

# พื้นผิวที่ปรับเปลี่ยนระดับความเป็นขี้ได้ของยางธรรมชาติ กราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

สุกษณ์ คงทอง\* และ สุภาวดี โชติรัตน์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พบว่ายางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (NR-g-PMMA) สามารถแสดงคุณสมบัติแบบวัสดุฉลาดได้กล่าวคือ พื้นผิวสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตได้เองตามระดับความเป็นขี้ของตัวกลางที่สัมผัส ซึ่งสามารถตรวจสอบพฤติกรรมนี้ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสและค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก หลังจากพื้นผิวของ NR-g-PMMA สัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขี้สูง (น้ำกลั่นและแอลกอฮอล์) ค่ามุมสัมผัสปรับลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสัมผัสกับอากาศซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความเป็นขี้ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากหมู่เมทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นขี้ที่กราฟต์ติดอยู่กับสายโซ่ยางธรรมชาติ สามารถเคลื่อนที่จากใต้พื้นผิวขึ้นมาบนบริเวณพื้นผิวเพื่อลดค่าพลังงานอิสระของพื้นผิวเมื่อสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขี้สูง นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกของพื้นผิว NR-g-PMMA แสดงการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหมู่เมทิลเมทาคริเลตจากใต้พื้นผิวขึ้นมาบนบริเวณพื้นผิวด้วย กล่าวคือพื้นผิว NR-g-PMMA ที่ผ่านการสัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์แสดงค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกสูงกว่ากรณีสัมผัสกับอากาศเนื่องจากอันตรกิริยาที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นจากการมีหมู่เมทิลเมทาคริเลตมากขึ้น

**คำสำคัญ:** วัสดุฉลาด ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต พื้นผิวของพอลิเมอร์

# The Tunable Polarity at the Surface of Natural Rubber Grafted with Polymethyl Methacrylate

Sureurg Khongtong\* and Suphawadee Chotirut

---

## ABSTRACT

This research found that natural rubber grafted with polymethyl methacrylate (NR-g-PMMA) could accomplish as smart materials – the amounts of methyl methacrylate groups at its surface adjusted themselves along the levels of polarity of substrates. This surface behavior could be monitored by the measurement of contact angles as well as peeling strength. It was found that surfaces of NR-g-PMMA revealed much lower values of contact angles after equilibration against water and alcohol, which were high polar substrates, compared to that against air which was less polar one. This change was due to the migration of grafted methyl methacrylate group, a polar structure, from the region deep away to the surface of samples in order to minimize the interfacial free energy when contacted against high polar substrates. Moreover, peeling strength at the surface of NR-g-PMMA analogously displayed the same tendency reflecting the mobility of this polar moiety to the surface. This surface exhibited greater peeling strength after equilibration against water and alcohol than that of an air equilibration because of higher interaction created by more amounts of methyl methacrylate groups.

**Keywords:** smart materials, natural rubber grafted with polymethyl methacrylate, polymer surface

## บทนำ

ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุฉลาด เพื่อใช้งานในลักษณะที่สามารถตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกได้ด้วยตัวเอง เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด หรือสี เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองได้เมื่อเกิดความเสียหาย ซึ่งวัสดุฉลาดมักถูกพัฒนาขึ้นจากวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีราคาแพง [1-4] การใช้งานวัสดุฉลาดจึงถูกจำกัดอยู่เฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์บางชนิดที่มีราคาสูง ดังนั้นการพัฒนาวัสดุฉลาดขึ้นจากวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูกจึงเป็นหัวข้องานวิจัยที่ทำหายในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบที่เป็นขั้ว (polar moiety) บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (NR-g-PMMA) ซึ่งเมทิลเมทาคริเลตเป็นโมเลกุลที่มีความเป็นขั้ว จากผลการศึกษา พบว่า NR-g-PMMA นั้นมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนปริมาณเมทิลเมทาคริเลตที่บริเวณพื้นผิวได้ตามระดับความเป็นขั้วของตัวกลางที่มาสัมผัสกับพื้นผิว โดยสามารถตรวจวัดการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติดังกล่าวของตัวอย่างได้ด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิว ซึ่งพบว่าหลังจากที่พื้นผิวของ NR-g-PMMA ได้สัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูง พื้นผิวมีการปรับตัวในทิศทางที่ให้ค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสัมผัสกับอากาศ ผลการทดลองที่พบนี้บ่งชี้ว่าปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตที่บริเวณพื้นผิวตัวอย่างมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่อสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูง นอกจากนี้ยังพบผลการทดลองที่สนับสนุนความสามารถในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของ NR-g-PMMA เพิ่มเติมอีกจากการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก (peeling strength) ของพื้นผิวตัวอย่างกับแถบอลูมิเนียม กล่าวคือเมื่อพื้นผิวของตัวอย่างได้ผ่านการสัมผัสกับ อากาศ น้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ ก่อนที่จะถูกประกบกับผิวของแถบอลูมิเนียม ค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกระหว่างผิวตัวอย่างกับแถบอลูมิเนียมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้ยืนยันว่าหมู่เมทิลเมทาคริเลตที่บริเวณพื้นผิวตัวอย่างมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูงขึ้น จึงส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างหมู่เมทิลเมทาคริเลตที่ผิวของตัวอย่างกับชั้นออกไซด์ที่ผิวของแถบอลูมิเนียมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย [5, 6] การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของวัสดุตามความเป็นขั้วของตัวกลางต่างชนิดกันนี้ได้จำกัดอยู่เฉพาะระบบที่เป็นยางธรรมชาติเท่านั้น ยังมีระบบของพื้นผิวและตัวกลางอื่นๆ อีกที่แสดงพฤติกรรมสนับสนุนการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของพื้นผิวเช่นเดียวกับที่รายงานในบทความนี้ ซึ่งพฤติกรรมลักษณะนี้เกิดจากแรงขับของระบบที่พยายามลดค่าพลังงานอิสระของพื้นผิว (interfacial free energy) เพื่อให้พื้นผิวบริเวณที่สัมผัสกับตัวกลางมีความเสถียรมากที่สุด [7-9]

## อุปกรณ์และวิธีทดลอง

### 1. วัสดุวิจัย

น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (NR-g-PMMA) ที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อพอลิเมทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 85 ต่อ 15 ผลิตโดยองค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ต.กรุงเทพฯ อ.ทุ่งใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช น้ำยางข้น 60% (concentrated latex) ชนิดแอมโมเนียสูง (high ammonia, HA) ผลิตโดยองค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ต.กรุงเทพฯ อ.ทุ่งใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate, reagent grade, 99%) จากบริษัท Sigma Aldrich ไดเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (dibenzoyl peroxide, reagent grade) จากบริษัท Sigma Aldrich โทลูอีน (toluene, reagent grade, 99%) จากบริษัท Sigma Aldrich เอทานอล (ethanol, reagent grade, 99%) จากบริษัท Sigma Aldrich แผ่นอลูมิเนียม (98%, หนา 0.01 มม) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด โลหะภัณฑ์นครศรีธรรมราช จ.นครศรีธรรมราช

### 2. การเตรียมตัวอย่าง

#### 2.1 การเตรียมแถบอลูมิเนียมสำหรับการทดสอบหาค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก

ตัดแผ่นอลูมิเนียมให้เป็นแถบที่มีขนาด  $1 \times 12$  นิ้ว แล้วเช็ดผิวด้วยสำลีชุบโทลูอีนจำนวน 15-20 ครั้ง ล้างผิวด้วยน้ำผสมผงซักฟอกและล้างออกด้วยน้ำกลั่น เพื่อขจัดชั้นไขมันและสิ่งสกปรกที่เคลือบผิวอลูมิเนียมออก จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ  $60 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที แล้ววัดค่ามอดุลัส ดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวซ้ำอีกจนกระทั่งค่ามอดุลัสบนพื้นผิวอลูมิเนียมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง (โดยปกติมีค่า  $18 \pm 5$  องศา) ซึ่งบ่งชี้ว่าชั้นไขมันและสิ่งสกปรกที่เคลือบผิวอลูมิเนียมถูกขจัดออกไปหมดแล้ว

#### 2.2 การเตรียมฟิล์มตัวอย่างสำหรับวัดค่ามอดุลัส

ฟิล์มตัวอย่างของ NR-g-PMMA และยางธรรมชาติเตรียมโดยเทน้ำยาง NR-g-PMMA และน้ำยางข้น 60% ผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช เพื่อกรองเอาสิ่งเจือปนที่อาจจะติดมากับน้ำยางออก จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชม. เพื่อไม่ให้มีฟองอากาศ ก่อนเทน้ำยางปริมาณ 20 กรัม ลงในจานแก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. นำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $80 \pm 3$  องศาเซลเซียสจนน้ำหนักรวมที่ซึ่งใช้ระยะเวลา 6 ชม. แล้วลอกฟิล์มตัวอย่างออกจากจานแก้ว ส่วนชิ้นตัวอย่างของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเตรียมโดยผสมไดเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.15 กรัม ลงในเมทิลเมทาคริเลต 15 กรัม คนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที แล้วเทลงลงในจานแก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. จากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ตัวอย่างเกิดการพอลิเมอไรเซชันบางส่วนเป็นระยะเวลา 48 ชม. ก่อนที่จะนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $115 \pm 3$  องศาเซลเซียส เพื่อกระตุ้นให้เกิดพอลิเมอไรเซชันอย่างสมบูรณ์ และเพื่อระเหยโมเลกุลเมทิลเมทาคริเลตส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกจากตัวอย่าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองที่อาจจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเมทิลเมทาคริเลตอิสระที่ไม่ได้เป็นส่วนประกอบของสายโซ่พอลิเมอไร [10] การอบชิ้นตัวอย่างในขั้นตอนนี้ดำเนินการจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ซึ่งใช้ระยะเวลา 48 ชม. แล้วแกะฟิล์มตัวอย่างออกจากจานแก้ว ตัดฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากทุกกรณีให้มีขนาด  $1 \times 3$  ซม. จากนั้นแบ่งชิ้นตัวอย่างที่

เตรียมได้ข้างต้นเป็น 3 ชุดๆ ละ 3 ชิ้น แล้วไปผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ (เอทานอล 99%) เป็นระยะเวลา 24 ชม. เพื่อให้ห้องค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างแต่ละชุดเข้าสู่สภาวะสมดุล แล้วเป่าผิวของตัวอย่างให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าระยะเวลา 24 ชม. นานเพียงพอที่จะทำให้ห้องค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างทั้ง 3 ชุดดังกล่าวเข้าสู่สภาวะสมดุลเรียบร้อยแล้วจากการสังเกตค่ามุมสัมผัสที่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งมีค่าคงที่

### 2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก

เตรียมฟิล์มตัวอย่างของ NR-g-PMMA และยางธรรมชาติด้วยวิธีการเดียวกับที่กล่าวถึงในข้อ 2.2 แต่ใช้น้ำยางทั้งสองชนิดปริมาณ 200 กรัม เทลงในถาดแก้วขนาด  $6 \times 12$  นิ้ว ออบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $80 \pm 3$  องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ซึ่งใช้ระยะเวลา 48 ชม. ตัดฟิล์มที่แห้งแล้วให้เป็นแถบขนาด  $1 \times 9$  นิ้ว ส่วนฟิล์มตัวอย่างของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเตรียมโดยการผสมไดเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1.5 กรัมลงในเมทิลเมทาคริเลต 150 กรัม แล้วดำเนินการตามวิธีที่ได้กล่าวถึงในข้อ 2.2 แต่ใช้ภาชนะเป็นถาดแก้วขนาด  $6 \times 12$  นิ้ว และใช้ระยะเวลาให้ความร้อนในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $115 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชม. แล้วตัดฟิล์มเป็นแถบขนาด  $1 \times 9$  นิ้ว เช่นเดียวกัน จากนั้นแบ่งแถบฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ข้างต้นเป็น 3 ชุดๆ ละ 5 ชิ้น นำไปผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม. ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวถึงในข้อ 2.2 หลังจากนั้นเป่าผิวของตัวอย่างให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 30 วินาทีแล้วใช้พื้นผิวด้านที่ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางของฟิล์มตัวอย่างทั้ง 3 ชุดดังกล่าว ประกบกับแถบอลูมิเนียมที่เตรียมไว้ (ตามวิธีในข้อ 2.1) โดยเว้นบริเวณปลายสุดเป็นระยะอย่างน้อย 1 นิ้วเพื่อใช้เป็นบริเวณที่จับยึดชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบ แล้วกดอัดชิ้นตัวอย่างดังกล่าวภายใต้แรง  $20 \pm 3$  นิวตัน เพื่อให้บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างและแถบอลูมิเนียมเกิดการสัมผัสกันได้อย่างเต็มที่ที่เป็นระยะเวลานาน 36 ชม. ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลา 36 ชม. นานเพียงพอที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกระหว่างพื้นผิวฟิล์มตัวอย่างกับอลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สมดุล

### 3. การทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact Angles)

นำฟิล์มตัวอย่างจากข้อ 2.2 ที่ผิวแห้ง (จากการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน) และสะอาดไปวัดค่ามุมสัมผัสบนผิวด้านที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ ด้วยเครื่อง contact angle meter ยี่ห้อ Drop Master รุ่น DM 300 โดยใช้เอทานอลเป็นของเหลวหยดบนผิวของตัวอย่างและบันทึกค่ามุมสัมผัส (sessile drops,  $\theta$ ) ในสภาวะของอุณหภูมิและความชื้นห้อง

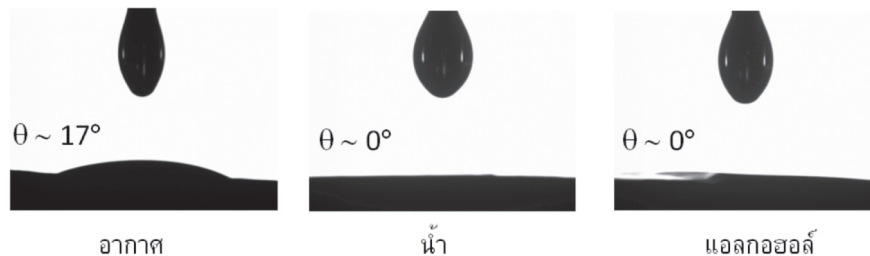
### 4. การทดสอบค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก

ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก (peeling strength) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Lloyd Instrument รุ่น LR300K โดยยึดจับปลายของแถบฟิล์มตัวอย่างและแถบอลูมิเนียมที่เตรียมได้ข้างต้นเข้ากับหัวจับ (grips) ทั้งสองของเครื่อง UTM แล้วดำเนินการทดสอบด้วยวิธีการ T-peel test ด้วยความเร็วในการดึงเท่ากับ 20 มม/นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1876 โดยใช้ load cell ขนาด 500 นิวตัน ในการวัดค่าแรงดึงและใช้ซอฟต์แวร์ของเครื่องทดสอบในการคำนวณค่า peeling strength ที่ได้จากการทดลอง

## ผลการทดลอง

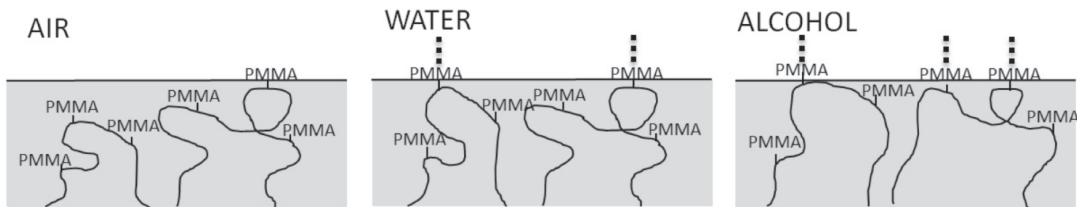
### 1. การศึกษาความสามารถในการปรับองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างโดยการวัดค่ามุมสัมผัส

เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง NR-g-PMMA เมื่อมีการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้ว (polarity) ต่างกัน พิล์มตัวอย่างของ NR-g-PMMA ได้ถูกปล่อยให้สัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน 3 ชนิดที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน ได้แก่ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ [11, 12] เป็นระยะเวลา 24 ชม. แล้วตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง โดยใช้วิธีการวัดค่ามุมสัมผัส รูปที่ 1 แสดงมุมสัมผัสเมื่อทดสอบโดยการหยดเอทานอลบนผิว NR-g-PMMA ที่ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางทั้งสามชนิดดังกล่าว ซึ่งพบอิทธิพลของตัวกลางที่มีต่อค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวตัวอย่าง กล่าวคือเมื่อตัวอย่างผ่านการสัมผัสกับอากาศซึ่งเป็นตัวกลางที่ไม่มีค่ามุมสัมผัส ค่ามุมสัมผัสของหยดเอทานอลที่วัดได้มีค่าประมาณ 17 องศา ส่วนตัวอย่างชนิดเดียวกันเมื่อผ่านการสัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูงขึ้น มุมสัมผัสของหยดเอทานอลบนพื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญโดยพื้นผิวแสดงค่ามุมสัมผัสที่ต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ นั่นคือมีค่าเท่ากับ 0 องศา



รูปที่ 1 แสดงมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของหยดเอทานอลบนพื้นผิว NR-g-PMMA หลังผ่านการสัมผัสกับ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม.

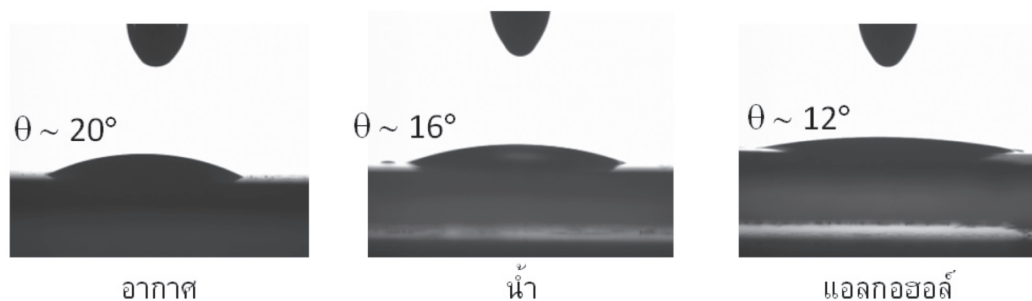
ความแตกต่างของค่ามุมสัมผัสของหยดเอทานอลบนพื้นผิว NR-g-PMMA ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นความสามารถของการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวดังกล่าวหลังจากผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน กล่าวคือพื้นผิวของตัวอย่างนี้มีหมู่เมทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นโครงสร้างทางเคมีที่มีขั้วกราฟที่อยู่บนสายโซ่ยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene) ซึ่งมีความยืดหยุ่นของสายโซ่สูง (high chain flexibility) ดังนั้นเมื่อพื้นผิวดังกล่าวสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วต่างกันจึงส่งผลให้เกิดการปรับองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวเพื่อลดค่าพลังงานอิสระของพื้นผิว [13] ส่งผลให้หมู่เมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในบริเวณลึกจากพื้นผิวสามารถขยับขึ้นไปอยู่บนพื้นผิวสัมผัสของตัวอย่างได้ในปริมาณที่แตกต่างกันตามระดับความเป็นขั้วของตัวกลางที่พื้นผิวดังกล่าวสัมผัสอยู่ ดังนั้นตัวอย่างที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์เป็นระยะเวลา 24 ชม. จึงมีปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตบนพื้นผิวสัมผัสที่แตกต่างกัน ดังแสดงภาพจำลองในรูปที่ 2 ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีผลลดตามที่ได้แสดงผลการทดลองไปแล้วข้างต้น



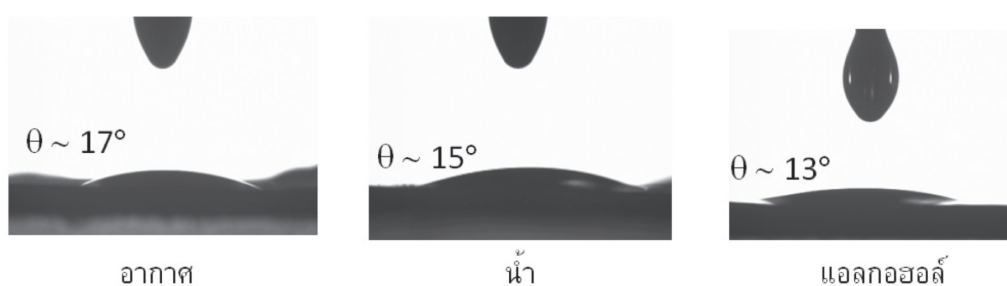
**รูปที่ 2** ภาพจำลองแสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว NR-g-PMMA เมื่อมีการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน หมู่ PMMA ในรูปแสดงโมเลกุลพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งกราฟต์ติดอยู่กับสายโซ่ยางธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่นสูง หมู่ PMMA ที่เกิดอันตรกิริยากับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วเขียนแสดงด้วยเส้นประ

เพื่อยืนยันผลการทดลองที่พบบนพื้นผิวของ NR-g-PMMA จึงได้ดำเนินการทดลองในทำนองเดียวกันแก่ชุดควบคุมสองตัวอย่าง ได้แก่พื้นผิวของยางธรรมชาติ (NR) และพื้นผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสองแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัส (เมื่อพื้นผิวผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม.) ที่ไม่ชัดเจนอย่างเช่นในกรณีที่พบบนพื้นผิวของตัวอย่าง NR-g-PMMA ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 อย่างไรก็ตามยังสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิว NR หลังผ่านการสัมผัสกับตัวกลางทั้งสามชนิด (รูปที่ 3) มากกว่าบนพื้นผิว PMMA (รูปที่ 4) ทั้งนี้เนื่องจากในตัวอย่่าง NR นั้นนอกจากจะประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติแล้ว ยังมีการเจือปนด้วยโมเลกุลโปรตีนและกรดไขมัน (ซึ่งเป็นโครงสร้างทางเคมีที่มีขั้ว) อยู่ด้วยตามธรรมชาติ [14] ประกอบกับการที่สายโซ่ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นจึงยังสามารถแสดงพฤติกรรมการปรับองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวเพื่อลดค่าพลังงานอิสระของพื้นผิวได้ ส่วนตัวอย่าง PMMA แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสที่น้อยที่สุด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแม้จะเป็นตัวอย่างที่พื้นผิวมีความเป็นขั้วเนื่องจากหมู่เมทิลเมทาคริเลต แต่องค์ประกอบบริเวณพื้นผิวแทบจะไม่เกิดการปรับโครงสร้างใหม่แม้ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการที่สายโซ่ PMMA ขยับตัวได้น้อยนั่นเอง [15]

เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของ NR-g-PMMA กับพื้นผิวของชุดควบคุมคือ NR และ PMMA ที่ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีขั้วแตกต่างกันให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ได้แสดงค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสที่วัดได้จากพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสามไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของ NR-g-PMMA มีค่ามุมสัมผัสที่ลดลงอย่างชัดเจนจนไม่สามารถวัดค่าได้หลังจากผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูงขึ้นไปแก่น้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นความสามารถของการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวให้มีความเป็นขั้วเพิ่มสูงขึ้น ส่วนตัวอย่างที่เป็นชุดควบคุมคือ พื้นผิวของ NR และ PMMA พบว่าค่ามุมสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการสัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์

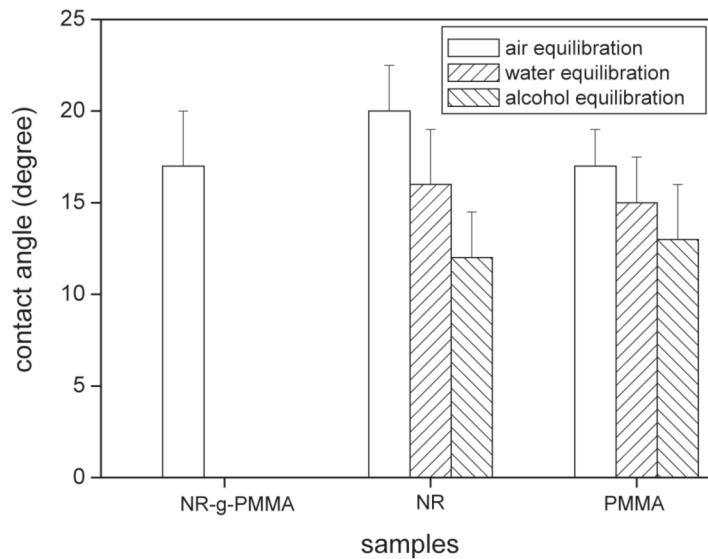


รูปที่ 3 แสดงมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของหยดเอทานอลบนพื้นผิว NR หลังผ่านการสัมผัสกับ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม



รูปที่ 4 แสดงมุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของหยดเอทานอลบนพื้นผิว PMMA หลังผ่านการสัมผัสกับ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม



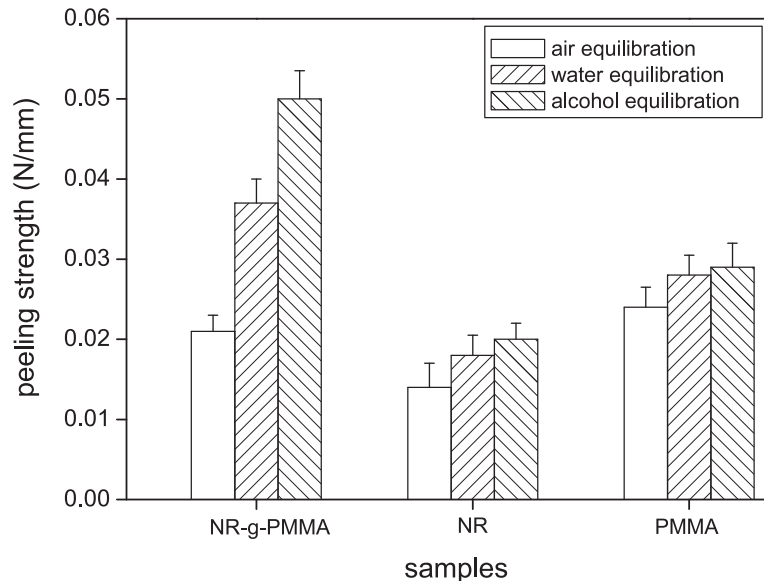


**รูปที่ 5** แสดงค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของหยดเอทานอลบนพื้นผิวตัวอย่างทั้งสามชุด หลังผ่านการสัมผัสกับอากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม โดยค่าเฉลี่ยที่แสดงในรูปแบบเป็นค่าที่ได้จากการวัดมุมสัมผัสอย่างน้อย 8 ครั้งและ error bars ที่แสดงในรูปแบบคือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุด

## 2. การศึกษาความสามารถในการปรับองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างโดยการวัดค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองที่พบข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการปรับองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวตัวอย่าง NR-g-PMMA เพิ่มเติม โดยศึกษาค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก (T-peel test) ระหว่างพื้นผิว NR-g-PMMA กับพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งหมู่เมทิลเมทาคริเลตบนพื้นผิวตัวอย่างสามารถเกิดอันตรกิริยาในรูปแบบ dipole-dipole force กับอลูมิเนียมออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมได้ [5, 6] ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของหมู่เมทิลเมทาคริเลตบริเวณพื้นผิวตัวอย่างหลังผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกมีค่าที่แตกต่างกันด้วย ผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกของพื้นผิวตัวอย่าง NR-g-PMMA เปรียบเทียบกับชุดควบคุมคือ NR และ PMMA (พื้นผิวทั้งหมดผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาก่อน ได้แก่ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์) ซึ่งพบว่าตัวอย่าง NR-g-PMMA ที่พื้นผิวผ่านการสัมผัสกับตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูง ได้แก่ น้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ แล้วประกบกับแผ่นอลูมิเนียมแสดงค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกมากกว่ากรณีที่ผ่านการสัมผัสกับอากาศอย่างชัดเจน ส่วนตัวอย่างชุดควบคุมคือ NR และ PMMA ที่ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางทั้งสามแสดงความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกเพียงเล็กน้อย ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าพื้นผิวของ NR-g-PMMA สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตที่บริเวณพื้นผิวได้ตามชนิดของตัวกลางที่สัมผัส นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของ NR ให้ค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกต่ำที่สุด

เนื่องจากองค์ประกอบที่บริเวณพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของ NR-g-PMMA และ PMMA ดังนั้นผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6 จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบจากการศึกษาด้วยวิธีการวัดค่ามุมสัมผัสและสนับสนุนความสามารถในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง NR-g-PMMA ตามที่ได้กล่าวถึงข้างต้น



**รูปที่ 6** แสดงค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก (T-peel test) ของตัวอย่างที่ผ่านการสัมผัสกับ อากาศ น้ำกลั่น และแอลกอฮอล์ เป็นระยะเวลา 24 ชม โดยค่าที่แสดงในรูปเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากอย่างน้อย 3 การทดสอบและ error bars ที่แสดงในรูปคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุด

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

NR-g-PMMA สามารถปรับระดับความเป็นขั้วของพื้นผิวได้ด้วยตัวเองโดยการปรับปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตบริเวณพื้นผิวตามระดับความเป็นขั้วของตัวกลางที่สัมผัส ผลจากการวัดค่ามุมสัมผัสบ่งชี้ว่าเมื่อพื้นผิวของ NR-g-PMMA ผ่านการสัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีความเป็นขั้วสูงพื้นผิวตัวอย่างมีการปรับตัวในทิศทางที่เพิ่มปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตให้สูงขึ้นกว่าเมื่อสัมผัสกับอากาศ จึงส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวมีค่าลดลงจนไม่สามารถวัดค่าได้ ในขณะที่พื้นผิวของตัวอย่างชุดควบคุม ได้แก่ NR และ PMMA ไม่แสดงพฤติกรรมดังกล่าว การปรับปริมาณหมู่เมทิลเมทาคริเลตที่บริเวณพื้นผิวตัวอย่าง NR-g-PMMA ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการลดค่าพลังงานอิสระของพื้นผิว กล่าวคือเมื่อพื้นผิวตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ หมู่เมทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นโครงสร้างทางเคมีที่มีความเป็นขั้วที่กราฟต์ติดอยู่กับสายโซ่ยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสามารถเคลื่อนที่จากบริเวณใต้พื้นผิวขึ้นมาอยู่ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสได้ ส่วนตัวอย่างชุดควบคุมซึ่งเป็น NR นั้น องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างทางเคมีที่ไม่มีขั้วจึงไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวและชุดควบคุมอีกชุดซึ่งเป็น PMMA นั้น แม้โครงสร้างทางเคมีจะประกอบด้วยหมู่เมทิลเมทาคริเลตที่มีขั้วแต่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการขยับตัวได้น้อย

โมเลกุลเมทิลเมทาคริเลตบริเวณใต้พื้นผิวจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาอยู่บริเวณพื้นผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวเช่นกัน

ความสามารถในการปรับองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของ NR-g-PMMA ตามระดับความชื้นของตัวกลาง นั้น ยังยืนยันได้ด้วยผลการวัดค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกของพื้นผิวสัมผัสที่ประกบกับแถบอลูมิเนียม ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังจากตัวอย่างผ่านการสัมผัสกับน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีผ่านการสัมผัสกับอากาศ ทั้งนี้เกิดจากการที่เมื่อพื้นผิว NR-g-PMMA ได้สัมผัสกับตัวกลางที่มีชื้น หมู่เมทิลเมทาคริเลตจึงถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากบริเวณใต้พื้นผิวขึ้นมาอยู่บริเวณพื้นผิวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่าง NR-g-PMMA ที่ผ่านการสัมผัสกับตัวกลางแล้วนำมาประกบกับแถบอลูมิเนียม ส่งผลให้แรงอันตรกิริยาระหว่างหมู่เมทิลเมทาคริเลตกับอลูมิเนียมออกไซด์เกิดได้มาก ส่วนในตัวอย่างชุดควบคุมไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงในการยึดติดแบบดึงลอก ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนน้ำยาธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตและน้ำยางชัน (60%, HA) จากองค์การสวนยาง (ฝ่ายโรงงาน 2) ต.กรงหยัน อ.ทุ่งใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ที่กรุณาให้การสนับสนุนครุภัณฑ์วิจัยตลอดจนสถานที่สำหรับการศึกษาวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Benelli, T., Mazzocchetti, L., Mazzotti, G., Paris, F., Salatelli, E. and Giorgini, L. 2016. Supramolecular Ordered Photochromic Cholesteric Polymers as Smart Labels for Thermal Monitoring Applications. *Dyes and Pigments* 126: 8-19.
2. Pilate, F., Toncheva, A., Dubois, P. and Raquez, J. 2016. Shape-Memory Polymers for Multiple Applications in the Materials World. *European Polymer Journal* 80: 268-294.
3. Russo, E., Selmin, F., Baldassari, S., Gennari, C., Caviglioli, G., Cilurzo, F., Minghetti, P. and Parodi, B. 2016. A Focus on Mucoadhesive Polymers and their Application in Buccal Dosage Forms. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 32: 113-125.
4. White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N. and Viswanathan, S. 2001. Automatic Healing of Polymer Composites. *Nature* 409: 794-797.
5. Khongtong, S. and Ferguson, G. S. 2004. Tunable Glue: Rubber Elasticity Control of Adhesion. *Walailak Journal of Science and Technology* 1: 23-28.
6. Khongtong, S. and Ferguson, G. S. 2002. The Smart Adhesion: Entropic Control of Adhesion at the Polymer/Metal Interface. *Journal of the American Chemical Society* 124: 7254-7255.

7. Wilson, M. D., Ferguson, G. S. and Whitesides G. M. 1990. Size of Alkyl Group R: Principal Factor Determining Wettability of Surface-Functionalized Polyethylenes by Water. *Journal of the American Chemical Society* 112: 1244-1251.
8. Holmes-Farley, S. R., Bain, C. and Whitesides, G. M. 1988. Wetting of Functionalized Polyethylene Film Having Ionizable Organic Acids and Bases at the Polymer-Water Interface: Relations between Functional Group Polarity, Extent of Ionization, and Contact Angle with Water. *Langmuir* 4: 921-937.
9. Bergbreiter, D. E. 1999. Field Responsive Polymers: Electroresponsive, Photoresponsive and Responsive Polymers in Chemistry and Biology. Washington DC. American Chemical Society. p. 301.
10. Khongtong, S. and Ferguson, G. S. 2002. The Integration of Bulk and Interfacial Properties in a Polymeric System. 2. Elasticity at a Polyisoprene/Water Interfaces. *Macromolecules* 35: 4023-4029.
11. Khongtong, S. and Ferguson, G. S. 2001. The Integration of Bulk and Interfacial Properties in a Polymeric System: Elasticity at a Polybutadiene/Water Interface. *Journal of the American Chemical Society* 123: 3588-3594.
12. Khongtong, S. 2006. A Smart Surface from Natural Rubber: the Mechanism of Entropic Control at the Surface Monitored by Contact Angle Measurement. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 28: 351-359.
13. Ferguson, G. S. and Whitesides, G. M. 1992. Modern Approaches in Wettability: Theory and Applications. New York. Plenum. p. 143.
14. Smith, W. 1993. Foundation of Materials Science and Engineering. 2th Edition. Singapore. McGraw-Hill Companies. Inc. p. 625.
15. Sperling, L. H. 1992. Introduction to Physical Polymer Science. 2nd Edition, New York. John Wiley & Sons. p. 303.

ได้รับบทความวันที่ 25 มีนาคม 2560

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 28 สิงหาคม 2560