอื่น ได้แก่ 1,6-ไดไอโซไซยานาโตเฮกเซน (HDI) ชนิด 99% จาก Acros ไดบิวทิลทินไดออกไซด์ จาก Aldrich สารละลายเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ชนิด 99% จาก J.T. Brecker แผ่นเหล็ก ขนาด 7x15 cm² และแผ่นดีบุก ขนาด 5x15 cm² จากบริษัทจากรูกรโลหะการ

การเตรียมโพลีเมอร์ร่วมระหว่าง PDMS-g-LENR กับ ไดไอโซไซยานาต

ผสม PDMS-g-LENR, purified และ PDMS-g-LENR, without purified ร่วมกับ 1,6-ไดไอโซไซยานาโตเฮกเซน (HDI) ในอัตราส่วนที่กำหนด (ดังตาราง 1) กวนสารผสมทั้งหมดให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินไดออกไซด์ลงไป กวนสารทั้งหมดให้เข้ากันประมาณ 1 นาที (ไม่ใช่ตัวทำละลาย) เทสารผสมประมาณ 0.5 g ลงบนแผ่นโลหะที่ต้องการทดสอบ (แผ่นเหล็ก และแผ่นดีบุก) ซึ่งแผ่นโลหะดังกล่าวมีเทปใสปิดโดยรอบเพื่อเป็นตัวควบคุมความหนาของฟิล์ม (แผ่นเทปใสมีความหนา 50 μm) จากนั้นใช้แท่งแก้วกลมลากสารจากด้านบนของแผ่นทดสอบลงมาจนสุดแผ่นทดสอบ อบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตาราง 1 สูตรการเตรียมสารเคลือบผิวสำหรับทดสอบการเคลือบผิวบนแผ่นโลหะเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% โดยน้ำหนักของ HDI

Sample	PDMS-g-LENR		HDI (mole of N=C=O)
	(mole of OH)		
	purified	without purified	
a	1	-	-
b	-	1	-
c	1	-	0.5
d	-	1	0.5
e	-	1	0.25
f	-	1	0.75
g	-	1	1

การวิเคราะห์และการทดสอบ

1. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี โดยเทคนิค IR spectroscopy

โครงสร้างทางเคมีของ PDMS-g-LENR ที่ทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานาต ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-IR Spectroscopy ด้วยเครื่อง Spectrum GX Series ของบริษัท Perkin Elmer โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดตามซิงค์ไซยาไนด์คริสตัล วิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น 4000-600 cm^{-1}

2. การทดสอบสมบัติเชิงกล และทางกายภาพของสารเคลือบผิว

ทดสอบสมบัติเชิงกล และทางกายภาพของสารเคลือบผิวที่ทำการเคลือบบนแผ่นเหล็ก และแผ่นดีบุก ตามมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ ดังนี้

2.1 การหาความหนาของฟิล์มแห้ง (Film thickness)

ทดสอบด้วยเครื่องมือไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ซึ่งวัดโดยวางหัววัด (Probe) ของเครื่องมือลงบนแผ่นทดสอบดีบุกที่เคลือบฟิล์ม อ่านค่าความหนาที่ได้ ทดสอบเช่นนี้ 3 จุด ที่ตำแหน่งต่างๆ กันของแผ่นทดสอบ

2.2 การทดสอบความเงาของฟิล์ม (Gloss)

ทดสอบโดยเครื่อง Glossmeter ที่มุม 60° ซึ่งวัดโดยวางหัววัดบนแผ่นทดสอบ อ่านค่าความเงาที่วัดได้

2.3 การทดสอบความแข็งของฟิล์ม (Hardness)

ทดสอบกับฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก โดยเครื่อง Pencil Hardness ของ Yasuda Seiki Seisakusho Ltd. ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้ดินสอด (Pencil hardness test) ที่มีความแข็งต่างๆ กัน (ความแข็งของดินสอดจะเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ $6H > 5H > 4H > 3H > 2H > H > F > HB > B > 2B > 3B > 4B > 5B > 6B$) กดลงบนฟิล์ม โดยทำมุม 45° กับแผ่นทดสอบ และใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนัก 2 kg เป็นแรงที่ใช้กดดินสอดลงบนแผ่นฟิล์ม รายงานผลเป็นเบอร์ของดินสอดที่มีค่าความแข็งสูงสุดที่ไม่ทำให้ฟิล์มแตกในระหว่างที่กดลงบนผิวฟิล์ม โดยจะถือว่าฟิล์มดังกล่าวมีความแข็งเท่ากับค่าความแข็งของดินสอดเบอร์นั้น

2.4 การทดสอบการยึดเกาะของฟิล์ม (Adhesion)

ทดสอบกับฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก โดยทำการทดสอบด้วยกัน 2 แบบ คือ

ก. แบบ Cross-cut

ทดสอบโดยเครื่อง Cross cut tester รุ่น 315 ของ Taiyu Kizai Co. Ltd. โดยใช้มีดกรีดแผ่นฟิล์มให้เป็นช่อง 100 ช่อง แต่ละช่องมีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ จากนั้นทำการตีเคาะตามมาตรฐานที่ใช้สำหรับทดสอบการยึดเกาะลงบนรอยกรีด ดึงเทปกาวออก ดูว่ามีชิ้นงานติดเทปกาวออกมาหรือไม่ ตรวจสอบตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด โดยการรายงานแบบ xxx/100 เช่น 100/100 หมายถึงไม่มีแผ่นฟิล์มหลุดออกมาเลย 85/100 หมายถึงมีแผ่นฟิล์มหลุดออกมาจากการทดสอบ 15 ช่อง จากจำนวนช่องเริ่มต้น 100 ช่อง

ข. แบบ Scratch-adhesion

ทดสอบโดยเครื่องมือ Scratch tester รุ่น 820085 ของ Ueshima Seisakusho Ltd. โดยจะมีเหล็กปลายแหลมกดลงบนแผ่นฟิล์มให้เป็นลักษณะวงกลมต่อกัน โดยมีลูกตุ้มขนาด 1 kg ใช้เป็นแรงกด ทำการตีเทปกาวยาตราฐานที่ใช้สำหรับทดสอบ Adhesion ลงบนรอยขีด ดังเทปกาวยาออก จากนั้นคว่ำมีชิ้นงานตีเทปกาวยาออกมาหรือไม่ ตรวจสอบตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด รายงานผลเป็นสัญลักษณ์ ดังนี้ ⊖ หมายถึงไม่มีสิ่งใดหลุดออกมาเลย และ ○ หมายถึงมีแผ่นฟิล์มหลุดออกตามขอบของรอยขีด

2.5 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของฟิล์ม (Impact Test)

ทดสอบกับฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก โดยใช้เครื่อง Dupont Impact tester ของ Ueshima Seisakusho Ltd. โดยมีตุ้มน้ำหนัก 0.5 kg ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในระยะทาง 50 cm ทำการทดสอบโดยนำแผ่นทดสอบยึดที่ฐานของเครื่องมือ จากนั้นตั้งระยะทางระหว่างลูกตุ้มและแผ่นทดสอบในระยะต่างๆ กัน ทำการปล่อยลูกตุ้มลงมาให้กระทบกับแผ่นทดสอบอย่างรวดเร็ว โดยเริ่มจากระยะทางต่ำที่สุด แล้วจึงเพิ่มระยะทางไปเรื่อยๆ จนได้ระยะทางสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มเสียหาย เช่นการแตกหรือการหลุดลอก รายงานผลเป็นระยะทางที่ไม่ทำให้ฟิล์มเสียหาย มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) โดยมาตรฐานของโรงงานต้องมากกว่า 50 cm คือทำการทดสอบที่ความสูง 50 cm แล้วฟิล์มไม่เกิดความเสียหาย

2.6 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้งของฟิล์ม

เพื่อดูความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม จะทำการทดสอบด้วยกัน 2 แบบ คือ

ก. การทดสอบแบบ Erichsen

ทดสอบโดยเครื่องมือที่มีแท่งเหล็กปลายมนกดลงบนแผ่นฟิล์ม กดแท่งเหล็กไปจนกว่าแผ่นฟิล์มจะเกิดรอยแตก อ่านค่าโดยการวัดระยะทางของแท่งเหล็กจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้ายที่ฟิล์มแตก โดยค่าระยะที่อ่านได้หากมีค่ามากจะหมายถึงฟิล์มมีความยืดหยุ่นที่ดี

ข. การทดสอบแบบ Bending

ทดสอบโดยการดัดแผ่นทดสอบดิบๆ ที่มีฟิล์มเคลือบอยู่รอบแกนทรงกระบอก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกระบอกตั้งแต่ 2-10 mm เริ่มดัดแผ่นทดสอบโดยใช้แกนกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกระบอกลงไปเรื่อยๆ จนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางที่แผ่นทดสอบมีรอยร้าวหรือแตกบนฟิล์มเกิดขึ้น รายงานผลว่าฟิล์มไม่แตกร้าวที่ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางใด ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฟิล์มเกิดตำหนิ

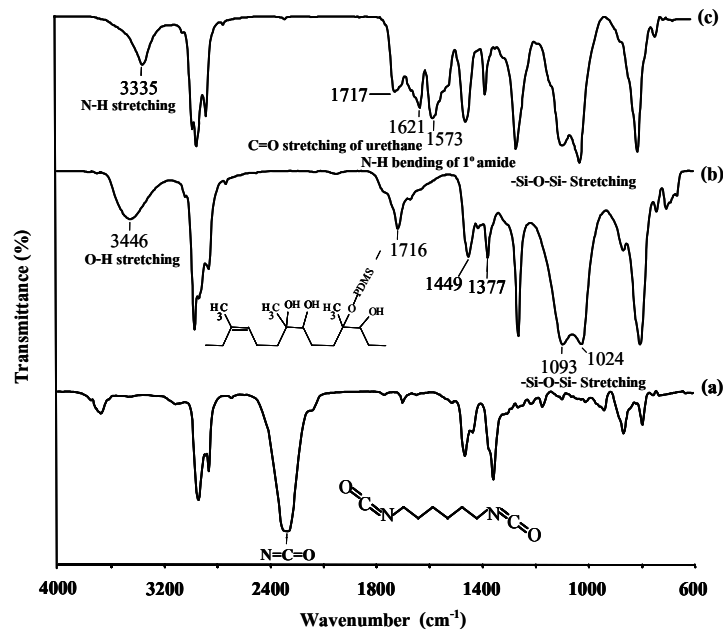
2.7 การทดสอบความทนต่อสารเคมี (Chemical resistance)

ทดสอบโดยใช้วิธี Spot test ซึ่งทดสอบโดยการนำสารละลายต่าง (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5%w/w, NaOH) หรือสารละลายกรด (สารละลายกรดซัลฟูริก 5%w/w, H₂SO₄) บรรจุลงขวดที่มีปากขวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm นำขวดที่บรรจุสารละลายคว่ำลงบนแผ่นทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทดสอบ มาทำความสะอาดด้วยผ้า ตรวจสอบความเงาและการยึดเกาะของแผ่นฟิล์ม โดยเปรียบเทียบกับบริเวณรอบข้างของฟิล์มที่ไม่ได้ทำการทดสอบ รายงานผลเป็นสัญลักษณ์ตามมาตรฐานโรงงานกำหนด เช่น ⊖ หมายถึงไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลง ยังคงมีความเงา และการยึดเกาะเช่นเดียวกับบริเวณที่ไม่ทำการทดสอบ

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวในงานวิจัยนี้เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของหมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างของ กราฟโคพอลิเมอร์ (PDMS-g-LENR) และหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งปลายของ OHTPDMS ที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ในกรณี PDMS-g-LENR, without purified) กับหมู่ไอโซไซยานเตของ HDI ในการเตรียมเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทนสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิว โดยมีโคบิวทิลทินไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รูป 1 แสดง ATR-IR Spectroscopy ของสารตั้งต้น HDI และกราฟโคพอลิเมอร์ที่มี OHTPDMS ที่ไม่ทำปฏิกิริยา (PDMS-g-LENR, without purified) และสารผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง HDI กับ PDMS-g-LENR without purified ในอัตราส่วนโดยโมลของ [OH ของ PDMS-g-LENR และ OH ของ OHTPDMS] : [N=C=O ของ HDI] = 1:0.75 โดย ATR-IR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทน (รูป 1 (c)) ไม่ปรากฏสัญญาณที่แสดงถึงหมู่ไอโซไซยานเตของสารตั้งต้น HDI ที่ตำแหน่ง 2265 cm⁻¹ และหมู่ไฮดรอกซิลของยางธรรมชาติเหลวคัดแปรพอลิเอทที่ตำแหน่ง 3446 cm⁻¹ โดยพบตำแหน่งการสั่นยืดของหมู่เอไมด์ (N-H stretching (hydrogen bonded)) ที่ตำแหน่ง 3335 cm⁻¹ และการเกิดขึ้นใหม่ของสัญญาณที่แสดงถึงการเชื่อมโยงแบบยูรีเทนที่ตำแหน่ง 1621 cm⁻¹ (C=O stretching; hydrogen bonded urea carbonyl) และ 1573 cm⁻¹ (N-H bending in plane ของ 1° amide) ตามลำดับ



รูป 1 ATR-IR spectra ของ (a) 1,6-ไดไอโซไซยานาโตเฮกเซน (HDI) (b) กร๊าฟโคพอลิเมอร์ (PDMS- g- LENR without purified) (c) พอลิยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PDMS- g-LENR without purified และ 1,6-ไดไอโซไซยานาโตเฮกเซน

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของสารเคลือบผิว

1. ผลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (OHTPDMS) ที่ตกค้าง

ในการประยุกต์ใช้ PDMS-g-LENR เป็นสารเคลือบผิวมี 2 ลักษณะ ดังนี้ กรณีที่มีการกำจัด OHTPDMS ที่ตกค้างจากปฏิกิริยากราฟโคพอลิเมอร์ (PDMS-g-LENR, purified) และกรณีที่ไม่ได้กำจัด OHTPDMS (PDMS-g-LENR, without purified) เนื่องจากพอลิไซลอกเซนมีราคาแพง ทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองเวลา และสารเคมีในการกำจัด OHTPDMS ออก แต่ยังไม่มียานวิจัยกล่าวถึงผลของ OHTPDMS ตกค้างต่อการเกิดฟิล์มพอลิเมอร์ และสมบัติของสารเคลือบผิว ดังนั้นจึงศึกษาสมบัติต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิวของกราฟโคพอลิเมอร์ ทั้งกรณีที่กำจัด OHTPDMS (PDMS-g-LENR, purified) และไม่ได้กำจัด OHTPDMS (PDMS-g-LENR, without purified)

โดยในการทดสอบเบื้องต้นได้ทำการเคลือบผิวแผ่นเหล็กด้วยสารตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง (ยังไม่ใช้ไอโซไซยานต) คือ ตัวอย่างที่ 1 ขงธรรมชาติเหลวคัดแปรเริ่มต้น ตัวอย่างที่ 2 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเริ่มต้น (OHTPDMS) ตัวอย่างที่ 3 PDMS-g-LENR, purified และตัวอย่างที่ 4 PDMS-g-LENR, without purified ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ 1 และ 2 ไม่สามารถแสดงสมบัติการเป็นสารเคลือบผิวเนื่องจากชั้นงานที่เตรียมได้มีลักษณะผิวเหนียวหนืด และเมื่อสัมผัสก็ติดกับส่วนสัมผัส ขณะที่ตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 4 พบว่าชั้นงานสามารถแสดงการเป็นสารเคลือบผิวได้ โดยชั้นงานมีผิวลักษณะแห้งและลื่น เมื่อสัมผัสผิวชั้นงานพบว่าไม่มีสารติดส่วนสัมผัสหลุดออกจากชั้นงาน และสามารถยึดติดกับแผ่นเหล็กได้ดี แต่ไม่ทนต่อรอยขีด

จากข้อมูลการศึกษาเบื้องต้นของสารตัวอย่าง 4 ชนิด จึงได้นำตัวอย่างที่ 3 PDMS-g-LENR, purified (Sample a) และตัวอย่างที่ 4 PDMS-g-LENR, without purified (Sample b) มาทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบสารเคลือบผิวสำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ (ตาราง 2) พบว่าความหนาของฟิล์มของตัวอย่างทั้งสองผ่านมาตรฐานที่กำหนด นั่นคือฟิล์มมีความหนาไม่เกิน 50 ไมครอน และเมื่อทดสอบความเงาของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นดีบุกของ PDMS-g-LENR, without purified พบว่ามีความเงามากกว่า PDMS-g-LENR, purified โดยมีค่า 90.1 และ 70.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบความแข็งของฟิล์ม พบว่าตัวอย่างทั้งสองมีค่าความแข็งอยู่ที่ 6B ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด การทดสอบการขีดเกาะของฟิล์ม พบว่าการขีดติดแบบ Cross-cut ของตัวอย่างทั้งสองไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด โดยพบว่า PDMS-g-LENR, purified มีการหลุดออกของฟิล์มน้อยกว่า PDMS-g-LENR, without purified ขณะที่การทดสอบการขีดติดแบบ Scratch-adhesion ของตัวอย่างทั้งสองให้ค่าการขีดติดที่ดีเยี่ยม ดังตาราง 2

ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของฟิล์ม (Impact Test) พบว่าตัวอย่างทั้งสองทนต่อแรงกระแทกได้น้อยไม่ผ่านมาตรฐาน แต่จะเห็นได้ว่า PDMS-g-LENR, without purified ซึ่งมีไซลอกเซนที่ไม่ทำปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย มีค่าความทนต่อแรงกระแทกมากกว่า PDMS-g-LENR, purified โดยสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ที่ความสูง 15 cm ในขณะที่ PDMS-g-LENR, purified สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ที่ความสูงเพียง 5 cm การทดสอบความทนต่อการโค้งงอของฟิล์ม เพื่อดูความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม จะทำการทดสอบด้วยกัน 2 แบบ คือการทดสอบแบบ Erichsen และการทดสอบแบบ Bending จากผลการทดสอบทั้ง Erichsen และ Bending พบว่าตัวอย่างทั้งสองยังไม่ผ่านมาตรฐาน โดยในการทดสอบการโค้งงอของแผ่นฟิล์มพบว่า PDMS-g-LENR; without purified ให้ผลการทดสอบทั้งค่า Erichsen และ Bending ต่ำกว่า PDMS-g-LENR; purified โดย PDMS-g-LENR; purified ให้ฟิล์มที่สามารถต้านทานการกดของแท่งเหล็กได้ระยะทางยาวกว่าคือ 1.5 mm ในขณะที่ PDMS-g-LENR; without purified สามารถต้านทานได้เพียง 0.7 mm และในการทดสอบค่า Bending พบว่า PDMS-g-LENR, purified มีค่า Bending เท่ากับ 6 \ominus (ตาราง 1) ซึ่งหมายถึงชั้นงานยังคงมีการโค้งงอที่ดีเมื่อใช้

เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (ไม่สามารถใช้เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 6 mm ได้ โดยพบการแตกของผิวชิ้นงานที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่านี้) ในขณะที่ PDMS-g-LENR; without purified มีค่า Bending เท่ากับ 10X ซึ่งหมายถึงชิ้นงานไม่สามารถดัดโค้งได้เลย ซึ่งพบว่าผิวชิ้นงานเกิดการแตกแม้เพียงเริ่มทดสอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุด (10 mm)

การทดสอบความทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) พบว่า PDMS-g-LENR; without purified มีความทนต่อสภาวะที่เป็นด่างได้ดีกว่า PDMS-g-LENR; purified โดยชิ้นงานยังคงมีความเงางามที่ดี และยังสามารถยึดติดกับแผ่นทดสอบได้ดีเช่นเดิมเมื่อเทียบกับส่วนที่ไม่สัมผัสกับด่างบนแผ่นทดสอบเดียวกัน ในขณะที่ในสภาวะที่เป็นกรดพบว่าตัวอย่างทั้งสองทนต่อสภาวะที่เป็นกรดได้น้อย โดยพบความเงางามและการยึดติดลดลง

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการเคลือบผิวของกราฟิโพลิเมอร์ทั้งที่กำจัดและไม่กำจัด OHTPDMS ที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก พบว่าการไม่กำจัด OHTPDMS ออก (PDMS-g-LENR; without purified) ส่งผลให้สมบัติด้านความเงางาม ความทนต่อแรงกระแทก และความต้านทานต่อสารเคมีในสภาวะเบสดีกว่าการกำจัด OHTPDMS ออก (PDMS-g-LENR; purified) ในขณะที่การกำจัด OHTPDMS ออก ให้สมบัติเรื่องการโค้งงอของแผ่นฟิล์ม และสมบัติด้านการยึดติดกับแผ่นเหล็กที่ดีกว่า และทั้งสองชิ้นงานให้สมบัติด้านความแข็งของฟิล์ม และความเงางามในสภาวะกรดที่ต่ำมาก จากผลการทดสอบทั้งหมดอาจกล่าวได้ว่า PDMS-g-LENR ทั้งกรณีที่ไม่กำจัด และไม่กำจัด OHTPDMS ออก (Sample a และ Sample b) ยังคงให้สมบัติด้านความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก ความโค้งงอของแผ่นฟิล์ม และการทนต่อสารเคมีต่ำกว่ามาตรฐานที่ต้องการ ในขั้นต่อไปจึงสนใจศึกษา

การเพิ่มความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก ความโค้งงอของแผ่นฟิล์ม และความทนต่อสารเคมีให้กับชิ้นงาน โดยการนำ PDMS-g-LENR ทั้งแบบกำจัดและไม่กำจัด OHTPDMS ออก ไปทำปฏิกิริยาร่วมกับไดไอโซไซยาเนต (1,6-Diisocyanatohexane, HDI) เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางของพอลิยูรีเทน ซึ่งพอลิยูรีเทนมีสมบัติเชิงกลที่ดี จึงน่าจะส่งผลทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

ตาราง 2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของสารเคลือบผิวที่เตรียมจาก PDMS-g-LENR

Checking item	ค่ากำหนด จาก อุตสาหกรรม	Sample							
		a	b	c	d	e	f	g	
Film thickness	Micron on tin plate $\leq 50 \mu\text{m}$	47,48,45	47,45,49	45,43,40	48,45,47	40,46,45	40,41,39	42,38,40	
Gloss	At 60°C (on tin panel)	-	70.5	90.1	83.9	83.1	69.1	63.7	29.7
Hardness	Pencil (2 kg, marked-broken)	>2H	<6B	6B	F	HB	B	H	HB
Adhesion	Cross-cut (1x1 mm ²)	100/100	94/100	85/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
	Scratch-adhesion (1 kg)	⊙	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖
Impact	cm (½, 500 g)	>50 cm	5	15	35	30	25	>50	>50
Erichsen	mm	>7.0 mm	1.5	0.7	>7	>7	>7	>7	>7
Bending	Ø..... mm	2 mm	6 mm /⊖	10 mm /X	4 mm /⊖	2 mm /⊖	10 mm /X	2 mm /⊖	2 mm /⊖
Chemical resistance	5% NaOH Spot test (RT, 48h)	-	X/O	⊖/⊖	O/Δ	Δ/⊖	⊖/X	O/O	XX/O
(Gloss/adhesion)	5% H ₂ SO ₄ Spot test (RT, 48h)	-	XX/O	XX/O	O/O	Δ/⊖	XX/Δ	⊖/⊖	O/⊖

หมายเหตุ Sample a = PDMS-g-LENR; purified

Sample b = PDMS-g-LENR; without purified

Sample c = PDMS-g-LENR; purified/HDI เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

OH:N=C=O = 1:0.5

Sample d = PDMS-g-LENR; without purified/HDI เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

OH:N=C=O = 1:0.5

Sample e = PDMS-g-LENR; without purified/HDI เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

OH:N=C=O = 1:0.25

Sample f = PDMS-g-LENR; without purified/HDI เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

$$\text{OH:N=C=O} = 1:0.75$$

Sample g = PDMS-g-LENR; without purified/HDI เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

$$\text{OH:N=C=O} = 1:1$$

Hardness: 6H>5H>4H>3H>2H>H>F>HB>B>2B>3B>4B>5B>6B

⊖ = Excellent O = Good Δ = Fair X = Poor XX = Very poor

2. ผลของการทำปฏิกิริยาร่วมระหว่างกราฟิโพลิเมอร์กับไดไอโซไซยาเนต

ศึกษาสมบัติของสารเคลือบผิวที่เตรียมจากโพลิเมอร์ระหว่าง PDMS-g-LENR; purified และ PDMS-g-LENR; without purified กับ HDI โดยเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของกราฟิโพลิเมอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลของ OHTPDMS (ในกรณี PDMS-g-LENR; without purified) ต่อโมลของหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนตของ HDI = 1:0.5 จากผลการทดสอบของ PDMS-g-LENR; purified ร่วมกับ HDI (Sample c) และ PDMS-g-LENR; without purified ร่วมกับ HDI (Sample d) พบว่า Sample c มีค่าความเงา (Gloss) ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการทนต่อแรงกระแทก (Impact) ที่สูงกว่า Sample d อยู่เล็กน้อย และมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่เติม HDI แต่ตัวอย่างทั้งสองยังคงมีค่าความแข็งและค่าการทนต่อแรงกระแทกไม่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาค่าการยึดติด (Adhesion) พบว่าตัวอย่างทั้งสองให้ค่าการยึดติดที่ดีขึ้น ผ่านตามมาตรฐานโรงงานกำหนด (ตาราง 1) ซึ่งจากผลการยึดติดเมื่อเทียบกับ PDMS-g-LENR ที่ไม่ผสม HDI (Sample a และ Sample b) จึงอาจกล่าวได้ว่า HDI มีส่วนช่วยในการยึดติดของสารเคลือบผิวกับแผ่นเหล็กได้ดีขึ้น และจากการทดสอบค่าการทนต่อการโค้งงอแบบ Erichsen และ Bending พบว่าระบบที่ไม่กำจัด OHTPDMS ออก (Sample d) มีสมบัติด้านการโค้งงอที่ดีกว่าระบบที่กำจัด OHTPDMS ออก (Sample c) และทดสอบ Erichsen ของตัวอย่างทั้งสองมีค่าผ่านมาตรฐานตามที่กำหนด แต่การทดสอบ Bending ซึ่งต้องผ่านการทดสอบเมื่อใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm พบว่า Sample d เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐาน ในขณะที่ Sample c สามารถตัดโค้งได้เมื่อใช้เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดเพียง 4 mm เท่านั้น ในการทดสอบความทนต่อสารเคมีพบว่าในสภาวะกรดและเบส การยึดติดแผ่นโลหะของฟิล์มที่เตรียมจาก PDMS-g-LENR; without purified ร่วมกับ HDI (Sample d) ให้ผลการทดสอบดีกว่า PDMS-g-LENR; purified ร่วมกับ HDI (Sample c) แต่ค่าความเงาของชิ้นงานทดสอบพบว่า Sample d มีความเงาที่ดีกว่า Sample c ทั้งในสภาวะกรดและเบส

จากผลการทำปฏิกิริยาร่วมกับ HDI พบว่าทั้งระบบที่มีทั้งการกำจัด และไม่กำจัด OHTPDMS ออก (c และ d) ชิ้นงานยังคงมีความเงางามที่ดี มีความแข็งที่เพิ่มขึ้น มีความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

(แม้ว่ายังไม่ผ่านมาตรฐานสำหรับสารเคลือบผิวรถยนต์) มีการโค้งงอของแผ่นฟิล์มดีขึ้น และทนต่อสภาวะตัวทำละลายกรดได้เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ผสม HDI (a และ b) ถึงแม้ว่าการใช้ PDMS-g-LENR; purified มาผสมร่วมกับ HDI (Sample c) จะมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้ PDMS-g-LENR; without purified (Sample d) แต่ค่าที่ได้ก็ไม่ต่างกันมากนัก อีกทั้งการกำจัด OHTPDMS ออกยังมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ ของพอลิไซลอคเซนซึ่งมีราคาแพงให้เกิดประโยชน์สูงสุด การศึกษาเงื่อนไขต่อไปจึงเลือกระบบที่ไม่กำจัด OHTPDMS ออก

3. ผลของปริมาณของไดไอโซไซยานต

ศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการเคลือบผิวของ PDMS-g-LENR กับ HDI อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ กัน (ตาราง 1) โดยทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของกราฟิโคพอลิเมอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลของ OHTPDMS ต่อโมลของหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยานตของ HDI = 1:0.25 (Sample e), 1:0.5 (Sample d), 1:0.75 (Sample f) และ 1:1 (Sample g) พบว่าความเงาของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไอโซไซยานตเพิ่มขึ้น จาก 1:0.25 เป็น 1:0.5 แต่มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไอโซไซยานตเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 และ 1 ตามลำดับ ในขณะที่สมบัติอื่นๆ คือความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก การทนต่อการโค้งงอ ผลความเงาและการยึดติดทั้งการทดสอบในสภาวะกรดและเบส พบว่าเพิ่มขึ้นตามไอโซไซยานตที่เพิ่มขึ้น จาก 0.25 เป็น 0.75 ในขณะที่เมื่อใช้ไดไอโซไซยานตที่มากเกินไป (1:1) พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงาน ความเงา และค่าการยึดติดเมื่อทำการทดสอบในสภาวะกรดและเบสมีค่าลดลง ในขณะที่มีความทนต่อแรงกระแทก และการโค้งงอที่ใกล้เคียงกับเมื่อใช้ไดไอโซไซยานตในอัตราส่วน 0.75 ทั้งนี้ปริมาณ HDI ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างกราฟิโคพอลิเมอร์ OHTPDMS และ HDI มากขึ้น เนื่องจากกราฟิโคพอลิเมอร์มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากบนสายโซ่พอลิไอโซพรีน เกิดเป็นเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทน ดังนั้นสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ของสารเคลือบผิวจึงพบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ HDI หรือการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าหากใช้ปริมาณ HDI มากเกินไป อาจเกิดการตกค้างของ HDI ส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงาน ความเงา และค่าการยึดติดเมื่อทำการทดสอบในสภาวะกรดและเบสของสารเคลือบผิวมีค่าลดลง

โดยในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลของกรีฟโคพอลิเมอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลของ OHTPDMS ต่อหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยานตของ HDI= 1:0.75 (Sample f) จะให้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติที่ดีที่สุด โดยให้ฟิล์มที่มีความลื่นสูง มีความเงาของฟิล์มแบบกึ่งเงา (semi-gloss) คือ 63.7 มีค่าการยึดเกาะของฟิล์มทั้งการทดสอบแบบ Cross-cut และแบบ Scratch-adhesion ดีเยี่ยมไม่มีส่วนใดหลุดล่อนออกจากแผ่นทดสอบ และขึ้นงานให้ค่าการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของฟิล์ม (Impact Test) ที่ดีโดยสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ที่ความสูง 50 cm โดยฟิล์มไม่เกิดความเสียหาย และในการทดสอบความทนต่อการดัดโค้งของฟิล์ม เพื่อศึกษาความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มพบว่าทั้งการทดสอบแบบ Erichsen และการทดสอบแบบ Bending ผ่านตามมาตรฐานกำหนดคือในการทดสอบแบบ Erichsen ฟิล์มสามารถต้านทานการกดของแท่งเหล็กได้ระยะทางยาวกว่า 7 mm ในขณะที่การทดสอบแบบ Bending ขึ้นงานสามารถดัดโค้งได้ดี ไม่เกิดรอยแตกของฟิล์ม แม้เมื่อใช้แกนทรงกระบอกที่เสี้ยนผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดคือ 2 mm และสำหรับการทดสอบความทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) พบว่า Sample f มีความทนต่อสภาวะที่เป็นกรดได้ดีกว่าสภาวะที่เป็นด่าง แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าทั้งการทดสอบในทั้ง 2 สภาวะยังคงให้ฟิล์มที่มีการยึดเกาะ และความเงาในระดับดีถึงดีเยี่ยม จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ของ Sample f พบว่าให้ค่าการทดสอบผ่านมาตรฐานสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ ยกเว้นเพียงค่าความแข็งที่ยังไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดว่าต้องมีค่ามากกว่า 2H โดย Sample f มีค่าความแข็งเท่ากับ H เท่านั้น

สรุปผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้กรีฟโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และยางธรรมชาติเหลวคัดแปรอิพอกซิไดซ์ เป็นสารเคลือบผิวโลหะโดยตรง พบว่ากรีฟโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้สามารถเคลือบผิวแผ่นเหล็ก และแผ่นดีบุกได้ดี แต่สมบัติเชิงกลสำหรับการเคลือบผิวยังไม่ผ่านมาตรฐานสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ แต่จะให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อมีการผสมร่วมกับไดไอโซไซยานตเกิดเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมขวางของพันธะยูรีเทน โดยสมบัติเชิงกลด้านต่างๆพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ HDI ที่เพิ่มขึ้น (0-0.75) โดยเมื่อใช้ HDI ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.75 พบว่าให้สมบัติของสารเคลือบผิวผ่านตามมาตรฐานการทดสอบสำหรับสารเคลือบผิวของอุตสาหกรรมรถยนต์ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติด้านการยึดติด การทนแรงกระแทก การโค้งงอ และความต้านทานต่อสารเคมี ยกเว้นเพียงค่าทดสอบด้านความแข็งของสารเคลือบผิวเท่านั้นที่ยังต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ ม.นเรศวร ที่ได้สนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณคุณกฤษณะ วงศ์แดง เจ้าหน้าที่บริษัทสยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบสารเคลือบผิวมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). *ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).

Bayer Material Science. (2005). *Tomorrow, today will be yesterday. High-tech thermoplastic polyurethanes set trends*. Retrieved April 3, 2009, from http://www.guardian-tactile.com/PDF/Desmopan_Brochure.pdf.

Klinklai, W., Kawahara, S., Mizumo, T., Yoshizawa, M., Tangpakdee, T. and Isono, Y. (2003). Depolymerization and ionic conductivity of enzymatically deproteinized natural rubber having epoxy group. *Eur Polym J.*, 39, 1707-1712.

Park, H.B. and Lee, Y.M. (2001). Separation of toluene/nitrogen through segmented polyurethane and polyurethane urea membranes with different soft segments. *Journal of Membrane Science*, 197, 283-296.

Phinyocheep, P., Phetphaisit, C.W., Derouet, D. and Brosse, J.C. (2005) Chemical degradation of epoxidized natural rubber using periodic acid: Preparation of epoxidized liquid natural rubber. *J Appl Polym Sci.*, 95, 6-15.

Rutnakornpituk, M., Ngamdee, P. and Phinyocheep, P. (2006). Preparation and properties of polydimethyl siloxane-modified chitosan. *Carbohydrate Polymers.*, 63, 229-237.

Stanciu, A., Airinei, A., Timpu, D., Ioanid, A., Ioan, C. and Bulacovschi, V. (1999) Polyurethane/poly dimethylsiloxane segmented copolymers. *Eur Polym J.*, 35, 1959-1965.