การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งและพอลิไอโซพรีน

โดย

นางสาวเจกิตาน์ แก้วพารา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งและพอลิไอโซพรีน

โดย
นางสาวเจกิตาน์ แก้วพารา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2553

PREPARATION AND PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH / POLYISOPRENE BLEND

By

J-kitar Kaewpara

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2010

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งและพอลิไอโซพรีน ” เสนอโดย นางสาวเจกิตาน์ แก้วพารา เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

……..
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อำนาจ สิทธัตตระกูล)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)
...../...../.....

50402207: สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติกจากแป้ง/พอลิเมอร์ผสม/สมบัติเชิงกล/ตัวประสาน/ยางธรรมชาติ

เจกิตาน์ แก้วพารา : การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งและพอลิไอโซพรีน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. 82 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร์ด ยางธรรมชาติถูกนำมาลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยฟีนิลไฮดราซีนให้กลายเป็นยางธรรมชาติเหลว แล้วนำมาถูกกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร์ด ปริมาณ 3 phr หรือ 9 phr และ vinyl silane 2 ชนิด คือ Dimethoxymethylvinylsilane และ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ยางที่ได้ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR พบว่าเกิดพีคที่แสดงถึงการกราฟต์ โดยเมื่อปริมาณสารตั้งต้นมากขึ้น ปริมาณการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นนำยางที่ผ่านการกราฟต์แล้วผสมกับแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมแบบภายใน ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์แล้วทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก และสมบัติความเสถียรทางความร้อน พบว่าเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้น impact strength ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยยางที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ทำให้ชิ้นงานมี impact strength สูงกว่ายางที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane เนื่องจากมี methoxy group มากกว่า แต่การผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรไม่ทำให้สมบัติความเสถียรทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

50402207: MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING
KEYWORDS: THERMOPLASTIC STARCH/POLYMER BLEND/MECHANICAL PROPERTIES/COMPATIBILIZER/NATURAL RUBBER
J-KITAR KAEWPARA : PREPARATION AND PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH / POLYISOPRENE BLEND. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WANCHAI LERD WIJITJARUD, Ph.D. 82 pp.

The aim of this research is to study the preparation and properties of thermoplastic starch/polyisoprene blend. The molecular weight of natural rubber was reduced by reacting with phenylhydrazine to produce liquid natural rubber (LNR). Subsequently, LNR was reacted with maleic anhydride at 3 phr or 9 phr and vinyl silane (Dimethoxymethylvinylsilane (DMMS) and Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane) (TMOS). The FT-IR and ^{1}H-NMR results showed the grafting characteristic peaks. The grafting content increased with increasing the reactants. The cassava starch, maleic modified natural rubber, and glycerol were mixed together in an internal mixer. The specimens were prepared in compression molding machine. The impact strength, and thermal stability of specimens were examined. From the results we found that the impact strength of the specimens increased with increasing the grafting content. The impact strength of TPS/TMOS-g-NR were higher than TPS/DMMS-g-NR as a result of free volume and silanol group. However, the effect of percent grafting on the thermal stability was not significant.

Department of Materials Science and Engineering Graduated School, Silpakorn University Acedemic Year 2010

Student's signature.....

Thesis Advisors' signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ความสำเร็จในการทำงานวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหางานวิจัย จากอาจารย์ทั้งสองท่าน คือ ผศ. ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และอาจารย์ ดร. อำนาจ สิทธัตตระกูล ทำให้ผู้วิจัยสามารถแก้ปัญหาผ่านมาได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่เล็กจนปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณพี่พินิจ เจียนระลึกและพี่ ๆ ทุกคนที่ทำงานใน ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัยและขอขอบคุณภาควิชาเคมีมหาวิทยาลัยศิลปากรที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดสอบ คือ SEM และ ^{1}H-NMR ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษา คอยให้ความสนุกสนานในห้องพักวิจัย และคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจและดูแลข้าพเจ้าตลอดมา

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่ หน้า

ภาพที่ หน้า

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกมีความตื่นตัวในเรื่องของขยะพลาสติกมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะพลาสติกจากบรรจุภัณฑ์และอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความต้องการสรรหาทรัพยากรใหม่เพื่อนำมาพัฒนาเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แป้งถือได้ว่าเป็นวัสดุทางเลือกอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาถูก [1-2] แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในรูปของคาร์โบไฮเดรตซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์แสงของพืช ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น ที่เรียกว่า amylose และ พอลิเมอร์เชิงกิ่ง ที่เรียกว่า amylopectin โครงสร้างของ amylose จะมีลักษณะเป็นโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นสายตรงด้วยพันธะ α-1,4 ส่วน amylopectin จะมีโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายตรงด้วยพันธะ α-1,4 และมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 ประมาณ 5% โดยปริมาณของ amylose กับ amylopectin จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและถิ่นกำเนิดของพืชแป้ง [3] การเปลี่ยนแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกสามารถทำได้โดยนำเม็ดแป้งมาผสมกับพลาสติไซเซอร์ เช่น น้ำ กลีเซอรอล เป็นต้น [4-5] และให้ความร้อนและความดัน แต่เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งนั้นมีข้อเสีย คือ แข็ง เปราะ และว่องไวต่อความชื้น จึงมีการพยายามผสมยางธรรมชาติลงไปเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง [6-7] แต่ก็ยังเกิดปัญหาเรื่องการแยกเฟสระหว่างแป้งกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติเป็นสารที่มีน้ำหนักโมกุลสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยาก จึงต้องผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลก่อน การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น [8-10] การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยวิธีการเหล่านี้ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงไม่มากนัก การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติด้วย phenylhydrazine [11] ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นยางเหลวซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อได้ง่าย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ

แป้ง โดยลดความเปราะของชิ้นงานด้วยการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างบางส่วนด้วย maleic anhydride หรือสารในกลุ่ม vinyl silane

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย maleic anhydride และ vinyl silane ได้

1.2.2 เตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย maleic anhydride และ vinyl silane

1.2.3 สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งได้

1.3 แนวคิดงานวิจัย

เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และเป็นวัสดุที่ใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากสารปิโตรเคมีได้ แต่วัสดุชนิดนี้มีข้อเสียคือ แข็ง เปราะ และว่องไวต่อความชื้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยเติมยางธรรมชาติลงใน thermoplastic starch เพื่อให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยการนำ maleic anhydride มากราฟต์กับยางธรรมชาติ และใช้ vinyl silane (Dimethoxymethylvinylsilane และ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane) เป็น compatibilizer ให้กับยางธรรมชาติและแป้ง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ พิสูจน์เอกลักษณ์ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride ด้วยอัตราส่วน 3 phr และ 9 phr และ vinyl silane (Dimethoxymethylvinylsilane และ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ด้วยอัตราส่วน 9 phr และ 20 phr

1.4.2 นำยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรแล้วมาผสมกับแป้งและกลีเซอรอลในอัตราส่วนกลีเซอรอล 25% และยางธรรมชาติดัดแปร 5%

1.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโดยทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน micro tensile ตามมาตรฐาน ASTM D638 และชิ้นงาน impact testing ตามมาตรฐาน ASTM D 256 อย่างละ 7-15 ชิ้น ค่าเฉลี่ยจากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย One way ANOVA

1.4.4 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานของชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูความเข้ากันได้ของแป้งและยางธรรมชาติดัดแปร

1.4.5. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเทคนิค TGA

1.5 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

1.5.4.1 สังเคราะห์ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย maleic anhydride หรือ vinyl silane

1.5.4.2 ผสมยางธรรมชาติดัดแปรที่ได้กับแป้ง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์

1.5.4.3 ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

1.5.4.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

1.5.4.5 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานของชิ้นงาน

1.5.4.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ คือ สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งได้ และสามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารเสริมแรงที่ใช้ได้ เพื่อนำมาพัฒนาต่อในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์และอื่นๆ เนื่องจากมีความเหมาะสมหลายประการ เช่น ประเทศไทยนับว่ามีศักยภาพค่อนข้างสูงในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมจากแป้ง ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตจำพวกแป้งอยู่ตลอดทั้งปี นอกเหนือไปจากการจำหน่ายผลผลิตสดหรือแปรรูปแล้ว เศษเหลือของวัสดุรวมไปถึงวัสดุที่ด้อยคุณภาพยังเป็นปัญหาให้พบเห็นอยู่เสมอๆ ทั้งทางด้านการจัดการหรือการนำไปใช้ประโยชน์ การใช้ประโยชน์ของเศษวัสดุเหลือทิ้งในระบบอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการผลิตวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ต่างประเทศได้ทำการศึกษาวิจัยกันมานานแล้ว ทั้งนี้เพื่อให้เกิดกระบวนการจัดการที่เหมาะสมกับของเหลือทางการเกษตรบางชนิด และเป็นการใช้ประโยชน์ของวัสดุทางเกษตรอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นแป้งที่ประเทศไทยผลิตได้มากและมีราคาที่ต่ำ นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมด้านการผสมและขึ้นรูปพลาสติกที่มีความสามารถในการแข่งขันในระดับโลกได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เคมีและสมบัติของแป้ง

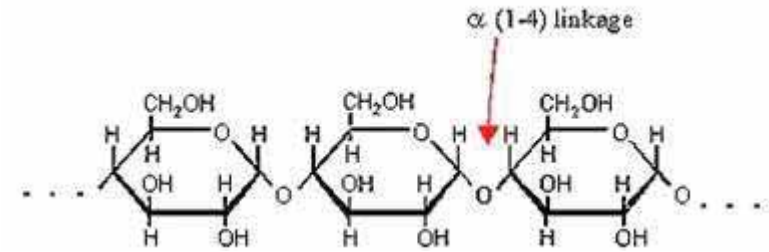
แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วย พื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ [12] ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่ง มีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และ มีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมี ขนาดใหญ่ กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “ intermediate material ” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในโมเลกุลแป้ง [12]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α-1,4	1.โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α-1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.2 อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1, 4 –glycosidic linkage ดังภาพที่ 1 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย

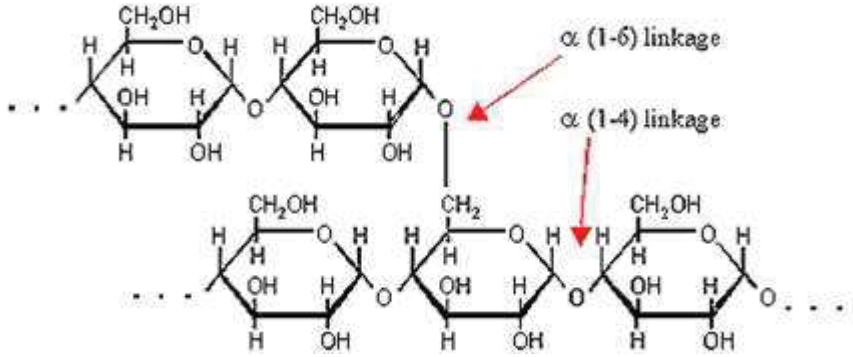


ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล amylase [12]

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง ประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูจะมีปริมาณ อะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง

2.3 อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ α-1, 4- glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1, 6-glycosidic linkage ดังภาพที่ 2



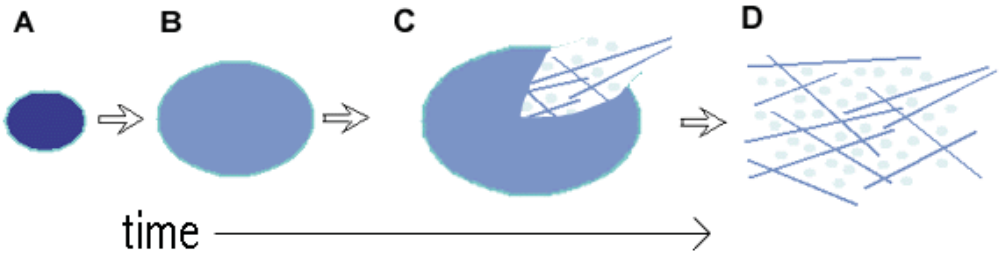
ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล amylopectin [12]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α-1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

2.4 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งในน้ำที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็นผลึกจับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 °C หรือใช้สารเคมีเช่นให้ความร้อน 60 °C แก่แป้งสาลีจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความ

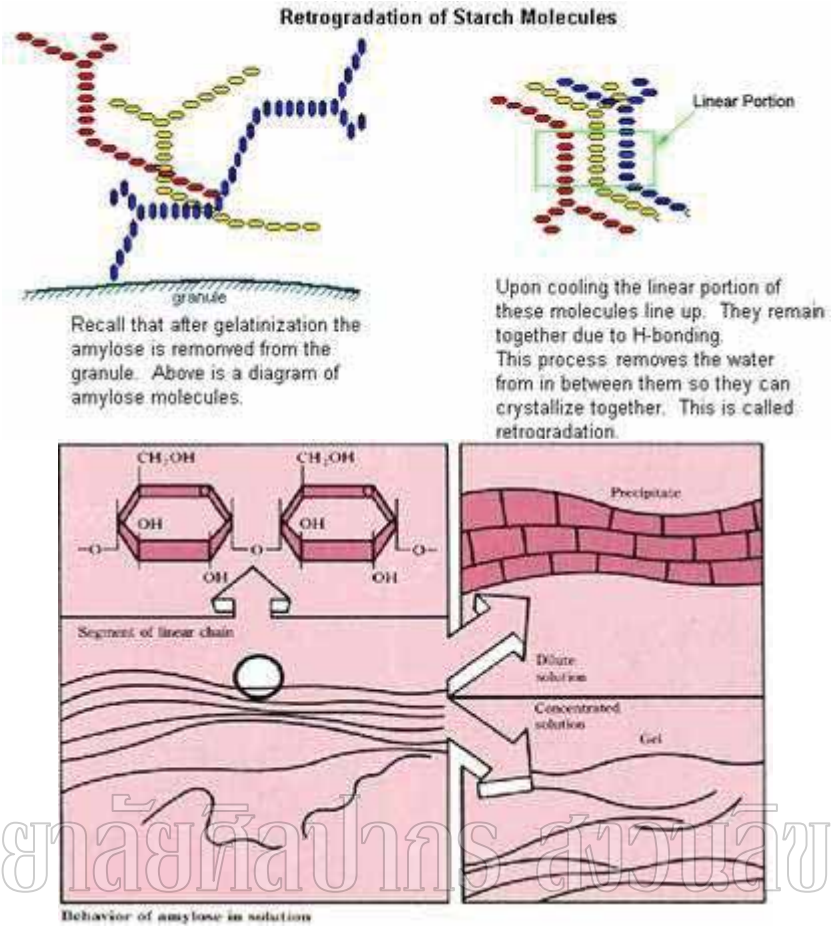
สม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 °C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน แป้งอาจเกิด gelatinize ได้ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการละลายในตัวทำละลาย เช่น alkali, liquid ammonia, DMSO, $CaCl_2$



ภาพที่ 3 ลักษณะการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง [12]

2.5 การคืนตัวของแป้ง (Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังภาพที่ 4) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม



ภาพที่ 4 ลักษณะการเกิด retrogradation ในชิ้นงาน [12]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากรากหัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากหรือหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุล

อะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.6 การใช้แป้งในอุตสาหกรรมอื่นๆ

สำหรับการใช้ประโยชน์จากแป้งในอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารนั้นมีมากมาย นับตั้งแต่การใช้ใน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเส้นใยผ้า เป็นสารจับฝุ่นละอองในการผลิตถ่านหิน เซรามิก และโลหะต่างๆ ใช้เป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์สารพอลิเมอร์เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก เป็นกาวในอุตสาหกรรมทอพรม ใช้เคลือบกระดาษ การใช้แป้งในลักษณะเป็นสารย่อยสลายทางชีวภาพ ความพยายามในการผลิตผลิตภัณฑ์จากแป้งให้คล้ายพลาสติก ซึ่งทนความร้อนได้เพื่อใช้ทำเป็น ภาชนะบรรจุ การใช้แป้งในเครื่องสำอาง เช่น แชมพู และครีมนวดผม การใช้ในอุตสาหกรรมยา เช่น เป็นส่วนผสมเม็ดยา เป็นต้น การใช้แป้งเป็นแหล่งคาร์บอนในอุตสาหกรรมการหมัก เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ ต่างๆ สำหรับแนวโน้มในการใช้ประโยชน์ของแป้งในอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารนี้เน้นในด้านที่เกี่ยวข้องกับ สภาพแวดล้อมมากขึ้น เช่น การใช้ในอุตสาหกรรมผงซักฟอก เครื่องสำอาง ยา อุตสาหกรรมการหมัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาชนะบรรจุที่สลายตัวได้เอง

2.6.1 การนำแป้งไปใช้อุตสาหกรรม non-food application

2.6.1.1 อุตสาหกรรม adhesives เช่น hot-melt glues, stamps, bookbinding, envelopes, labels (regular and waterproof), wood adhesives, laminations, automotive, engineering, pressure sensitive adhesives, corrugation และ paper sacks

2.6.1.2 อุตสาหกรรม Explosives Industry เช่น wide range binding agent, match-head binder

2.6.1.3 อุตสาหกรรมการทำกระดาษ เช่น internal sizing, filler retention, surface sizing, paper coating (regular and colour), carbonless paper stilt material, disposable diapers และ feminine products

2.6.1.4 อุตสาหกรรมการก่อสร้าง เช่น concrete block binder, asbestos, clay/limestone binder, fire-resistant wallboard, plywood/chipboard adhesive, gypsum, board binder และ paint filler

2.6.1.5 อุตสาหกรรมโลหะ เช่น foundry core binder, sintered metal additive และ sand casting binder

2.6.1.6 อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น warp sizing, fabric finishing และ printing

2.6.1.7 อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและเภสัชกรรม เช่น dusting powder, make-up, soap filler/extender, face creams, pill coating, dusting agent และ tablet binder/dispersing agent

2.6.1.8 อุตสาหกรรมเหมืองแร่ เช่น ore flotation, ore sedimentation และ oil well drilling muds

2.6.1.9 อุตสาหกรรมพลาสติก เช่น biodegradable plastic film, dry cell batteries, printed circuit boards และ leather finishing

2.7 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบของแป้งแล้ว แป้งน่าจะมีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก แต่เนื่องด้วยในแต่ละ anhydroglucose unit ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำ (repeating unit) ของโมเลกุล amylose และ amylopectin นั้นประกอบด้วยหมู่ hydroxyl (-OH) ถึง 3 หมู่ โดยหมู่ hydroxyl ดังกล่าวสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียงได้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ amylose และ amylopectin มีค่าสูงมาก ทำให้พลังงานที่จะใช้ในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล amylose และ amylopectin มีค่าสูงกว่าพันธะที่ใช้ทำลายพันธะในสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนกับแป้งมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์ของแป้งสามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้ แต่กลับทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวแทนซึ่งเป็นการแสดงสมบัติของพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต (thermoset polymer) [13]

การเปลี่ยนแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถทำได้โดยการเติมสารประเภท plasticizer เข้าไปเพื่อทำหน้าที่ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งทำให้โมเลกุลของ plasticizer จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ของ amylose และ amylopectin เป็นผลทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของ amylose หรือ amylopectin ลดน้อยลง โมเลกุลของ amylose หรือ amylopectin จึงเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้นโดยใช้พลังงานลดน้อยลง

ลักษณะโดยทั่วไปของ plasticizer คือ เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือไม่ใหญ่มากนักและประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ เช่น หมู่ฟังก์ชันประเภท hydroxyl group หรือ amide group เป็นต้น Plasticizer ที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียม thermoplastic starch มากที่สุดคือกลีเซอรอล เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากนัก และยังมีความปลอดภัยสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ plasticizer ตัวอื่นๆ แต่ข้อด้อยของการใช้กลีเซอรอลมาเป็น plasticizer ก็คือ

เมื่อนำ TPS (thermoplastic starch) มาเก็บไว้หรือนำไปใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง (RH~50%, 37°C) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ retrogradation ขึ้น อันเนื่องมาจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่าง Glycerol กับโมเลกุลของแป้งไม่สูงมากนัก จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งสามารถกลับมาเกิดผลึกกันได้อีกครั้ง ซึ่ง plasticizer ชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือ glycerol ได้แก่ พวก sorbital, formamide, acetamide, urea ซึ่งจากการวิจัยพบว่า plasticizer ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภท amide สามารถฟอร์มพันธะที่แข็งแรงกับโมเลกุลของแป้งได้ดีกว่ากลีเซอรอลจึงส่งผลให้สามารถลดอัตราการเกิด retrogradation ได้ นอกจากนี้หากต้องการ thermoplastic starch ที่มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น จึงมีการใช้ plasticizer ในรูปแบบที่เรียกว่า co-plasticizer ซึ่งเป็นการใช้ plasticizer มากกว่า 1 ชนิดเช่น urea+formamide, urea+ethanolamine [14] เป็นต้น

2.8 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่นิยมทำมากที่สุด คือการเติมสารในกลุ่ม reinforcing filler ลงไปเป็นส่วนประกอบหนึ่งในการเตรียม thermoplastic starch โดย Reinforcing filler ที่ได้มีการนำไปใช้มีหลายประเภท เช่น สารตัวเติมในกลุ่ม inorganic filler ได้แก่ kaolin และ fly ash ซึ่งพบว่าสารในกลุ่มดังกล่าวสามารถเกิด interaction กับ thermoplastic starch ได้ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และ ค่า modulus ของ thermoplastic starch มีค่าสูงขึ้น รวมทั้งสามารถช่วยในการลดอัตราการเกิด retrogradation และ ทำให้ความว่องไวต่อความชื้นลดลงได้อีกด้วย

สารตัวเติมอีกประเภทที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch คือ สารจำพวกพอลิเมอร์และเส้นใยที่มาจากธรรมชาติ เช่น jute fiber และ flax fiber, chitin, และยางธรรมชาติ โดยที่สารตัวเติมจำพวก jute และ flax ซึ่งเป็นเส้นใย cellulose จากธรรมชาติหรือ chitin จะมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล amylose และ amylopectin ซึ่งเป็นพอลิเมอร์หลักของแป้ง ทำให้สารตัวเติมเหล่านี้สามารถเกิด interaction กับแป้งได้เป็นอย่างดี จึงทำให้สมบัติเชิงกลโดยทั่วไปมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้สารตัวเติมที่มาจากธรรมชาติและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้วัสดุ thermoplastic starch ที่เตรียมขึ้นจากสารตัวเติมเหล่านี้มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพโดยรวมที่สูงด้วย [15]

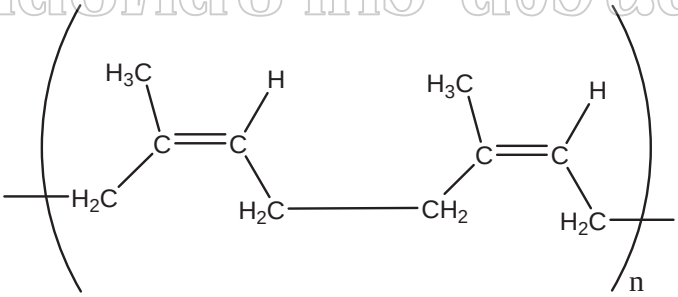
การปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกวิธีหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยกันคือการเตรียม thermoplastic starch ให้อยู่ในรูปของวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโน (nanocomposite) เช่น การเติม montmorillonite clay ซึ่งเป็น nano-sized layered silicate หรือแม้แต่การเติม starch nanocrystal ในกรณีของการเติม starch nanocrystal นั้นโครงสร้างทางเคมีของ filler จะมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างทางเคมีของแป้ง ทำให้เกิด interaction กันได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปการเตรียม

thermoplastic starch ให้เป็น nanocomposite นั้น ประสิทธิภาพของ filler ในการเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลจะสูง เนื่องจากอิทธิพลของขนาดที่เล็กของ filler ทำให้เกิด interaction ระหว่าง filler กับ thermoplastic starch ได้ดี นอกจากนี้ การเตรียม thermoplastic starch ให้เป็น nanocomposite นั้นส่วนใหญ่จะทำให้เกิด retrogradation ได้ช้าลงและมีความว่องไวต่อความชื้นลดลงด้วย

สำหรับการแก้ไขปัญหาเรื่องความแข็งเปราะของ thermoplastic starch นั้น ทำได้โดยการผสมยางธรรมชาติลงไปเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับ thermoplastic starch [6-7] แต่ก็ยังเกิดปัญหาเรื่องการแยกเฟสระหว่างแป้งกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติเป็นสารที่มีน้ำหนักโมกุลสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยาก จึงต้องผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลก่อน การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น [8-10]

2.9 ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ยางธรรมชาติ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่มีต้นกำเนิดจากของเหลวของพืชบางชนิด ยางธรรมชาติเป็นสารที่ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสูตรเอมไพริเคิล คือ C_5H_8 ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของยางธรรมชาติได้ดังภาพ



ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างยางธรรมชาติ (polyisoprene) [16]

น้ำยางที่กรีดได้จากต้น จะเรียกว่า น้ำยางสด (field latex) น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นเม็ดยางเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำ (emulsion) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 pH 6.5-7 น้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิลิตร มีความหนืด 12-15 cP ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35%
2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65% ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นน้ำ 55% ส่วนของลูทอยด์ 10%

การนำยางธรรมชาติไปใช้งานมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ น้ำยาง และยางแห้ง ในรูปแบบน้ำยางนั้น น้ำยางสดจะถูกนำมาแยกน้ำออก เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเนื้อยาง วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ การใช้เครื่องเซนตริฟิวส์ ในขณะที่การเตรียมยางแห้งนั้นมักจะใช้วิธีการหยดกรดอะซิติกลงในน้ำยางสด การใส่กรดอะซิติกเจือจางลงในน้ำยาง ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกชั้นระหว่างเนื้อยาง และน้ำ ส่วนน้ำที่ปนอยู่ในยางจะถูกกำจัดออกไปโดยการรีดด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง วิธีการหลักๆ ที่จะทำให้ยางแห้งสนิท มี 2 วิธีคือ การรมควันยาง และการทำยางเครพ แต่เนื่องจากยางผลิตได้มาจากแหล่งที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการแบ่งชั้นของยาง ตามความบริสุทธิ์ของยางนั้นๆ [16]

2.9.1 โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ มีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisorene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนล้วน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วย หน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง ใน 1 หน่วยไอโซพรีนจะมีพันธะคู่ และหมู่อัลฟาเมทธิลีน ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และยังทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากยางทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และโอโซนได้ง่าย ดังนั้น การออกสูตรยางจำเป็นจะต้องมีแอนตี้ออกซิแดนท์ และแอนตี้โอโซแนนท์ร่วมด้วย [17]

ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหว หักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ -72 °C สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก เนื่องจากมีความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อดึงยืด ซึ่งจะทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยางก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดยางโดยทั่วไปจะใช้เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง [16]

2.9.2 การย่อยสลายโมเลกุลของยางธรรมชาติ (degradation of natural rubber) [18]

การย่อยสลายโมเลกุลของยางธรรมชาติ (degradation of natural rubber) ให้กลายเป็นโมเลกุลที่มีความยาวน้อยลงจากเดิม และมีหมู่ที่มีความว่องไวอยู่ที่ปลายสายโซ่ เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ก่อนที่จะทำการผลิต thermoplastic elastomers จากยางธรรมชาติ การลดขนาดโมเลกุลของยางมีหลายวิธี ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- กระบวนการลดขนาดโมเลกุลยางโดยใช้แรงเชิงกล (mastication) เป็นกระบวนการแบบไม่สุ่ม (non-random process) เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางที่มีความยาวมากกว่า ความยาววิกฤตเท่านั้นที่จะถูกตัด ซึ่งจะเป็นการจำกัดขนาดการสลายตัว

- การใช้ความร้อนในการแตกโมเลกุลของยางในสภาวะที่มีอากาศและออกซิเจนอยู่ จะทำให้ยางนั้น มีความอ่อนนุ่มมากขึ้น ซึ่งการแตกตัวภายใต้ความร้อนของยางนี้ จะเกิดผ่าน cyclic intermediate ที่มีอยู่ปริมาณน้อยในยางธรรมชาติ

- การให้ความร้อนแก่สารละลายยางธรรมชาติ ซึ่งก็คือ ยางละลายใน chlorobenzene ที่อุณหภูมิระหว่าง 25-220°C เป็นเวลานาน

- การสลายตัวของยางโดยใช้สารเคมี (chemical degradation) คือ ใช้ hydrogen peroxide (H_2O_2), phenylhydrazine ในสภาวะที่มี ferrous chloride, oxygen, และ para toluenesulfonic acid เป็นสารเคมีที่ใช้ในการทำให้เกิดสลายตัว

- ทำให้ 1,4-cis polyisoprene เกิด oxidative degradation โดยใช้ ออกซิเจนที่มีอยู่ใน AIBN ที่อุณหภูมิ 80 °C

- การย่อยสลายยาง ในสารละลายโดยใช้ 5-25% ของ azomethine oxide, nitrileoxide และ nitrile amines ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของ aldehyde-phenyl hydroxylamine

- การใช้โอโซนซึ่งจะทำให้ได้โอลิโกเมอร์ (oligomers) ที่มีหมู่ฟังก์ชั่นเป็น aldehyde และ ketone

- การทำให้เกิดการ degradation ของยางที่อยู่ในรูปน้ำยาง (latex) สามารถทำได้โดยใช้ thionaphthol และ nitrobenzene ในสภาวะที่มีการให้แสง หรือ UV

- การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการ depolymerize ยางธรรมชาติ ที่อยู่ใน nitrobenzene และ acetylacetonates ของ iron และ cobalt

- Redox couples ซึ่งประกอบด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็น oxidizers ได้แก่ peroxide, perhydrol, oxygen ที่มีอยู่ในบรรยากาศ และสารที่ทำหน้าที่เป็น reducers ได้แก่ aromatic sulphonic acids และ aromatic hydrazines

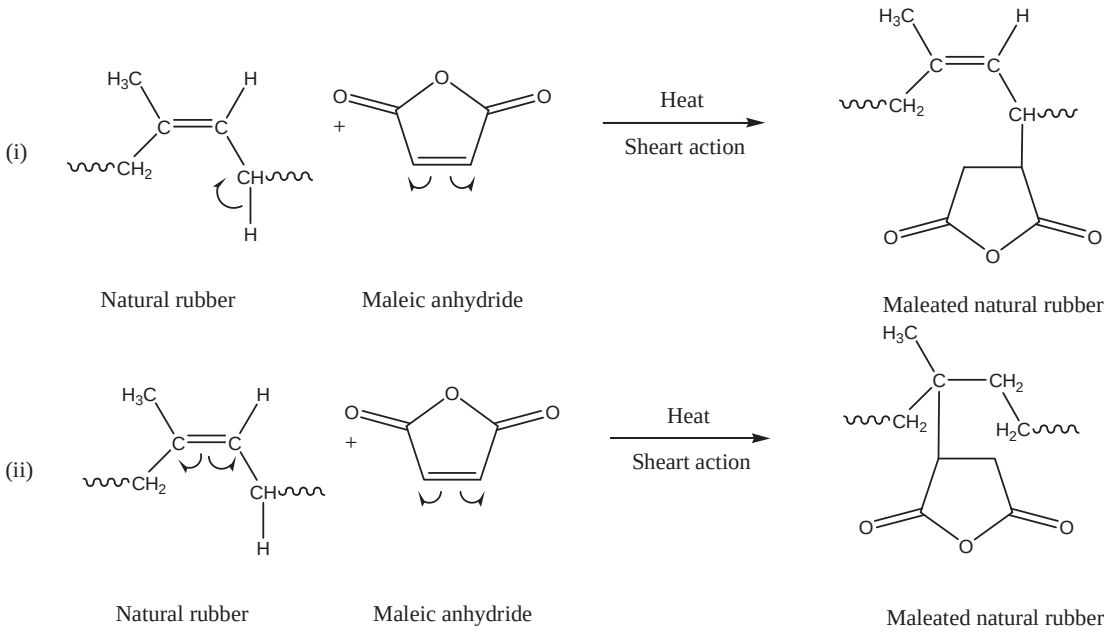
จะเห็นได้ว่ามีหลายวิธีการในการลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติ แต่ส่วนมากจะเป็นวิธีที่ค่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อน และบางกระบวนการกลับได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของ latex หรือละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์สามารถถูกทำให้ลดขนาดลงในปริมาณมากๆได้ โดยใช้ redox reagent เช่น phenylhydrazine และออกซิเจนในบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 50-70 °C ซึ่งผลของกระบวนการนี้จะทำให้ได้ยางธรรมชาติ ที่อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว มีหมู่ปลายเป็น carbonyl groups จากงานวิจัยที่มีการทำให้มีหมู่ฟังก์ชั่นอยู่ที่ปลายสายโซ่นี้ เป็นจุดเริ่มต้นของการปรับปรุงในเรื่องของ functionality ต่อไป

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดร์ดลงบนยางธรรมชาติ (The grafting of maleic anhydride onto natural rubber) [19]

Graft copolymer ของ maleic anhydride (MA) กับยางธรรมชาติ ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากการติด maleic anhydride ลงบนสายโซ่หลักของโมเลกุล ที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาตินั้น จะทำให้สามารถเอาชนะข้อบกพร่องในเรื่องของการมีพลังงานบริเวณพื้นผิว (surface energy) ที่ต่ำได้ ซึ่งการปรับปรุงในที่นี้ เป็นการปรับปรุงในเรื่องของความมีขั้ว และเรื่องของแรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด ที่จะนำมาผสมกัน ทำให้การผสมเข้ากันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนยางธรรมชาตินั้น มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ cis-1,4-polyisoprene กับ maleic anhydride ที่เป็นไปได้ คือ Free radical reaction ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



ภาพที่ 6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ cis-1,4-polyisoprene กับ MA ซึ่งเกิดผ่าน Free radical reaction [20]

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการกราฟต์ Maleic anhydride (MA) บนยางธรรมชาติ

1. ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (monomer)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่ำกว่า 10.0 phr พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มสูงมากขึ้น จะทำให้ปริมาณการกราฟต์ติดของ MA ลงบนยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์สูงกว่า 10.0 phr พบว่า เมื่อความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มสูงมากขึ้น จะทำให้ปริมาณการติดของ MA ลงบนยางธรรมชาติ ลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น เช่น เกิด chain transfer ไปยังมอนอเมอร์

2. ความเข้มข้นของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator)

เมื่อความเข้มข้นของ initiator เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณการกราฟต์ และ absorbance ratio เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ initiator เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้มีอนุมูลอิสระ (free radicals) เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีจุดที่มีความว่องไว (reactive sited) บนโมเลกุลของยางธรรมชาติมากขึ้น ส่งผลให้ระดับการกราฟต์ MA และ IR absorbance ratio เพิ่มมากขึ้น

3. ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณของการกราฟต์ MA เพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากเกินไป จะทำให้เกิด gel fraction ขึ้นในการ graft copolymer

4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดแตกตัวของ initiator เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีจำนวน free radical และอัตราของการ depolymerization เพิ่มสูงขึ้น

2.10.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกกับยางธรรมชาติ (Thermoplastic starch/natural rubber blends) [21]

จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง thermoplastic starches กับน้ำยางดิบของต้นยางพารา (Hevea Brasiliensis) และไม่มีการใช้ external compatibilizers

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง thermoplastic starch กับยางธรรมชาติในที่นี้ถูกเตรียมโดยใช้น้ำยางดิบกับแป้งข้าวโพด โดยทำการผสมใน intensive batch mixer ที่อุณหภูมิ 150 °C โดยมีการใช้ยางธรรมชาติใส่ลงไปในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.5% ถึง 20% ในงานวิจัยนี้จะได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสม โดยมีการวิเคราะห์ทางด้านสมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ผลของงานวิจัยพบว่าเมื่อมีการเติมน้ำยางลงไปจะทำให้มีการลดลงของค่า modulus, tensile strength และ ความแข็งเปราะ ซึ่งมีความแข็งเปราะจะน้อยกว่ากรณีของการมี thermoplastic starch เพียงอย่างเดียว ในบางอัตราส่วน พบว่า มีการแยกเฟสปรากฏให้เห็น โดยการแยกเฟสนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมยางและปริมาณของ plasticizer ซึ่งในที่นี้คือ glycerol โดยการที่เติม plasticizer เพิ่มมากขึ้นนี้ ทำให้สามารถที่จะเติมน้ำยางได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมน้ำยางลงในพอลิเมอร์ผสมนั้นถูกจำกัดด้วยการแยกของเฟสซึ่งจะปรากฏให้เห็น และจากการทดสอบด้วย SEM พบว่า ที่บางอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม มีการกระจายตัวของยางธรรมชาติที่ดีในเฟสที่ต่อเนื่องของเนื้อ thermoplastic starch

2.10.3 กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของ 2-เอทอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมมชาติเหลวโดยใช้ระบบรีดอกซ์ชนิดไอออนของโลหะ [22]

ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมยางธรรมชาติเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ได้ โดยการให้น้ำยางข้น 30% (wt/wt DRC) ทำปฏิกิริยากับ phenylhydrazine 1.0% (wt/wt DRC) ในระบบที่มีออกซิเจน และใช้เวลาตั้งแต่ 1-30 ชั่วโมง พบว่า สามารถเตรียมยางธรรมชาติเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ประมาณ $7.8 \times 10^4 - 1.1 \times 10^4$ ได้ และสามารถทำให้ยางธรรมชาติเหลวมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยการแยกเอาสิ่งเจือปนออกด้วยวิธีการตกตะกอนยางในเมทานอลและ

เมทานอล/อะซีโตน (3/1, v/v) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำยางธรรมชาติเหลวนี้ไปทำการกราฟต์ กับ 2-ethoxyethyl methacrylate (2-EEMA) โดยใช้ระบบรีดอกซ์ของ cupric salt/dimethylaniline (DMA) เป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยา พบว่า เปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40-70 °C และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 70-80 °C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 80 °C เปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของ 2-EEMA ก็มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกราฟต์มีค่าสูงสุด เมื่อความเข้มข้นของ 2-EEMA เท่ากับ 7.5×10^{-1} M และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะลดลง ชนิดและความเข้มข้นของ cupric salt มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ พบว่า cupric sulphate ที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-3} M เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด การเพิ่มความเข้มข้นของ DMA มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกราฟมีค่าสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของ DMA เท่ากับ 2.0×10^{-3} M และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะลดลง การเพิ่มความเข้มข้นกรดมากกว่า 7.5×10^{-4} M มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ลดลง การกราฟต์ขึ้นอยู่กับตัวกลางในการทำปฏิกิริยา และ CCl_4 เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกราฟต์ การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ชั่วโมงแรก มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นอีก เปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะลดลง การทดสอบสมบัติจากยางธรรมชาติเหลว ที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ต่างๆ กัน ทดสอบโดยใช้วิธีมาตรฐานของ มอก. 521-2527 (1984) พบว่า ผลิตภัณฑ์จะมีความต้านทานต่อการลอกเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ลดลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (60% DRC)
2. Phenylhydrazine (95%, Acros Organics)
3. Igepal C0-890 (Sigma-Aldrich)
4. Benzoyl peroxide (Panreac Química SAU)
5. Maleic anhydride (99%, Acros Organics)
6. Dimethoxymethylvinylsilane (97%, Sigma-Aldrich)
7. Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane (≥85% (GC), Sigma-Aldrich)
8. Copper (II) sulphate (Extrapure, Riedel-de Haen GmbH)
9. N,N-dimethyl aniline ((≥98.0% (GC), Fluka)
10. Sulphuric acid (98%, Analytical Grade, Ajax Finechem)
11. Benzyl alcohol (Extra Pure, Scharlau)
12. Potassium Peroxide (Analytical Grade, Ajax Finechem)
13. แป้งมันสำปะหลัง (cassava flour) (ตราปลามังกร)
14. Glycerol (99.5%, Analytical Grade, QRec^{TM})
15. Methanol (Commercial grade)
16. Chloroform (Analytical reagent grade)
17. Distilled water

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. 3-Necked round bottom flask
2. Conical flask
3. Beaker
4. Dropping funnel

5. Condender
6. Mechanical stirrer
7. Rotating evaporator
8. Magenic bar
9. Hotplate with stirrer
10. Thermocouple temperature controller
11. Pipette
12. Burette
13. Stopper
14. Thermometer
15. Vacuum oven
16. Dropper
17. Water bath with temperature controller
18. Vial tube
19. Spatula
20. Stirring rod
21. Glass plate

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. เครื่องอบสุญญากาศ (vacuum oven) [EYELA, VOS-301SD]
2. เครื่องผสมภายใน (internal mixer) [BRABENDER, 30/50 EHT]
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding) [LABTECH]
4. แม่พิมพ์ micro tensile และแม่พิมพ์ impact

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องมือทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดอเนกประสงค์ (Universal testing machine) [Instron 5969]

2. เครื่องมือทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Tester) [Zwick, B5102.202]

3. เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) [BRUKER, VERTEX 70]

4. เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectrocope, ^{1}H-NMR) [BRUKER, AVANCE 300]

5. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวของสาร (Thermo Gravimetric Analyzer) [Mettler Toledo, TGA/DSC1]

6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) [CamScan, MX-2000]

ดัชนีอักษรย่อ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้อักษรย่อเพื่อแสดงชนิดของสารที่กราฟต์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ และปริมาณที่ใช้ ดังนั้นเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจในความหมายของตัวย่อที่ใช้ จึงขอแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับอักษรย่อที่ใช้ดังต่อไปนี้

NR-g-MA 3 phr

เทอมที่ 1 คือ การกราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ (สีแดง)
เทอมที่ 2 คือ สารที่กราฟต์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ (สีเขียว)
เทอมที่ 3 คือ จำนวนของสารที่ใช้ในการกราฟต์ (สีน้ำเงิน)

ตารางที่ 2 ตัวอักษรย่อที่ใช้แสดงแทนสารที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

ลำดับที่	สารที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ	ตัวอักษรย่อ
1	Maleic anhydride	MA
2	Dimethoxymethylvinylsilane	DMMS
3	Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane	TMOS

3.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งและพอลิไอโซพรีน หรือยางธรรมชาติดัดแปรนี้ มี 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ (1) การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปรที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride (NA-g-MA), Dimethoxymethylvinylsilane (NR-g-DMMS) และ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane (NR-g-TMOS) (2) นำยางธรรมชาติดัดแปรที่ได้มาผสมกับแป้งและกลีเซอรอล

เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป และ (3) การทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงานที่ได้

ตอนที่ 1 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร

3.5.1 การเตรียมยางธรรมชาติเหลว

นำน้ำยางธรรมชาติ (60% DRC) มาเจือจางให้ได้ % DRC เท่ากับ 30% ทำให้เสถียรด้วย Igepal 0.3 phr กวนทิ้งไว้หนึ่งคืนที่อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 °C เติม phenylydrazine 27.5 phr พร้อมทั้งผ่านอากาศและกวนตลอดเวลา ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (Uthai, 1993) ระเหยน้ำออกและล้าง phenylhydrazine ด้วยเอธานอล นำยางที่ได้มาอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C จนมีน้ำหนักคงที่ สารที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาล ซึ่งสามารถหาน้ำหนักโมเลกุลได้ด้วย Ubbelohde viscometer

3.5.2 การกราฟต์ maleic anhydride บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

นำยางธรรมชาติเหลวมาละลายในโทลูอีนที่อุณหภูมิ 80 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เติม benzoyl peroxide 3 phr และเติม maleic anhydride ปริมาณ 3 phr หรือ 9 phr พร้อมทั้งกวนอย่างต่อเนื่อง ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ระเหยโทลูอีนออก ตกตะกอนด้วยอะซีโตน แล้วอบในตู้อบสุญญากาศที่ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวทำละลายที่ตกค้าง [20] พิสูจน์เอกลักษณ์ ยางธรรมชาติเหลวที่ได้ด้วยเทคนิค FTIR และ ^{1}H-NMR และหาปริมาณการกราฟต์ด้วยการไตเตรตกับ 0.025 M KOH ใน methanol/benzyl alcohol (อัตราส่วน 1/9, v/v) โดยใช้ phenolphthalein ใน methanol เป็นอินดิเคเตอร์ [20]

3.5.3 การกราฟต์ vinyl silane บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

กราฟต์ vinyl silane (DMMS และ TMOS) ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยเติม copper sulphate 240 มิลลิกรัม Sulphuric acid 0.06 มิลลิลิตร N,N-dimethyl aniline 0.182 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 720 มิลลิลิตร ลงในขวด 3 คอขนาด 2 ลิตร ที่มีน้ำยางธรรมชาติอยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วเติม vinyl silane (9 phr หรือ 20 phr) ตามปริมาณที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 3 กวนของผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้น เพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 °C reflux โดยต่อกับ condenser พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ตกตะกอนด้วยเมธานอล แล้วอบ

ในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C จนน้ำหนักคงที่ นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ FTIR และ ^{1}H-NMR

ตารางที่ 3 ปริมาณ vinyl silane ที่ใช้ในการกราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

อักษรย่อ	ปริมาณ vinyl silane ที่ใช้ (g)	
	Dimethoxymethylvinylsilane	Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane
NR-g-DMMS 9 phr	2.70 (3.15 mL)	-
NR-g-DMMS 20 phr	6.00 (7.00 mL)	-
NR-g-TMOS 9 phr	-	2.70 (3.43 mL)
NR-g-TMOS 20 phr	-	6.00 (7.61 mL)

ตอนที่ 2 กระบวนการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.5.4 การผสมก่อนขึ้นรูปชิ้นงาน

นำแป้งมันสำปะหลัง 1 ถุง (980 g) เทใส่ลงในภาชนะสำหรับอบสารขนาด 27.5 x 40.0 x 4.5 cm^3 เกลี่ยให้เนื้อแป้งกระจายเต็มถาด แล้วนำเข้าตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ในระหว่างการอบจะมีปริมาณไอน้ำในตู้สูง จึงต้องทำการควบแน่นไอน้ำโดยใช้เครื่องปั๊มต่อเข้ากับ cooling ดูดไอในตู้ออกทุกๆ 12 ชั่วโมง

แป้งที่อบแล้วผสมกับยางธรรมชาติดัดแปรและกลีเซอรอล โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอล 25% (w/w) และยางธรรมชาติดัดแปร 5% (w/w) ดังตารางที่ 4 โดยใช้ TPS และ TPS/NR เป็นตัวอย่างควบคุม ผสมในถุงพลาสติก LDPE ถุงละ 50 กรัม เขย่าส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ใน desiccators ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงก่อนไปผสมในเครื่องผสมแบบภายใน (internal mixer) โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 50 rpm อุณหภูมิในการผสม 160 ºC เป็นเวลา 6 นาที

ตารางที่ 4 ปริมาณสารที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมชิ้นงาน

ลำดับที่	สูตร	ปริมาณส่วนผสม (g)		
		แป้งมันสำปะหลัง	กลีเซอรอล	ยางธรรมชาติดัดแปร
1	TPS	37.50	12.50	-
2	TPS/NR	35.62	11.88	2.50
3	TPS/NR-g-MA 3 phr	35.62	11.88	2.50
4	TPS/NR-g-MA 9 phr	35.62	11.88	2.50
5	TPS/NR-g-DMMS 9 phr	35.62	11.88	2.50
6	TPS/NR-g-DMMS 20 phr	35.62	11.88	2.50
7	TPS/NR-g-TMOS 9 phr	35.62	11.88	2.50
8	TPS/NR-g-TMOS 20 phr	35.62	11.88	2.50

3.5.5 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

นำแป้งที่ผสมด้วยเครื่อง internal mixer มาบดด้วยเครื่องบดดังแสดงในภาพที่ 7 จนกลายเป็นผงละเอียด

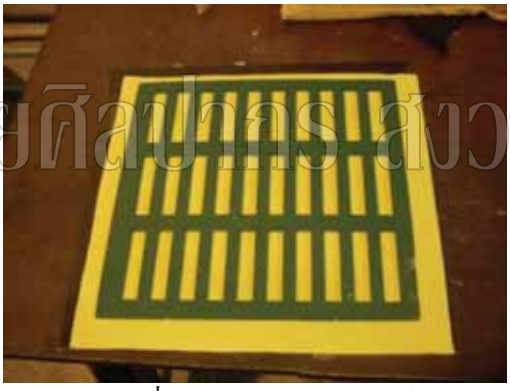
ภาพที่ 7 การนำแป้งที่ผ่านการผสมมาแล้วนำมาบดให้เป็นผง

ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะดังภาพที่ 7

1. เตรียมแม่พิมพ์

ภาพที่ 8 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ impact และ tensile

2. วางแผ่นเทฟล่อนลงบนแม่พิมพ์ประกบแผ่นล่าง จากนั้นวางแม่พิมพ์บนแผ่นเทฟล่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์ประกบแผ่นล่างและบน



ภาพที่ 9 การจัดวางแม่พิมพ์

3. ชั่งสารก่อนที่จะใส่ลงในแม่พิมพ์ โดยใช้สารประมาณ 120-125 กรัม ในกรณีที่ขึ้นรูปชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบ impact และใช้สารประมาณ 70-80 กรัม ในกรณีที่ขึ้นรูปชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบ tensile จากนั้นใส่สารลงในแม่พิมพ์ และเกลี่ยให้เสมอกันทั่วทั้งแม่พิมพ์

ภาพที่ 10 การใส่สารเข้าสู่แม่พิมพ์

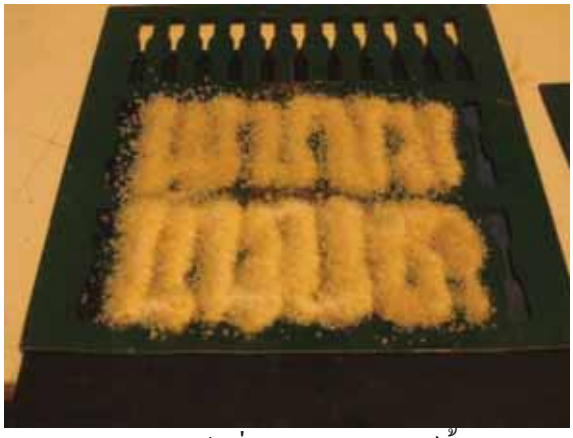
4. นำแผ่นเทฟล่อนมาวางประกบปิดก่อน แล้วจึงปิดประกบด้วยแผ่นปิดประกบแม่พิมพ์แผ่นบน

5. นำเข้าเครื่อง compression molding เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1. อุณหภูมิ 160 ºC แรงอัด 1500 pounds เป็นเวลา 15 นาที

ขั้นที่ 2. อุณหภูมิ 160 ºC แรงอัด 15,000 pounds เป็นเวลา 3 นาที

ขั้นที่ 3. อุณหภูมิ 160 ºC แรงอัด 23,000 pounds เป็นเวลา 2 นาที

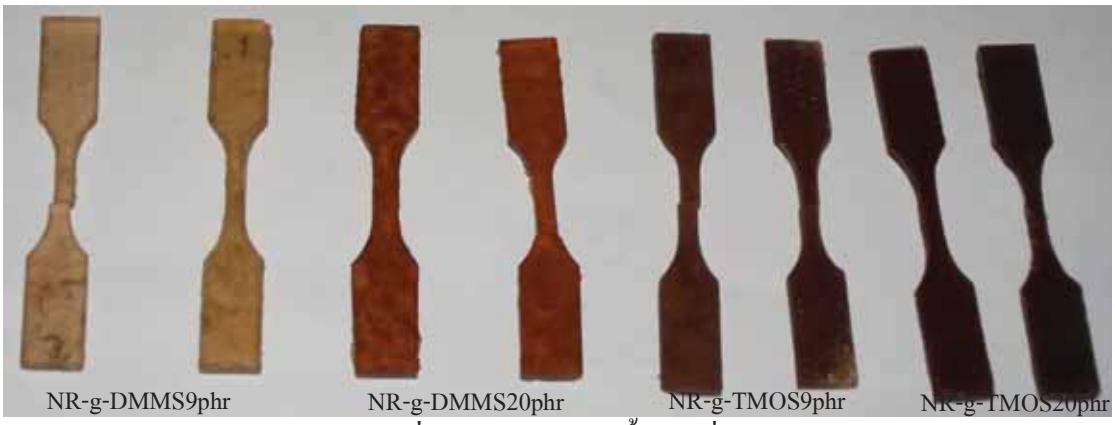


ภาพที่ 11 ลักษณะการเทแป้งที่บดลงในแม่พิมพ์ชิ้นงาน micro-tensile

6. รอให้อุณหภูมิ plate บน และ plate ล่างของเครื่อง compression molding เย็นลงเท่ากับ 60 °C (ประมาณ 5 นาที) แล้วจึงนำแม่พิมพ์ออกจาก compression molding จากนั้นแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ตัดแต่งชิ้นงานส่วนเกินออก ทับด้วยแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานโก่งงอ หลังจากชิ้นงานเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปเป็นไว้ใน desiccators เพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบต่อไป

ภาพที่ 12 ลักษณะที่ได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี compression molding

NR-g-MA



NR-g-DMMS9phr NR-g-DMMS20phr NR-g-TMOS9phr NR-g-TMOS20phr

ภาพที่ 13 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้

ตอนที่ 3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน thermoplastic starch

3.5.6.1 Impact testing (charpy impact) ตามมาตรฐาน ASTM D256

(1) ทดสอบชิ้นงานแบบ charpy impact โดยใช้ชิ้นงานสูตรละ 8-15 ชิ้น

(2) วัดความกว้าง ความหนา ของชิ้นงาน 3 ครั้ง แล้วแสดงเป็นค่าเฉลี่ย

(3) นำชิ้นงานไปทดสอบโดยยึดชิ้นงานให้แน่นที่ฐานของเครื่องทดสอบใช้ pendulum (ขนาด 4 Jules) แล้วปล่อย pendulum ให้ตกลงมากระทบชิ้นงาน

(4) บันทึกค่าพลังงานต่อพื้นที่ในหน่วย (J)

(5) คำนวณหาพลังงานต่อพื้นที่ (kJ/mm^2)

(6) หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

3.5.6.2 Tensile testing ทำตามมาตรฐาน ASTM D638

(1) วัดความกว้างความหนาของชิ้นงาน dumbbell Type V จำนวน 8-15 ชิ้น ของแต่ละสูตร ด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ โดยทำการวัด 3 ช่วง ในช่วง gauge length คือ ช่วงบน ช่วงกลาง ช่วงล่าง และบันทึกผลเป็นค่าเฉลี่ย

(2) กำหนด gauge length เท่ากับ 7.62 mm โดยกำหนดจุดด้วยปากกาสีขาวเพื่อให้กล้องของเครื่อง Instron Tensile Testing สามารถตรวจจับการดึงยืดของชิ้นงานได้

(2) นำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วการทดสอบ 1 mm/min โดยใช้ load cell ขนาด 5 kN ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้มาตรฐานของชิ้นงาน Type V

(3) บันทึกผลข้อมูลค่า Young's modulus, tensile strength และ percent strain at break

(4) นำข้อมูลมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลในแต่ละสูตร

(5) หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

3.5.7 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความร้อนของชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีน้ำหนัก 3-5 mg จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA โดยทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 50-500 ^{o}C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 ^{o}C/min จากผลการทดลองที่ได้จะได้ค่า Onset temperature (อุณหภูมิเริ่มสลายตัว) และ Inflection point temperature (อุณหภูมิเฉลี่ยของการสลายตัวของสาร)

ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบดูว่าการใส่ยางธรรมชาติดัดแปรลงไปใน thermoplastic starch ทำให้สมบัติการต้านทานต่อความร้อนของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่

3.5.8 การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง ทั้งชิ้นงานควบคุมและชิ้นงานที่ผสมยางดัดแปรชนิดต่างๆ โดยการนำชิ้นงานไปจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว จากนั้นหักชิ้นงานแล้วนำไปเก็บไว้ใน desiccators ทันที นำชิ้นงานติดลงบนแผ่น slit สำหรับทดสอบด้วยเทคนิค SEM นำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำเป็นเวลา 30 นาทีก่อนทำการทดสอบ ในการวิเคราะห์ผลจะใช้กำลังขยายที่ 250 เท่า และ 500 เท่า แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 20 kV

บทที่ 4

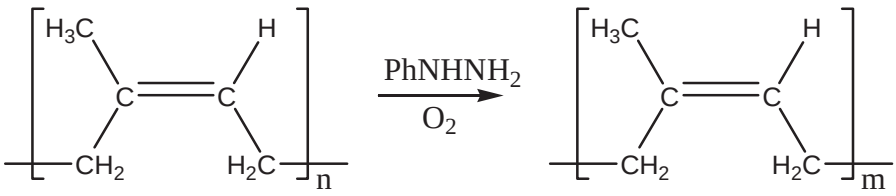
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางด้านโครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR

4.1.1 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย maleic andhydride

ยางธรรมชาติเหลวที่ได้จากการลดน้ำหนักโดยใช้ออกซิเจนและ phenylhydrazine เมื่อนำมาหาน้ำหนักโมเลกุลตามสมการ Mark-Houwink equation โดย k เท่ากับ 17.4 x 10^3 ml/g และ a เท่ากับ 0.74 สำหรับยางธรรมชาติ ใน toluene (Bristow, 1995) ได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย M_v เท่ากับ 7.9 x 10^3 จากเดิมซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 8.5 x 10^5

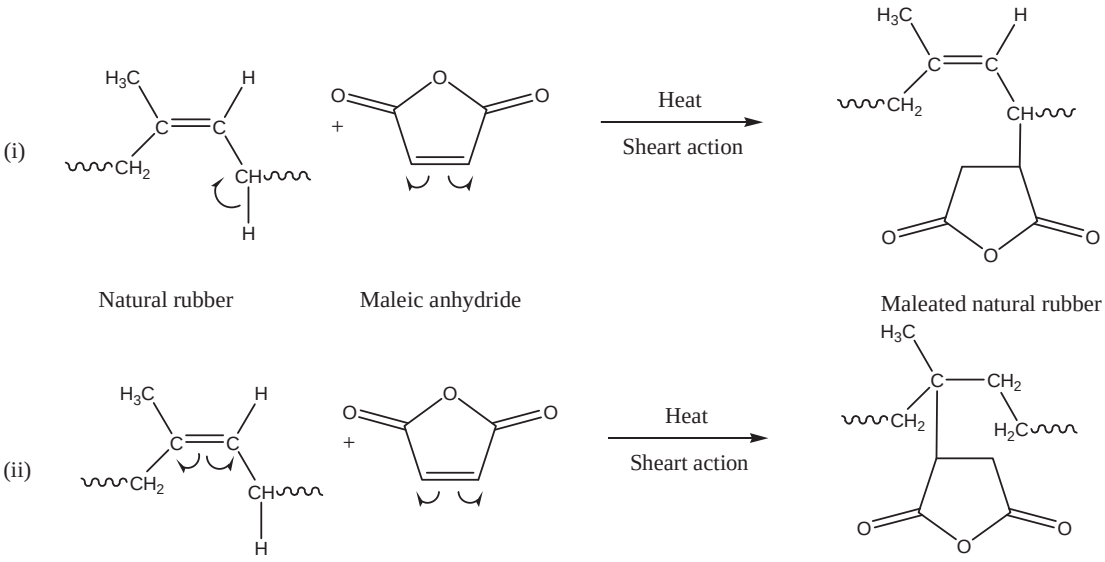
ภาพที่ 14 ลักษณะของยางธรรมชาติเหลวที่ได้



ภาพที่ 15 กลไกการเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติโดยใช้ออกซิเจนและ phenylhydrazine [11]

จากการทดลองสามารถเตรียมยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย maleic anhydride (NR-g-MA หรือ MNR) ได้ โดยการใช้ benzoyl peroxide ระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยาคือ 3 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณการเกิดกราฟต์จะแปรผันไปตามปริมาณ maleic anhydride ที่ใช้

โครงสร้างที่เป็นไปได้ของยาง maleated natural rubber ตามปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

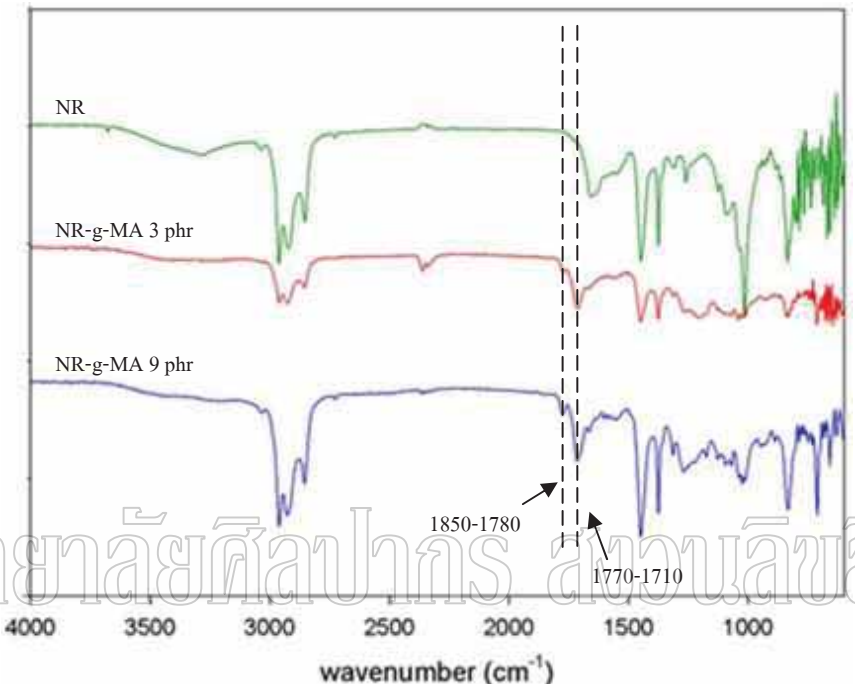


ภาพที่ 16 Free radical mechanism การเกิดปฏิกิริยากราฟต์ maleic anhydride ลงบนยางธรรมชาติ [20]

จากสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์ทางโครงสร้างทางเทคนิค FT-IR ในโหมด TR จะพบแถบการดูดกลืนสำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่นดังต่อไปนี้

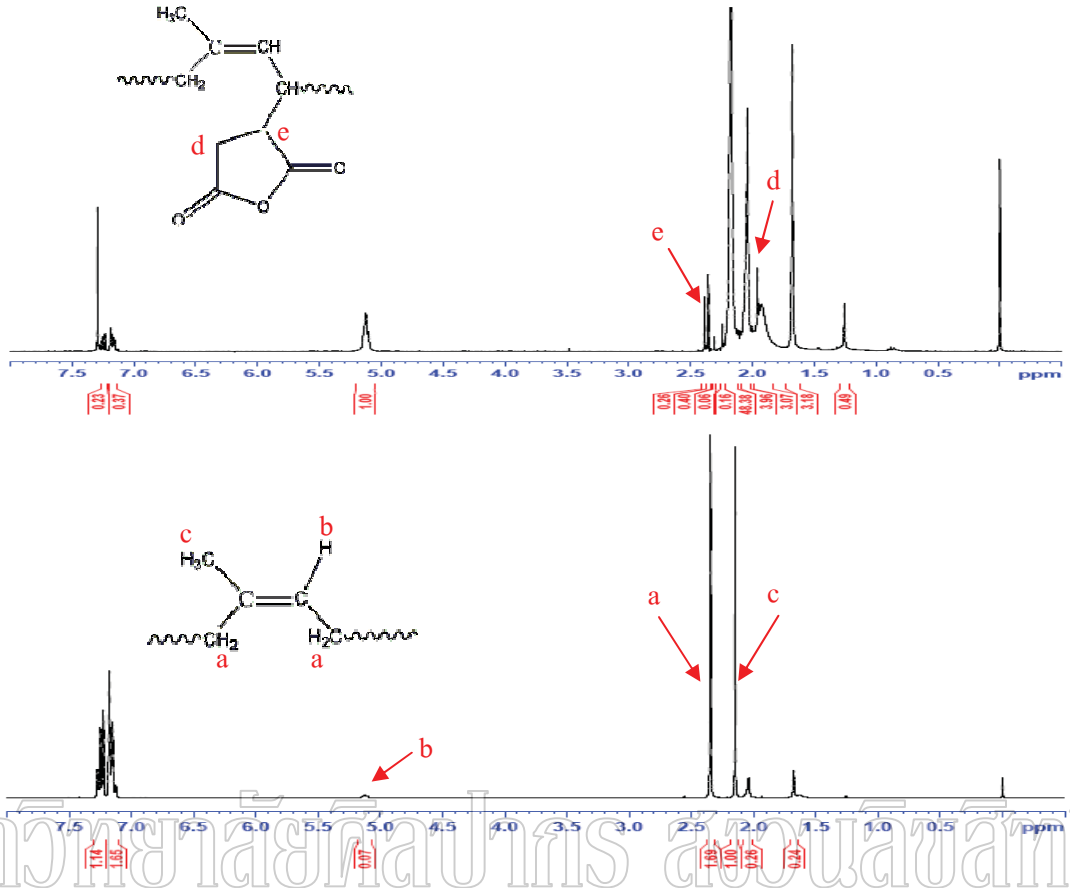
3285 cm^{-1}	คือ	O-H และ N-H stretching (เป็นหมู่ฟังก์ชัน amide ของโปรตีนที่มีอยู่ในน้ำยางธรรมชาติ)
2962 cm^{-1}	คือ	C-H stretching ($-CH_3$)
2856 cm^{-1}	คือ	C-H stretching ($-CH_2$)
1663 cm^{-1}	คือ	C=C stretching,
1535 cm^{-1}	คือ	N-H (2° vibration)
1447 cm^{-1}	คือ	C-H bending ($-CH_2$)
1372 cm^{-1}	คือ	C-H bending ($-CH_3$)
830 cm^{-1}	คือ	C=C bending

หลังจากนำ maleic anhydride มากราฟต์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ พบพีคของ anhydride ที่ 1850 – 1780 cm^{-1} และ 1770 – 1710 cm^{-1} [23] ซึ่งแสดงว่าเกิดการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติจริง ความเข้มของพีคดังกล่าวแสดงถึงปริมาณการกราฟต์ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 17 FT-IR spectra ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic andride ที่ 3 phr หรือ 9 phr

และเมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่าเกิดพีค chemical shift ที่ตำแหน่ง 2.35 ppm, 2.16 ppm และ 5.1 ppm ซึ่งเป็นแสดงโปรตอนของหมู่ CH_2, CH_3 และ CH ในยางธรรมชาติตามลำดับ และพบพีคที่ chemical shift ประมาณ 1.95 ppm และ 2.4 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่ตำแหน่ง CH_2 และ CH ของ maleic anhydride ตามลำดับ แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนยางธรรมชาติเหลวจริง



ภาพที่ 18 ^{1}H-NMR spectrum แสดงผลของการกราฟต์ maleic anhydride บนยางธรรมชาติ

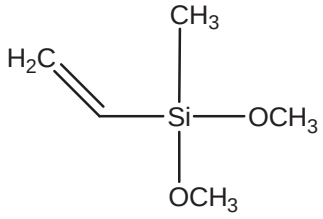
chemical shift ที่แสดงถึงโปรตอนของยางธรรมชาติเหลวและโปรตอนของ maleic anhydride ซ้อนเหลื่อมกัน จึงไม่สามารถหาปริมาณการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลวจาก ^{1}H-NMR spectrum แต่ยังสามารถหาปริมาณการกราฟต์ได้จากการไตเตรต

เมื่อหาปริมาณการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลว ด้วยการไตเตรตกับ KOH โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ [19] โดยทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย พบว่าเมื่อใส่ maleic anhydride ตอนเริ่มต้นทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการกราฟต์จะเพิ่มขึ้น คือ เมื่อใช้ maleic anhydride 3 phr และ 9 phr เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ (% grafting) จะมีค่าเท่ากับ 0.90±0.08 และ 2.36±0.25 ตามลำดับ การที่มีหมู่ anhydride บนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลวเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl ของแป้งมีมากขึ้น

4.1.2 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย vinyl silane

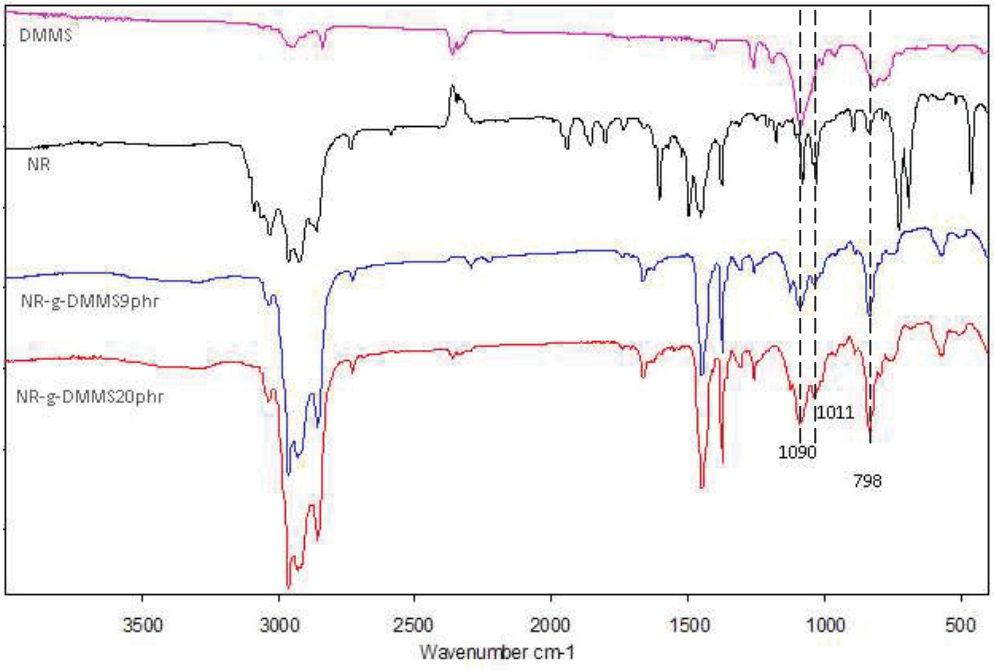
จากการทดลองสามารถเตรียมยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย vinyl silane คือ Dimethoxymethylvinylsilane หรือ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ได้ โดยใช้ระบบรีดอกซ์ของ cupric salt/N,N-dimethyl aniline ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ใช้ vinyl silane ที่ 9 phr และ 20 phr

(A) ***ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane (DMMS-g-NR)***



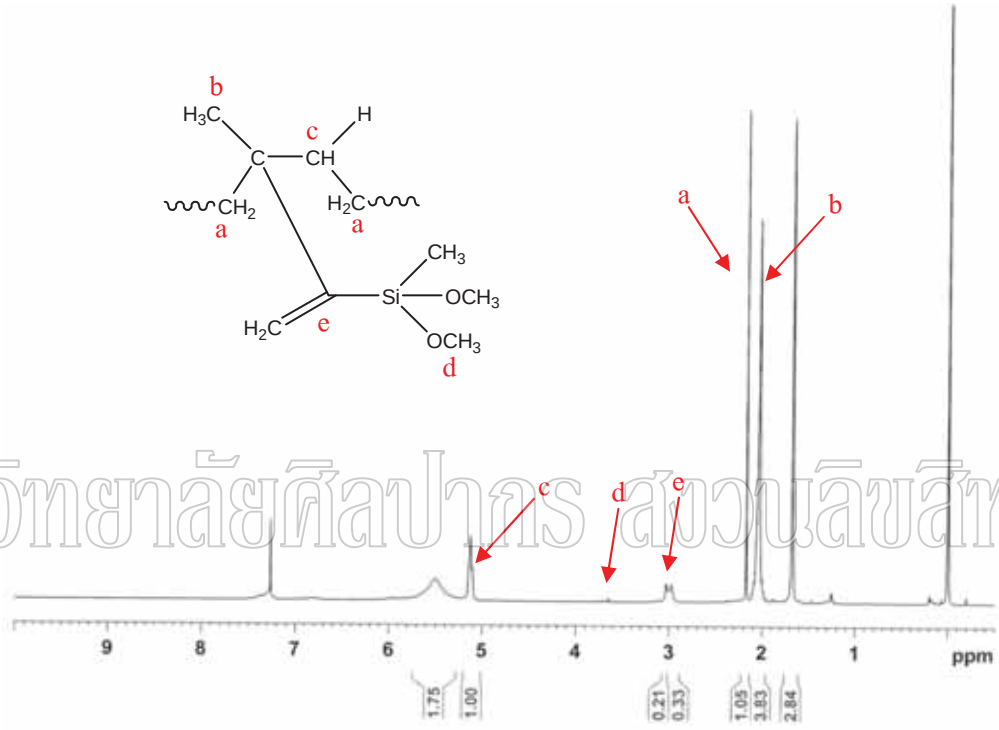
ภาพที่ 19 โครงสร้างโมเลกุลของ Dimethoxymethylvinylsilane

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ในโหมด TR ซึ่งแสดงผลดังภาพที่ 20 พบพีคที่สำคัญที่แสดงถึงการกราฟต์ของ Dimethoxymethylvinylsilane บนโมเลกุลยางธรรมชาติ คือ 798, 1011, 1090 และ 3300 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง Si-O-C stretching, Si-OH ตามลำดับ [24-25] แสดงว่าเกิดการกราฟต์ Dimethoxymethylvinylsilane ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ



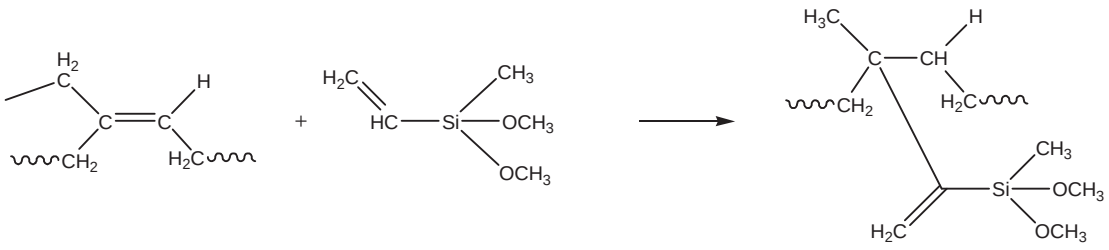
ภาพที่ 20 FT-IR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane

เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่าเกิดพีค chemical shift ที่ตำแหน่ง 2.35 ppm, 2.16 ppm และ 5.1 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงโปรตอนของหมู่ CH_2, CH_3 และ CH ในยางธรรมชาติตามลำดับ และพบพีคที่ chemical shift ประมาณ 3.64 ppm และ 3.0 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่ตำแหน่ง CH_3 และ CH ของ Dimethoxymethylvinylsilane ตามลำดับ แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ Dimethoxymethylvinylsilane ลงบนยางธรรมชาติเหลวจริง

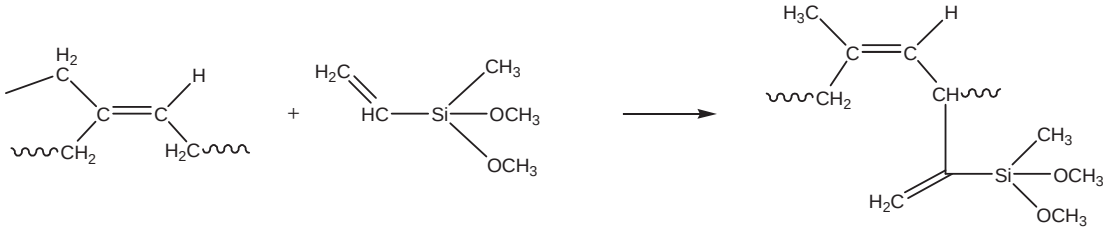


ภาพที่ 21 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane 20 phr (NR-g-DMMS 20 phr)

ปฏิกิริยาการกราฟต์ DMMS ลงบนยางธรรมชาติ จึงน่าจะเป็นไปตามภาพที่ 22



NR DMMS NR-g-DMMS

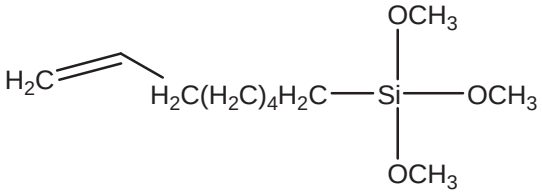


NR DMMS NR-g-DMMS

ภาพที่ 22 ปฏิกิริยาการกราฟต์ DMMS ลงบนยางธรรมชาติ

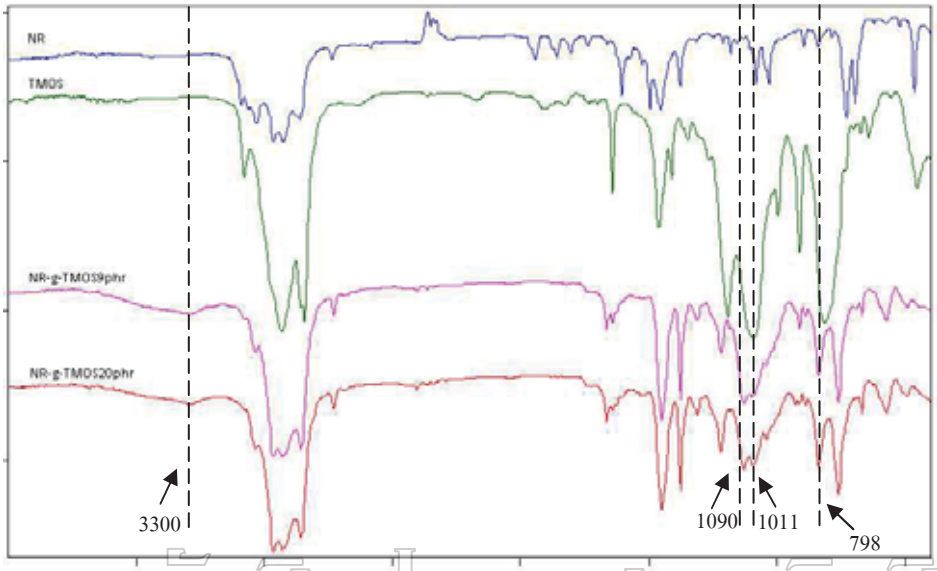
การหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์สามารถหาได้จากการเทียบความเข้มของ $A_{1090}/A_{2800\text{-}2900}$ [24] โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การกราฟต์เมื่อใช้ Dimethoxymethylvinylsilane 9 phr และ 20 phr เท่ากับ 29.18% และ 35.50% ตามลำดับ การที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้น และมีหมู่ silanol เพิ่มขึ้น จะเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับ thermoplastic starch ได้มากขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างหมู่ silanol และ –OH ของแป้งได้มากขึ้น

(B) ***ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane (TMOS-g-NR)***



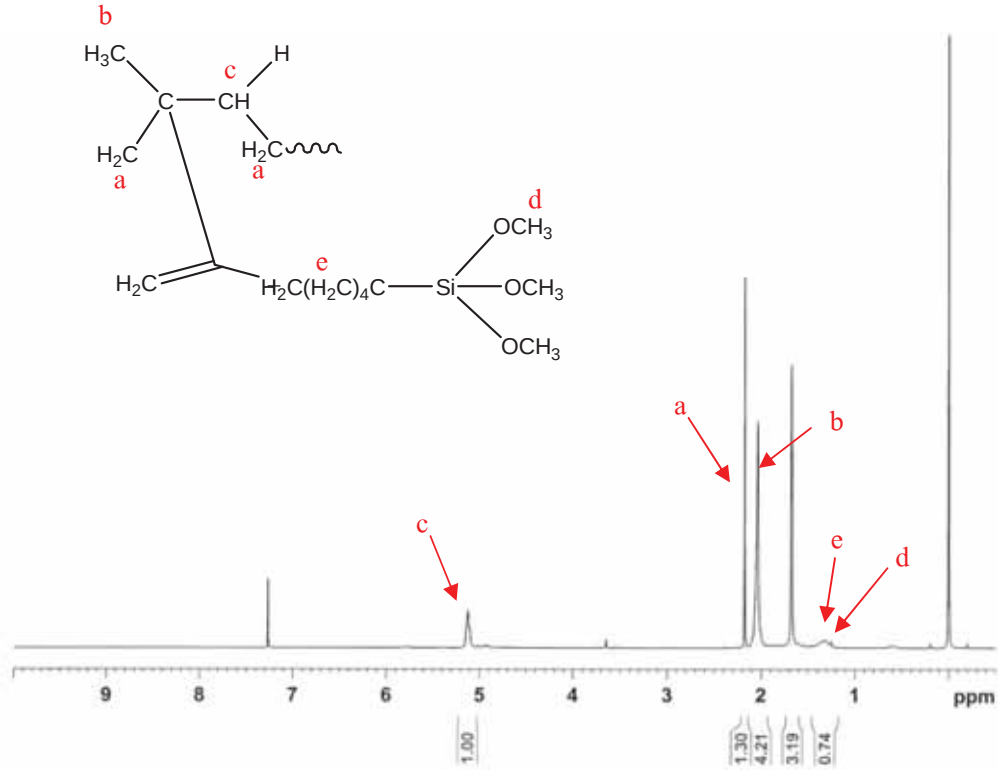
ภาพที่ 23 โครงสร้างโมเลกุลของ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ในโหมด TR ดังแสดงดังภาพที่ 24 ซึ่งพบพีคที่สำคัญที่แสดงถึงการกราฟต์ของ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane บนโมเลกุลยางธรรมชาติ คือ 798, 1011, 1090 และ 3300 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง Si-O-C stretching, Si-OH ตามลำดับ [24-25]



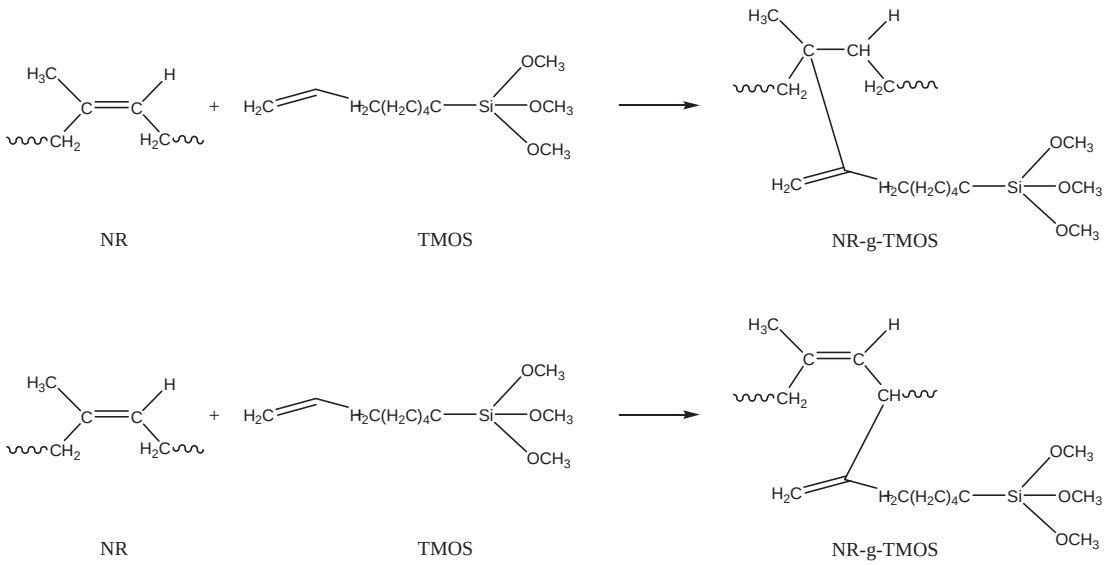
ภาพที่ 24 FT-IR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane

เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่าเกิดพีค chemical shift ที่ตำแหน่ง 2.35 ppm, 2.16 ppm และ 5.1 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงโปรตอนของหมู่ CH_2, CH_3 และ CH ในยางธรรมชาติตามลำดับ และพบพีคที่ chemical shift ประมาณ 1.31 ppm และ 1.25 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่ตำแหน่ง CH_3 และ CH_2 ของ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ตามลำดับ แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ลงบนยางธรรมชาติเหลวจริง



ภาพที่ 25 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 20 phr (NR-g-TMOS 20 phr)

ปฏิกิริยาการกราฟต์ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นไปดังภาพที่ 26

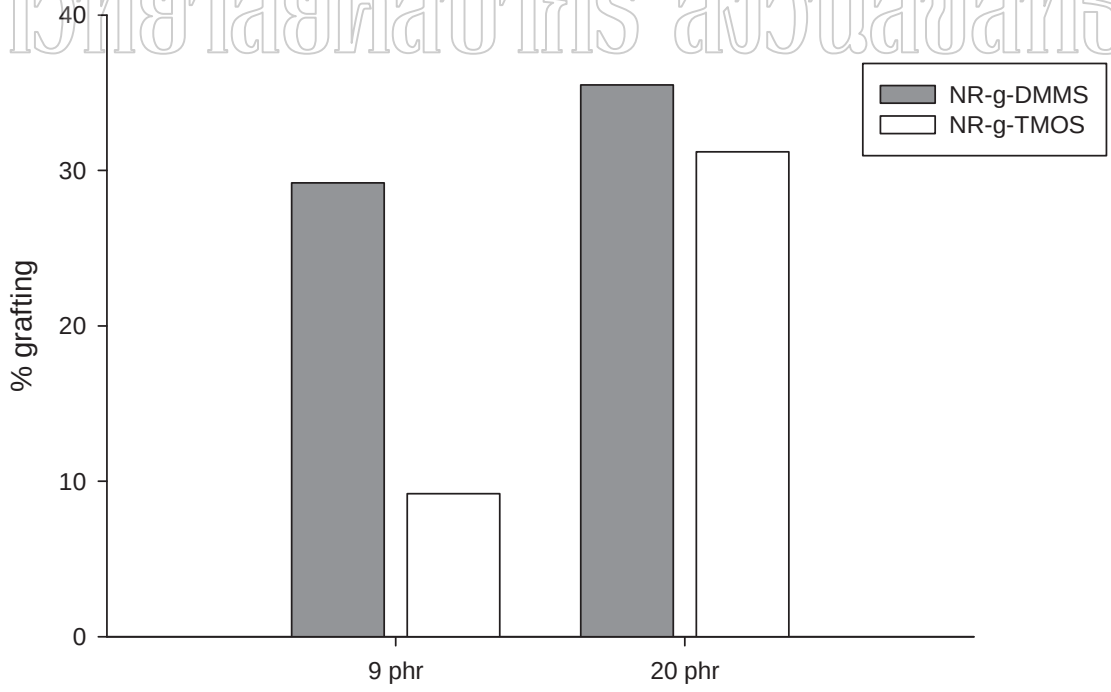


ภาพที่ 26 ปฏิกิริยาการกราฟต์ TMOS ลงบนยางธรรมชาติ

การหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์สามารถหาได้จากการเทียบความเข้มของ $A_{1090}/A_{2800\text{-}2900}$ [24] โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การกราฟต์เมื่อใช้ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 9 phr และ 20 phr เท่ากับ 9.16% และ 31.23% ตามลำดับ การที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์เพิ่มขึ้น และมีหมู่ silanol เพิ่มขึ้น จะเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับ thermoplastic starch ได้มากขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างหมู่ silanol และ –OH ของแป้ง

ตารางที่ 5 ปริมาณการกราฟต์ vinyl silane ลงบนยางธรรมชาติ

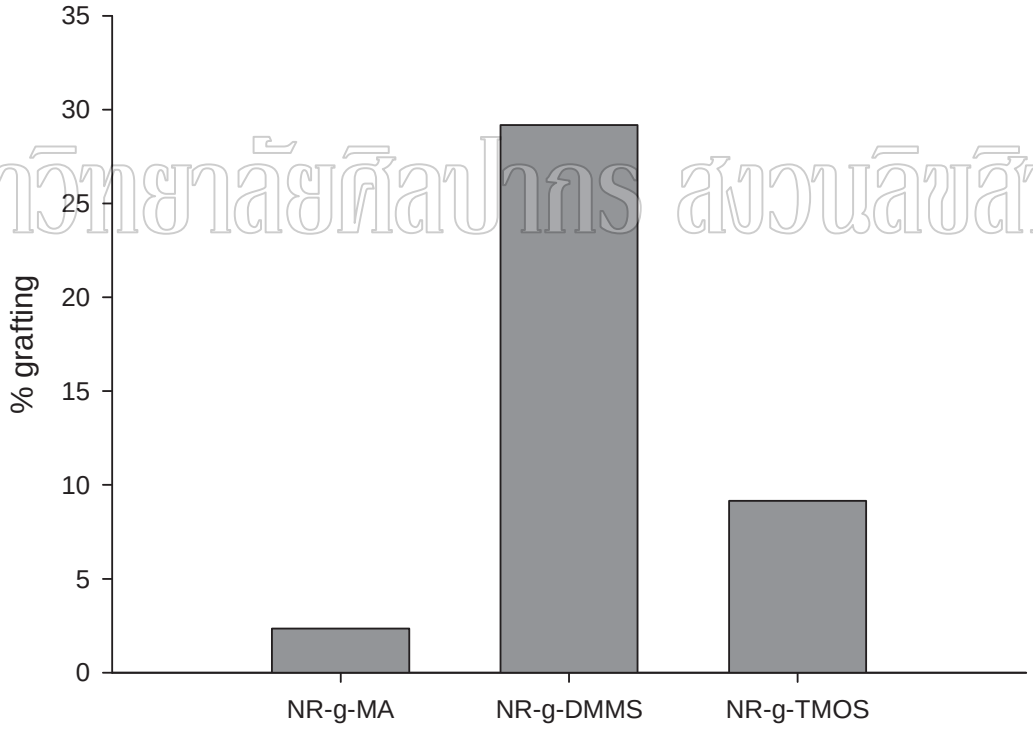
สูตรยางธรรมชาติดัดแปร	ปริมาณการกราฟต์ (%)
NR-g-DMMS 9 phr	29.18%
NR-g-DMMS 20 phr	35.50%
NR-g-TMOS 9 phr	9.16%
NR-g-TMOS 20 phr	31.23%



ภาพที่ 27 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการกราฟต์ vinyl silane ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติเมื่อใช้ vinyl silane 9 phr หรือ 20 phr

เมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ระหว่าง Dimethoxymethylvinylsilane กับ Trimethoxy (7-octen-1-yl)silane ทั้งที่ 9 phr และ 20 phr จะพบว่า เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ Dimethoxymethylvinylsilane มีค่ามากกว่า เนื่องจาก โมเลกุลมีขนาดเล็กกว่า จึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่กว่า

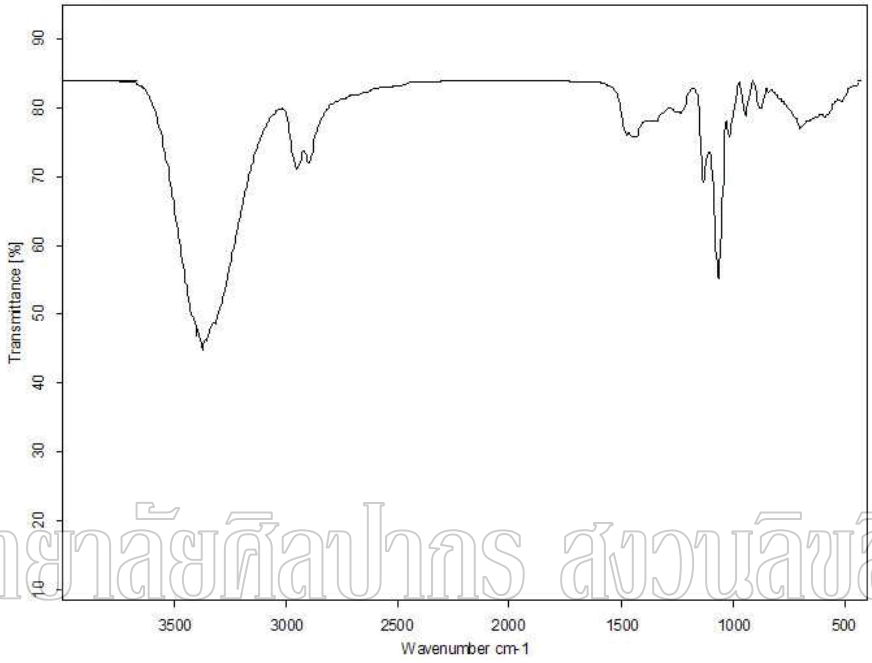
และเมื่อเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride, DMMS และ TMOS ที่ 9 phr พบว่ามี % grafting เท่ากับ 2.36%, 29.18% และ 9.16% ตามลำดับ ซึ่งบอกเป็นนัยว่า DMMS มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์กับยางธรรมชาติมากกว่า เนื่องจากมีโมเลกุลขนาดเล็ก และ maleic anhydride มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติน้อยที่สุด เนื่องจากต้องผ่านขั้นตอนการแตกพันธะคู่ในวง maleic ก่อนทำปฏิกิริยากับยาง ส่วน DMMS และ TMOS นั้นมีพันธะคู่อยู่ที่ปลายโมเลกุล จึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่านั่นเอง



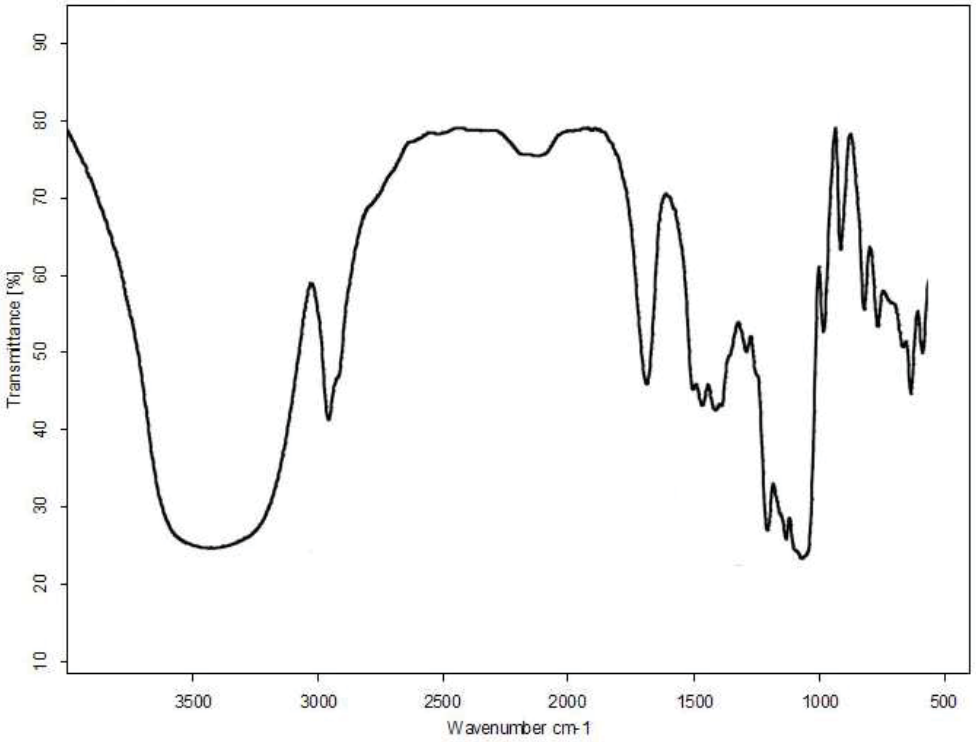
ภาพที่ 28 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการกราฟต์ MA, DMMS และ TMOS ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ จำนวน 9 phr

ผลการทดสอบ FT-IR ของชิ้นงาน TPS ผสมยางธรรมชาติดัดแปร

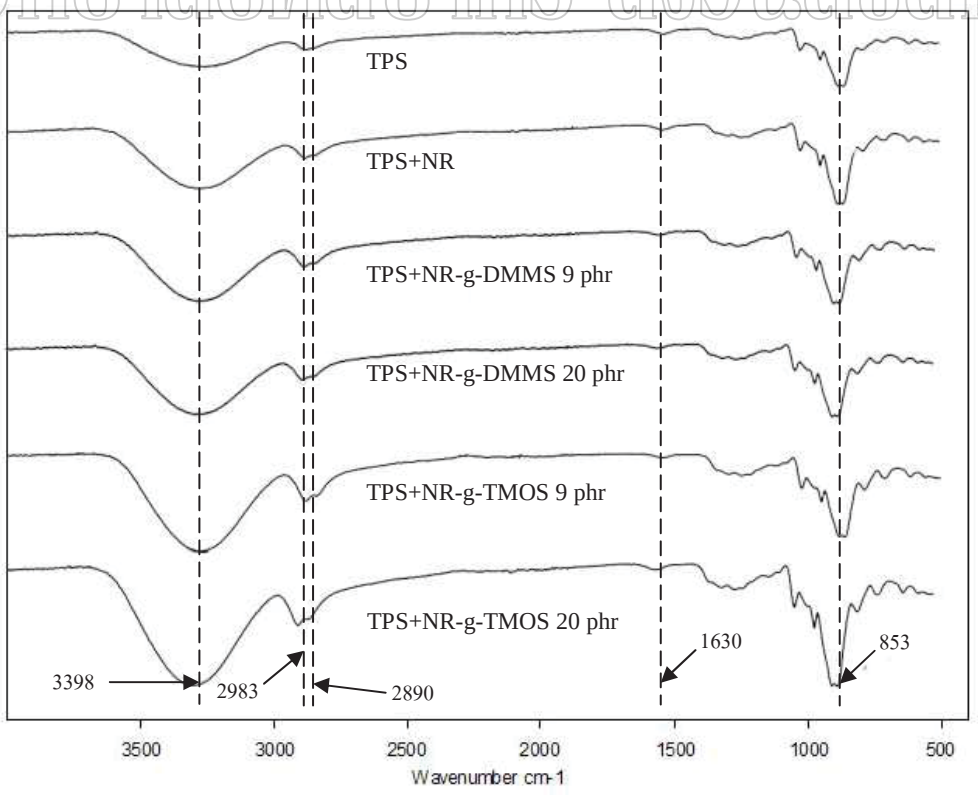
เมื่อนำสารตั้งต้นและชิ้นงานที่ได้มาทดสอบด้วยเทคนิค FTIR โดยในกรณีของชิ้นงานตัวอย่าง TPS นั้น จะนำชิ้นงานมาบดให้ละเอียด แล้วทดสอบโดยใช้เซลล์ KBR พบว่า ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 29-31



ภาพที่ 29 FT-IR spectrum ของกลีเซอรอล



ภาพที่ 30 FT-IR spectrum ของแป้งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 31 FT-IR spectrum ของชิ้นงาน TPS ผสมยางธรรมชาติดัดแปร

จากภาพที่ 31 จะพบความแตกต่างของ spectrum เล็กน้อย ที่ประมาณเลขคลื่นในช่วง 1000-1200 cm^{-1} และในช่วง 1500-1700 cm^{-1} เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลง silanol group และ OH group ของแป้ง ซึ่งการที่พบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนี้เป็นผลมาจาก % grafting ที่ต่ำ และปริมาณยางที่ใช้ในการผสมมีเพียง 5% ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงใน FT-IR spectra ได้น้อยมากนั่นเอง

4.2 สมบัติในการต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน

ชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride

จากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกแบบ charpy ตามมาตรฐาน ASTM D256 ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride พบว่าได้ค่าดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ในชิ้นงานที่มียางธรรมชาติผสมอยู่จะมีค่า impact strength สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มียางผสมอยู่ (TPS) คือ ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกระแทกมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง จึงทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงกระแทก และเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น พบว่า impact strength มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากการกราฟต์ด้วย maleic anhydride จะช่วยเพิ่ม interaction ให้กับโมเลกุลของยางธรรมชาติและแป้ง ทำให้แป้งและยางธรรมชาติเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติจึงสามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น

ตารางที่ 6 สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานผสม MNR

ชิ้นงาน	Impact strength (kJ/m^2)
TPS	0.8 ± 0.10^{a}
TPS+NR	1.1 ± 0.25^{b}
TPS+MNR3phr	1.4 ± 0.40^{c}
TPS+MNR9phr	1.9 ± 0.36^{d}

[a-d] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane

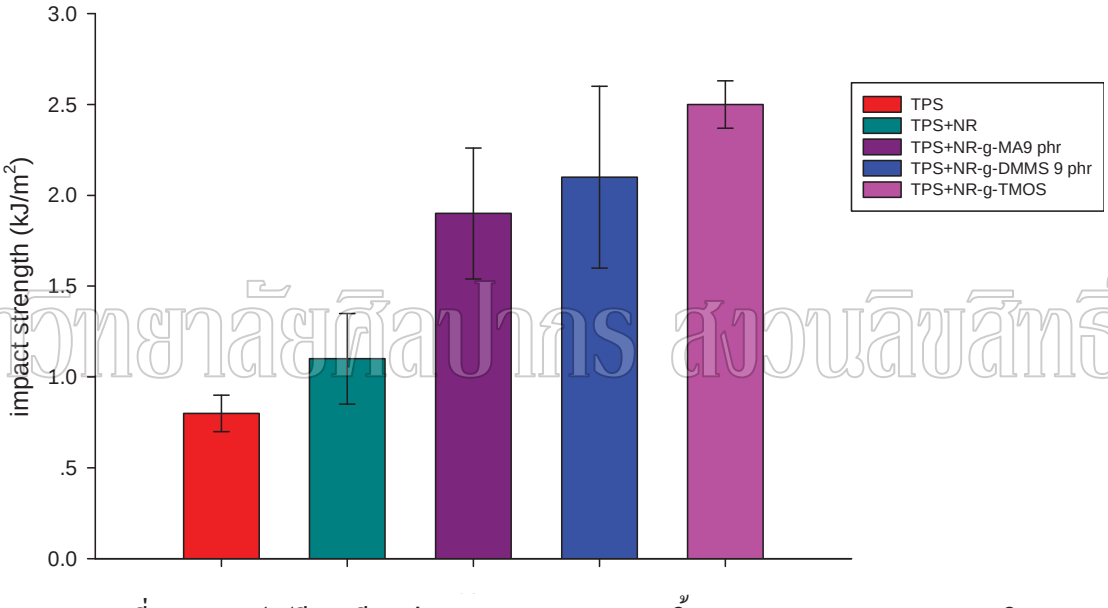
จากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกแบบ charpy ตามมาตรฐาน ASTM D256 ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane พบว่าได้ค่าดังตารางที่ 7 จะเห็นได้ในชิ้นงานที่มียางธรรมชาติผสมอยู่จะมีค่า impact strength สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มียางผสมอยู่ (TPS) คือ ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงกระแทกมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง จึงทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงกระแทก และเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น พบว่า impact strength มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากการกราฟต์ด้วย vinyl silane จะช่วยเพิ่ม interaction ให้กับโมเลกุลของยางธรรมชาติและแป้ง จากหมู่ silanol ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดแรงกระทำกับ –OH ของแป้งได้ ทำให้แป้งและยางธรรมชาติเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติจึงสามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่อผสม NR-g-TMOS ทั้งที่ผ่านการกราฟต์ 9 phr และ 20 ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากกว่าการผสม NR-g-DMMS แม้ว่า NR-g-TMOS จะมีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ต่ำกว่า NR-g-DMMS แต่เนื่องจาก TMOS มี methoxy group มากกว่า ซึ่งจะทำให้เกิด silanol group มากกว่า จึงเกิดแรงกระทำกับ –OH ของแป้งได้มากกว่านั่นเอง

ตารางที่ 7 สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานผสม NR-g-vinyl silane

ชิ้นงาน	Impact strength (kJ/m^2)
TPS	0.8 ± 0.10^{a}
TPS+NR	1.1 ± 0.25^{b}
TPS+NR-g-DMMS9phr	2.1 ± 0.50^{c}
TPS+NR-g-DMMS20phr	2.3 ± 0.42^{d}
TPS+NR-g-TMOS9phr	2.5 ± 0.13^{e}
TPS+NR-g-TMOS20phr	2.6 ± 0.38^{f}

$^{a\text{-}f}$ ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

และเมื่อเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride, DMMS และ TMOS ที่ 9 phr พบว่ามีค่า impact strength เท่ากับ 1.9±0.36 kJ/m^2, 2.1±0.50 kJ/m^2 และ 2.5±0.13 kJ/m^2 ตามลำดับ ชี้ให้เห็นว่า TMOS ทำให้ชิ้นงานมี impact strength มากกว่า maleic anhydride และ DMMS แม้ว่า TMOS จะเกิดการกราฟต์กับยางธรรมชาติได้น้อยกว่า DMMS แต่เนื่องจาก TMOS มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า จึงมี free volune มากกว่า ทำให้มีความยืดหยุ่น และยังมี methoxy group มากกว่า ซึ่งอาจจะทำให้เกิด silanol group มากกว่า จึงเกิดแรงกระทำกับ –OH ของแป้งได้มากกว่านั่นเอง



ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบค่า impact strength ของชิ้นงาน TPS ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย MA, DMMS และ TMOS 9 phr

4.3. สมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงาน

ชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride

เมื่อทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride 3 phr หรือ 9 phr ตามมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าได้ค่าแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)*	Tensile strength (MPa)*	% strain at break*
TPS	1,688± 128.9[a]	6.44±0.30[a]	0.84±0.16[a]
TPS+NR	1,616± 80.8[b]	10.56±2.58[b]	0.99±0.09[b]
TPS+NR-g-MA 3 phr	1,260±16.6[c]	8.2±0.82[c]	1.02±1.25[b]
TPS+NR-g-MA 9 phr	1,420±21.9[d]	10.6±0.88[b]	1.05±0.27[c]

[a-c] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมยางธรรมชาติลงใน TPS พบว่า ค่า Young's modulus และค่า tensile strength ลดลง แต่ค่า % strain มีค่ามากขึ้น แสดงว่าชิ้นงานมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ต่ำ มีความแข็งเปราะลดลง เนื่องจากการมีโมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างที่ต่ำผสมอยู่ในระบบ ทำให้ค่า Young's modulus ต่ำ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีอุณหภูมิสภาวะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ต่ำกว่าสภาวะการทดสอบ (Loadman, 1985) โมเลกุลยางจึงมีความสามารถในการเคลื่อนไหวสายโซ่ได้มาก มีความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเปราะลดลง

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ สมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดควรเพิ่มขึ้น เมื่อมียางธรรมชาติอยู่ในระบบ แต่จากผลการทดลองนั้นไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน

ชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane

เมื่อทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS หรือ TMOS ที่ 3 phr หรือ 9 phr ตามมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าได้ค่าแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงาน TPS ที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)*	Tensile strength (MPa)*	% strain at break*
TPS	1,688± 128.9[a]	6.44±0.30[a]	0.84±0.16[a]
TPS+NR	1,616±80.8[b]	10.56±2.58[b]	0.99±0.09[b]
TPS+NR-g-DMMS 9 phr	1,429±17.9[c]	12.60±0.88[c]	1.15±0.30[c]
TPS+NR-g-DMMS 20 phr	1,168±161.7[d]	14.06±0.04[d]	1.16±0.16[c]
TPS+NR-g-TMOS 9 phr	1,369±125.4[e]	12.36±2.24[e]	1.08±0.19[e]
TPS+NR-g-TMOS 20 phr	1,517±247.8[f]	14.14±0.62[d]	1.23±0.02[f]

[a-f] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

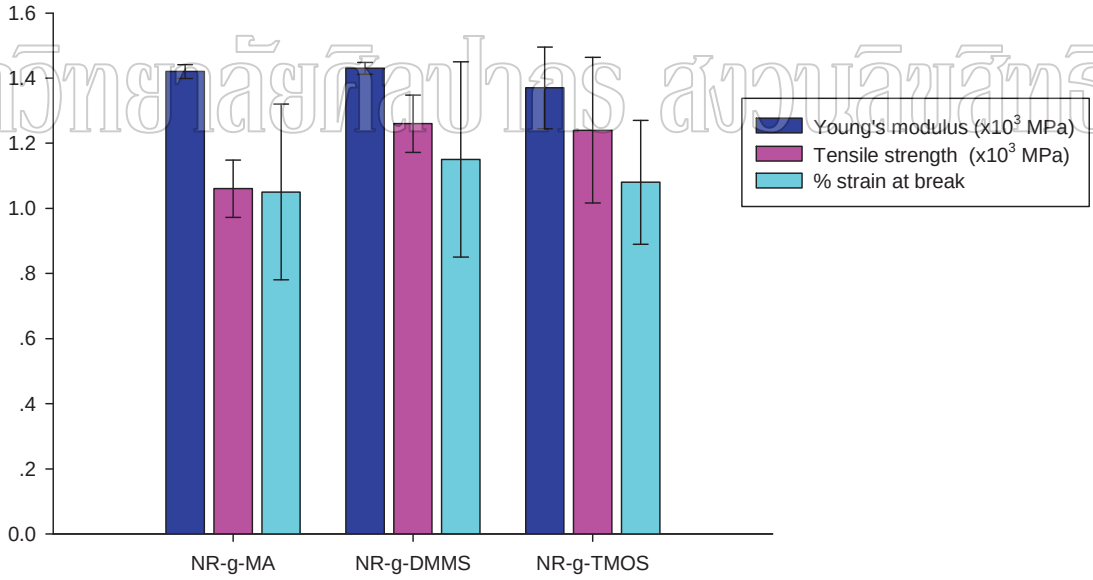
จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสม TPS ด้วย ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane พบว่า ทำให้ % strain at break เพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงาน TPS ธรรมดา แสดงความการผสมยางธรรมชาติดัดแปรทำให้ชิ้นงานยืดได้มากขึ้น และพบว่ามี tensile strength เพิ่มมากขึ้น แสดงว่ามีความต้านทานต่อการดึงยืดมากขึ้น ส่วนค่า Young modulus ลดลง เนื่องจากการมียางทำให้ยางธรรมชาติดัดแปรอยู่ใน TPS ทำให้ชิ้นงานยืดตัวได้มากขึ้น ซึ่ง Young's modulus เป็นสัดส่วนของ stress/strain เมื่อชิ้นงานยืดตัวได้มากขึ้นจึงมีค่า Young's modulus ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการกราฟต์ด้วย DMMS 9 phr และ 20 phr ซึ่งมี %grafting เท่ากับ 29.18% และ 35.50% ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานมี % strain at break และ tensile strength เพิ่มขึ้นเมื่อ% grafting เพิ่มขึ้น และมีค่า modulus ลดลง เนื่องจากการมียางทำให้ยางธรรมชาติดัดแปรอยู่ใน TPS ทำให้ชิ้นงานยืดตัวได้มากขึ้น ซึ่ง Young's modulus เป็นสัดส่วนของ stress/strain เมื่อชิ้นงานยืดตัวได้มากขึ้นจึงมีค่า Young's modulus ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการกราฟต์ด้วย TMOS 9 phr และ 20 phr ซึ่งมี %grafting เท่ากับ 9.16% และ 31.23% ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานมี % strain at break และ tensile strength เพิ่มขึ้นเมื่อ% grafting เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมียางทำให้ยางธรรมชาติดัดแปรอยู่ใน TPS ทำให้ชิ้นงานยืดตัวได้มากขึ้น และค่า modulus เพิ่มขึ้น เนื่องจาก TMOS มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า จึงมี free volune มากกว่า ทำให้มีความยืดหยุ่น และยังมี methoxy group ซึ่งจะเกิดเป็น silanol group ได้มากกว่า DMMS และยังมี % grafting แตกต่างกันมากเมื่อกราฟต์ด้วย TMOS 9 phr หรือ 20 phr

เมื่อมี silanol group มาก ก็จะสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับ –OH group ของแป้งได้มากกว่า จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่านั่นเอง

และเมื่อเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride, DMMS และ TMOS ที่ 9 phr ดังแสดงในภาพที่ 34 พบว่า มีค่า tensile strength และ% strain at break ของชิ้นงานที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane มีค่ามากกว่าที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride โดยชิ้นงานที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS มีค่า tensile strength และ% strain at break สูงกว่าที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS ที่ 9 phr แม้ว่า TMOS จะมี methoxy group มากกว่า ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับ –OH group ของยางได้มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาที่ % grafting จะพบว่า % grafting ของ TMOS มีค่าต่ำกว่า % grafting ของ DMMS มาก โดยมีค่าเท่ากับ 9.16% และ 29.18% ตามลำดับ ส่วนค่า Young's modulus นั้น ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน เนื่องจากมี % grafting ที่ต่างกันมากนั้นเอง



ภาพที่ 33 สมบัติการต้านทานต่อการดึงยืดของชิ้นงานผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย MA, DMMS และ TMOS ที่ 9 phr

4.4 การยืนยันผลการทดลองสมบัติเชิงกลด้วย One Way ANOVA

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ย Young's modulus, tensile strength, % strain at break และค่าเฉลี่ย impact strength ของสูตรต่างๆ จะนำมาเปรียบเทียบโดยใช้ ANOVA และ Duncan's multiple range tests ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) ทำให้ทราบว่าในแต่ละสูตรให้ค่าเฉลี่ยที่มีค่าแตกต่างกันหรือไม่

เมื่อนำสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS มาวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS ทำให้ค่า Young's modulus, tensile strength, % strain at break และ impact strength ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าต่างๆ เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 10 ตารางเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% strain at break	Impact strength (kJ/m^2)
TPS+NR	1,616±80.8[a]	10.56±2.58[a]	0.99±0.09[a]	1.1±0.25[a]
TPS+NR-g-DMMS 9 phr	1,429±17.9[b]	12.60±0.88[b]	1.15±0.30[b]	2.1±0.50[b]
TPS+NR-g-DMMS 20 phr	1,168±161.7[c]	14.06±0.04[c]	1.16±0.16[b]	2.3±0.42[c]

[a-c] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อนำสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS มาวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS ทำให้ค่า Young's modulus, tensile strength, % strain at break และ impact strength ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าต่างๆ เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 11 ตารางเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% strain at break	Impact strength (kJ/m^2)
TPS+NR	1,616±80.8[a]	10.56±2.58[a]	0.99±0.09[a]	1.1±0.25[a]
TPS+NR-g-TMOS 9 phr	1,369±125.4[b]	12.36±2.24[b]	1.08±0.19[b]	2.5±0.13[b]
TPS+NR-g-TMOS 20 phr	1,517±247.8[c]	14.14±0.62[c]	1.23±0.02[c]	2.6±0.38[c]

[a-c] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อนำสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ที่ 9 phr มาวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS มีค่า Young's modulus, tensile strength, % strain at break สูงกว่า TMOS อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่า impact strength ต่ำกว่าของชิ้นงาน TMOS อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 12 ตารางเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ที่ 9 phr

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% strain at break	Impact strength (kJ/m^2)
TPS+NR-g-DMMS 9 phr	1,429±17.9[a]	12.60±0.88[a]	1.15±0.30[a]	2.1±0.50[a]
TPS+NR-g-TMOS 9 phr	1,369±125.4[b]	12.36±2.24[b]	1.08±0.19[b]	2.5±0.13[b]

[a-b] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อนำสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ที่ 20 phr มาวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า ยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS มีค่า Young's modulus, % strain at break และ impact strength ต่ำกว่าของชิ้นงาน DMMS อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่า Tensile strength ไม่แตกต่างจากของ DMMS

ตารางที่ 13 ตารางเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผสมด้วยยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ที่ 20 phr

ชิ้นงาน	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% strain at break	Impact strength (kJ/m^2)
TPS+NR-g-DMMS 20 phr	1,168±161.7[a]	14.06±0.04[a]	1.16±0.16[a]	2.3±0.42[a]
TPS+NR-g-TMOS 20 phr	1,517±247.8[b]	14.14±0.62[a]	1.23±0.02[b]	2.6±0.38[b]

[a-b] ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.5 สมบัติความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงาน

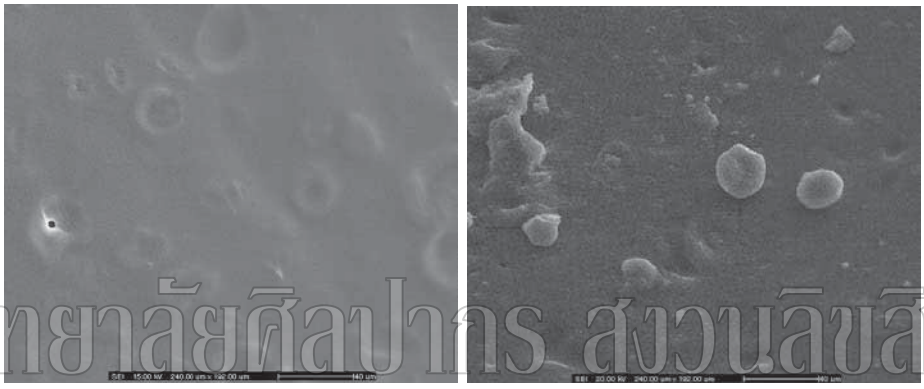
จากการทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงานได้ผลดังแสดงในตารางที่ 14 จะเห็นได้ว่า การผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride ลงไปใน TPS ไม่ทำให้สมบัติความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ตารางที่ 14 สมบัติความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงาน

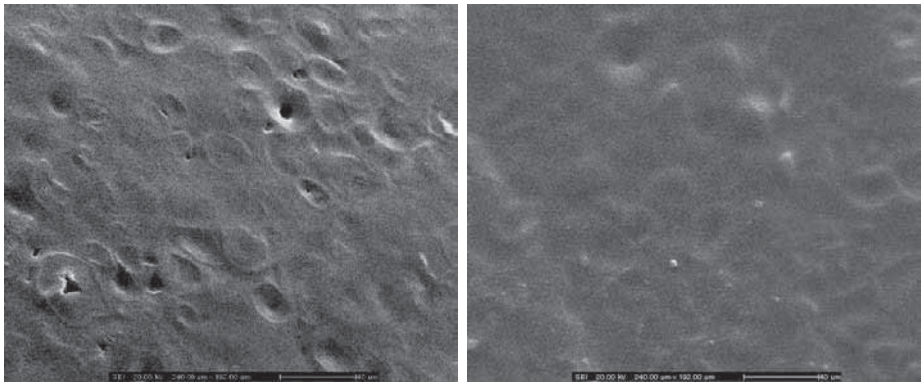
ชิ้นงาน	Onset (°C)	Inflection Point (°C)	Endset (°C)
TPS	289.41	308.01	320.55
TPS+NR	287.32	311.56	326.15
TPS+MNR 3 phr	288.24	314.33	326.88
TPS+MNR 9 phr	287.51	309.66	325.71
TPS+NR-g-DMMS 9 phr	286.21	313.28	326.80
TPS+NR-g-DMMS 20 phr	285.70	303.19	323.93
TPS+NR-g-TMOS 9 phr	284.05	307.15	325.73
TPS+NR-g-TMOS 20 phr	284.03	307.27	325.83

4.6 โครงสร้างสัณฐานของชิ้นงาน

จากการพิสูจน์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride (MNR) ได้ผลดังภาพที่ 34 โดยเมื่อพิจารณากรณีที่ไม่ได้ทำการกราฟต์ maleic anhydride ลงบนยางธรรมชาติจะพบว่ามีการแยกเฟสระหว่างยางและแป้งอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากความมีขั้วที่ต่างกันของสารทั้งสองชนิดนี้ แต่เมื่อมีปริมาณการกราฟต์ที่มากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของแป้งและยางเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดแรงกระทำของหมู่ anhydride ของยาง MNR กับหมู่ hydroxyl ของแป้งที่มากขึ้น



(ก) (ข)



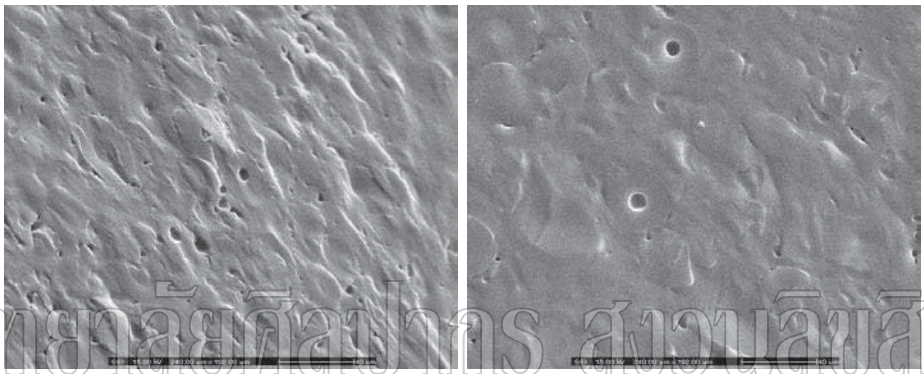
(ค) (ง)

ภาพที่ 34 SEM micrograph ของชิ้นงานที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride ที่กำลังขยาย 500 เท่า

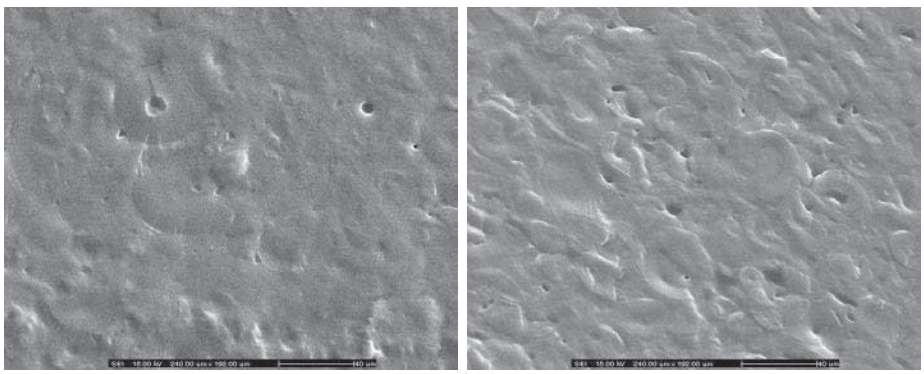
(ก) TPS (ข) TPS+NR

(ค) TPS+NR-g-MA 3phr (ง) TPS+NR-g-MA 9 phr

จากการพิสูจน์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy ของชิ้นงานที่ผสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ได้ผลดังภาพที่ 35 โดยเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้ vinyl silane ในการกราฟต์มากขึ้น จะเห็นได้ว่าความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของแป้งและยางเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางที่ผ่านการกราฟต์ด้วย DMMS และ TMOS จะเห็นได้ว่า ยางที่ผ่านการกราฟต์ด้วย TMOS มีความสามารถในการเข้ากันได้กับแป้งมากกว่า DMMS เนื่องจากเกิดแรงกระทำของหมู่ anhydride ของยาง MNR กับหมู่ hydroxyl ของแป้งที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกและผลจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด



(ก) (ข)



(ค) (ง)

ภาพที่ 35 SEM micrograph ของชิ้นงานที่ผสมยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย vinyl silane ที่กำลังขยาย 500 เท่า

(ก) TPS+NR-g-DMMS 9 phr (ข) TPS+NR-g-DMMS 20 phr

(ค) TPS+NR-g-TMOS 9 phr (ง) TPS+NR-g-TMOS 20 phr

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลัง ผสมยางธรรมชาติเหลวที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride และ vinyl silane โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณการกราฟต์ด้วย maleic anhydride และ vinyl silane บนโมเลกุลยางเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า impact strength ของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถเกิด interaction กับหมู่ hydroxyl ของแป้งได้ การกราฟต์ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ทำให้ impact strength และ % strain at break ของชิ้นงานที่ได้ มีค่ามากกว่าการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane เนื่องจาก Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า มีสายโซ่ที่ยาวกว่า จึงทำให้เกิดพื้นที่อิสระมากกว่า และยังมี methoxy group มากกว่า Dimethoxymethylvinylsilane จึงอาจเกิด silanol group ได้มากกว่า ซึ่งจะให้ไปสร้างแรงกระทำกับ –OH group ของแป้งได้มากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ vinyl silane และ maleic anhydride มาทำการกราฟต์กับยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง ซึ่ง maleic anhydride มีข้อจำกัดในการกราฟต์คือ เมื่อปริมาณ maleic anhydride สูงกว่า 9 phr เปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะลดลง ทำให้กราฟต์ได้น้อย จึงปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งได้ไม่มากนัก ในงานวิจัยนี้จึงสามารถเปรียบเทียบได้เฉพาะยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride, Dimethoxymethylvinylsilane และ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane ที่ 9 phr เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของการกราฟต์ด้วย maleic anhydride ดังที่กล่าวไปข้างต้น จึงควรมีการเปรียบเทียบ vinyl silane กับสารกลุ่มอื่น เช่น Vinyl-tris-(methoxydiethoxy) หรือ VTMS ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า และศึกษาในช่วงของการกราฟต์อื่นๆ เพิ่มเติม

บรรณานุกรม

1. R. A. Gross and B. Kalra. “Biodegradable polymers for the environment” Science 297 (2002): 803-807.
2. C. S. K. Reddy, R. Ghai, and V. C. Kalia. “Polyhydroxyalkanoates: an overview” Bioresource Technology 87 (2003): 137-146.
3. A. Altskär, R. Andersson and A. Boldizar, "Some effects of processing on the molecular structure and morphology of thermoplastic starch." Carbohydrate Polymers 71, 4 (2007): 591-597.
4. A. L. Da Róz, A. J. F. Carvalho , A. Gandini and A.A.S. Curvelo. “The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing.” Carbohydrate Polymers 63, 3 (2006): 417-424.
5. A. P. Mathew and A. Dufresne. “Plasticized waxy maize starch: effect of polyols and relative humidity on material properties.” Biomacromolecules 3, 5 (2002):1101-1108.
6. I. Arvanitoyannis, I. Kolokuris, A. Nakayama and S. Aiba. “Preparation and study of novel biodegradable blends based on gelatinized starch and 1,4-transpolyisoprene (gutta percha) for food packaging or biomedical applications.” Carbohydrate Polymers 34 (1997): 291-302.
7. Z. Yang, M. Bhattacharya, and U. R. Vaidya. “Properties of ternary blends of starch and maleated polymers of styrene and ethylene propylene rubber.” Polymer 37, 11 (1996): 2137-2150.
8. P. S. Curti, G. J. Vidotti, A. F. Rubira and E. C. Muniz. “Some kinetic parameters of the degradation of natural rubber induced by chloranil and iron (III) chloride, in solution.” Polymer Degradation and Stability 79, 2 (2003): 325-331.
9. De H. Livonnier, H. “Production and application of liquid rubber. Proceeding of the First Franco Thai Rubber Technology Symposium” Hilton International Hotel, Bangkok, April 15-17 (1988): 47-61.
10. J. Tangpakdee, M. Megumi, A. Endo and Y. Tanaka. “Novel method for preparation of low molecular weight natural rubber latex.” Rubb. Chem. Technol, 76 (1998): 795-802.

11. L. Uthai. “Preparation of Photosensitive Elastomer from Liquid Natural Rubber”. J. Natl. Res Council Thailand, 25, 2 (1993): 27-42.

12. กล้าณรงค์ ศรีรอด, กาญจนา กู้โรจนวงศ์ และวิไล สันติโสภาศรี, 2541, "โครงสร้างของอะไมโลสอะไมโลเพคตินและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้จากเกษตรศาสตร์ 50 ในอายุต่างๆกัน," ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36, 3–5 กุมภาพันธ์ 2541, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

13. Hongsheng Liu, Fengwei Xie and Long Yu, "Thermal processing of starch-based polymers.", Progress in Polymer Science, In Press, Corrected Proof.

14. กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543, เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 292 หน้า 8.

15. C. M. Müller, J. B. Laurindo and F. Yamashita, “Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values.”, Carbohydrate Polymers, 77, 2, (2009): 293-299.

16. ยางธรรมชาติ (ออนไลน์). 2007.สืบค้นจาก : http://velleitynyc.blogspot.com/2007/09/skim-latex-60-63-3-6-ml14100c-43-100-2.htmlsfd [28 สิงหาคม 2553]

17. ยางธรรมชาติ (ออนไลน์). 2007.สืบค้นจาก : http://th.wikipedia.org/ [28 สิงหาคม 2553]

18. T. Raoindran, M. R. G. Nayar and Joseph D. “A novel method for the preparation of hydroxyl terminated liquid natural rubber.” Rapid Commun. 7 (1986): 159 –163.

19. C. Nakason , A. Kaesaman, P. Supasanthitikul. “The grafting of maleic anhydride onto natural rubber.” Polymer Testing 23 (2004): 35–41.

20. C. Nakason, S. Saiwaree, S. Tatun, A. Kaesaman. “Rheological, thermal and morphological properties of maleated natural rubber and its reactive blending with poly(methyl methacrylate).” Polymer Testing 25 (2006): 656–667.

21. A. J. F. Carvalhoa, A. E. Jobb, N. Alvesb, A.A.S. Curveloa and A. Gandini. “Thermoplastic starch/natural rubber blends.” Carbohydrate Polymers 53 (2003): 95–99.

22. นฤมล ศิริทรงธรรม. “กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของ 2-เอทอกซีเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติเหลว โดยใช้ระบบรีดอกซ์ชนิดไอออนของโลหะ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534, 47-48.

23. C. J. Pouchert, J. Behnke. “The Aldrich library of 13C and 1H Ft NMR spectra.” volumn 1. Edition1. USA : Aldrich Chemical Company, Inc

24. F. W. Fabris, F. C. Stedile, R. S. Mauler, S. M.B. Nachtigall. “Free radical modification of LDPE with vinyltriethoxysilane” European Polymer Journal 40 (2004):1119–1126.

25. H. Lu, Y. Hu, M. Li, Z. Chen and W. Fan. “Structure characteristics and thermal properties of silane-grafted-polyethylene/clay nanocomposite prepared by reactive extrusion” Composites Science and Technology 66 (2006):3035–3039.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การคำนวณหาขนาดน้ำหนักโมเลกุล

การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุล Ubbelohde viscometer

จาก สมการของ Mark-Houwink equation

$$[\eta] = k\overline{M}_v^a$$

สำหรับยางธรรมชาติใน toluene

k = 7.4 x 10^4 ml/g และ

a = 0.74

ซึ่งค่า $[\eta]$ คือ ค่าความหนืดแท้จริง (intrinsic viscosity) หาได้จากสมการของ Huggins equation และ Kramer Equation ดังนี้

Huggins equation : $$\frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + k'[\eta]^2 c$$

Kramer Equation : $$\ln\frac{\eta_{rel}}{c} = [\eta] - k''[\eta]^2 c$$

โดยที่ c = ความเข้มข้นของสารละลาย (g/l)

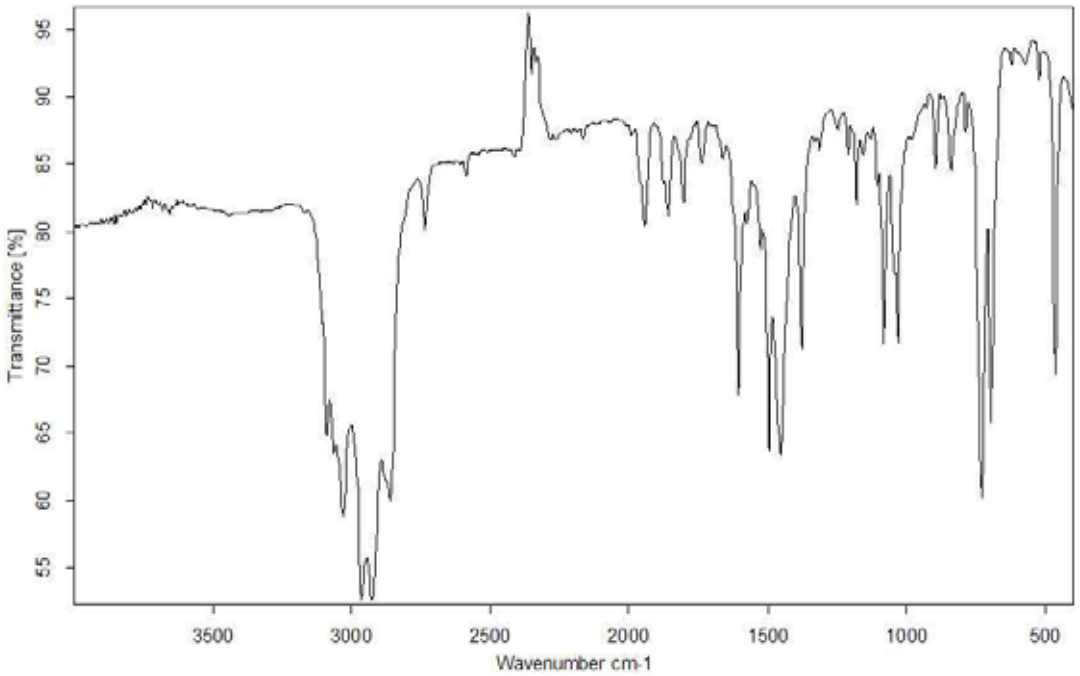
η_{rel} = relative viscosity = $\frac{\text{เวลาการไหลของสารละลาย}}{\text{เวลาการไหลของตัวทำละลาย}}$

η_{sp} = specific viscosity = $\eta_{rel} - 1$

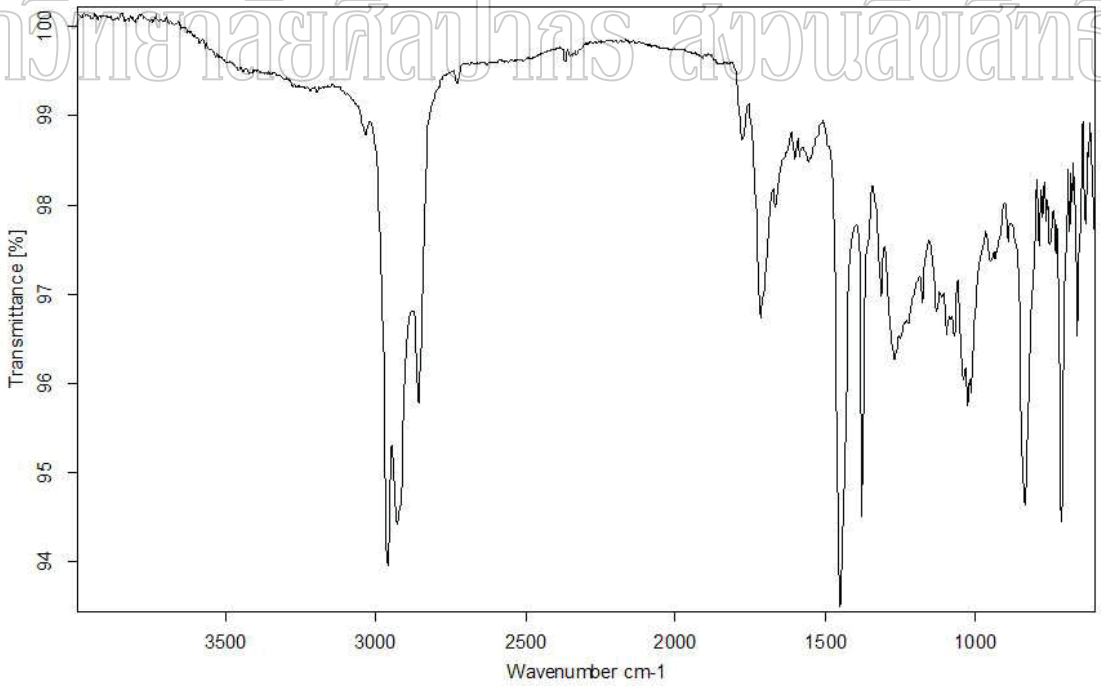
จากผลการทดลองวัดเวลาการไหลของสารละลายยาง และ toluene นำมาหาค่า $\frac{\eta_{rel}}{C}$ และ $\ln\frac{\eta_{sp}}{C}$ นำมา plot graph เทียบกับ ความเข้มข้นของสารละลาย C (g/l) จากนั้น หาจุดตัดแกน y ของสมการทั้งสองจะได้ $[\eta]$

ภาคผนวก ข

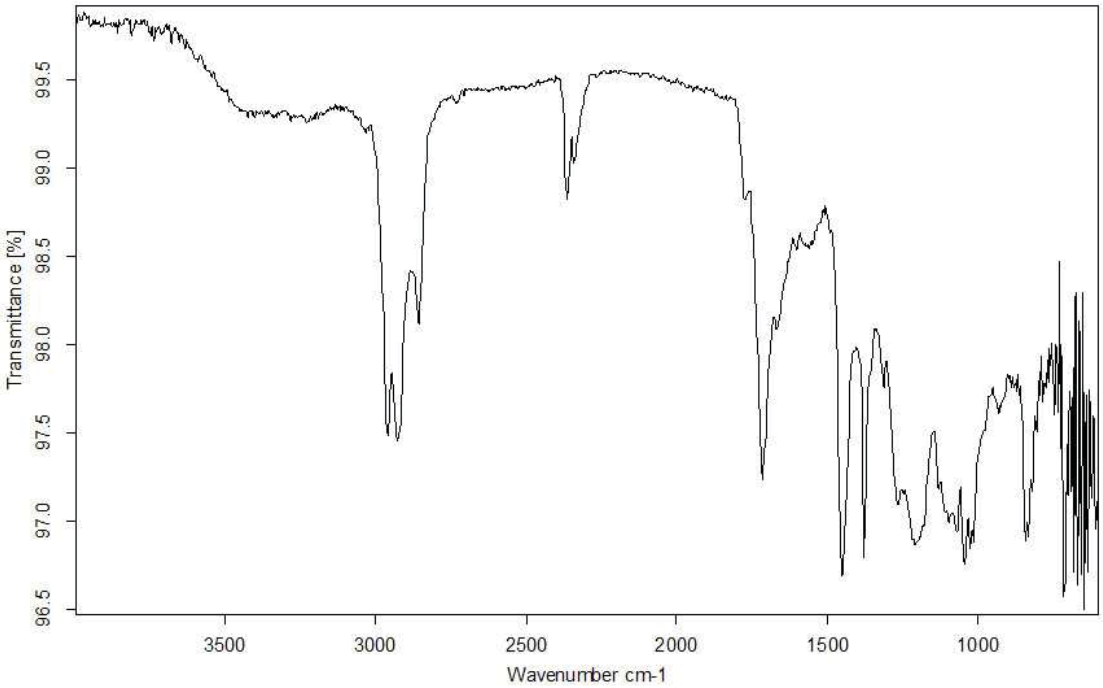
FT-IR spectra ของสารตัวอย่าง



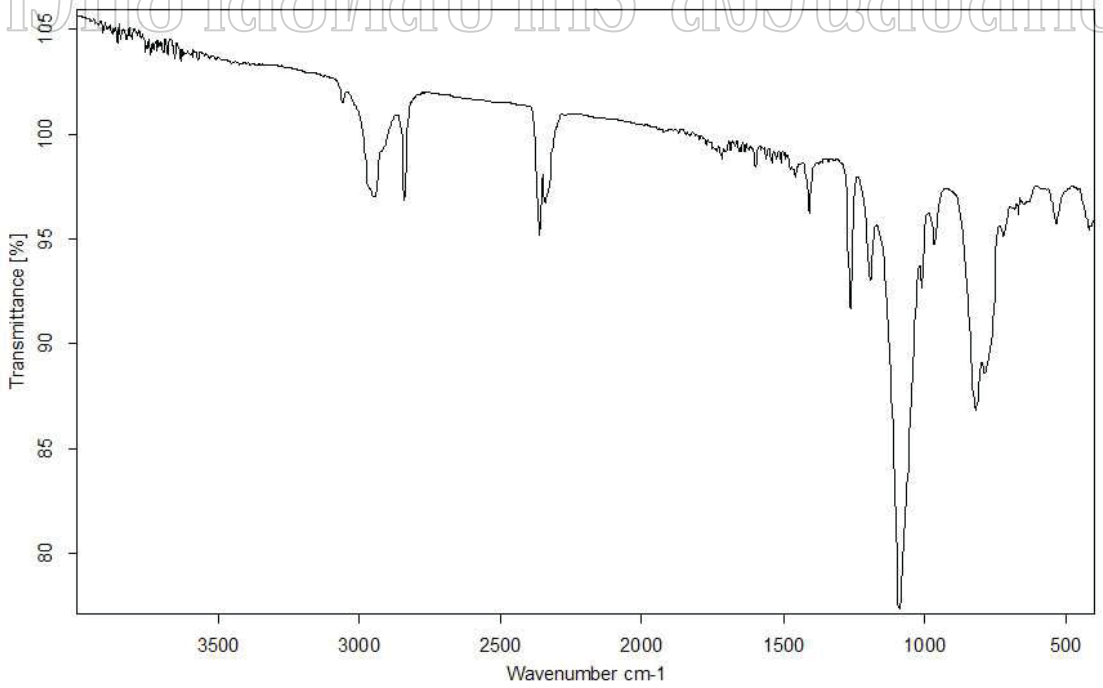
ภาพที่ 36 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติที่ละลายในโทลูอีน



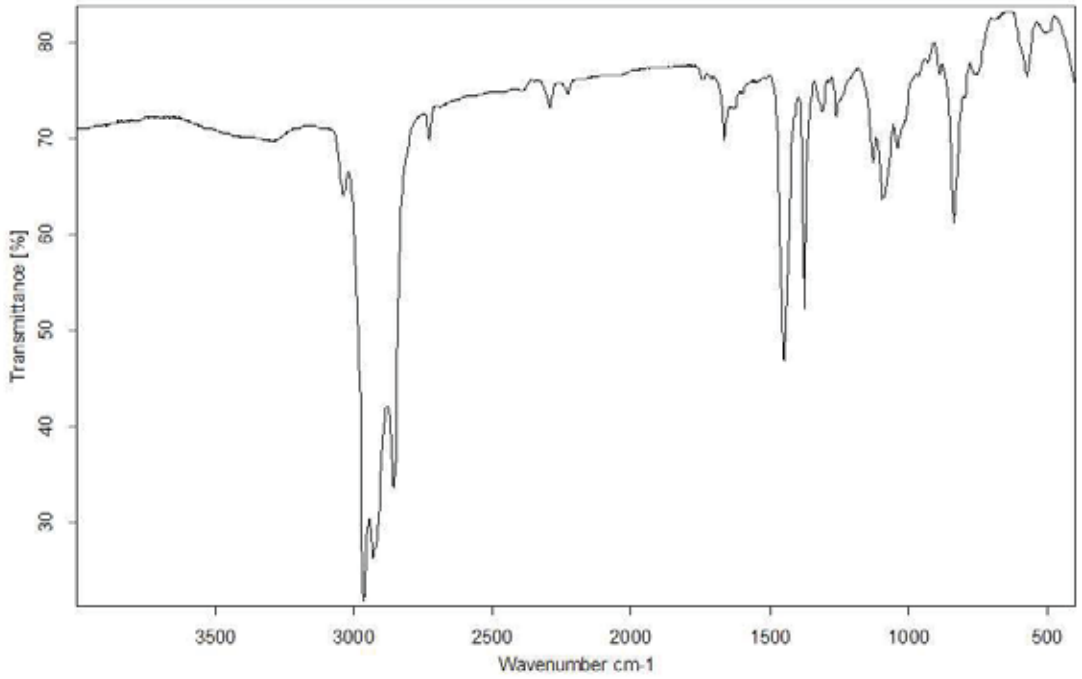
ภาพที่ 37 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride 3 phr (MNR 3 phr)



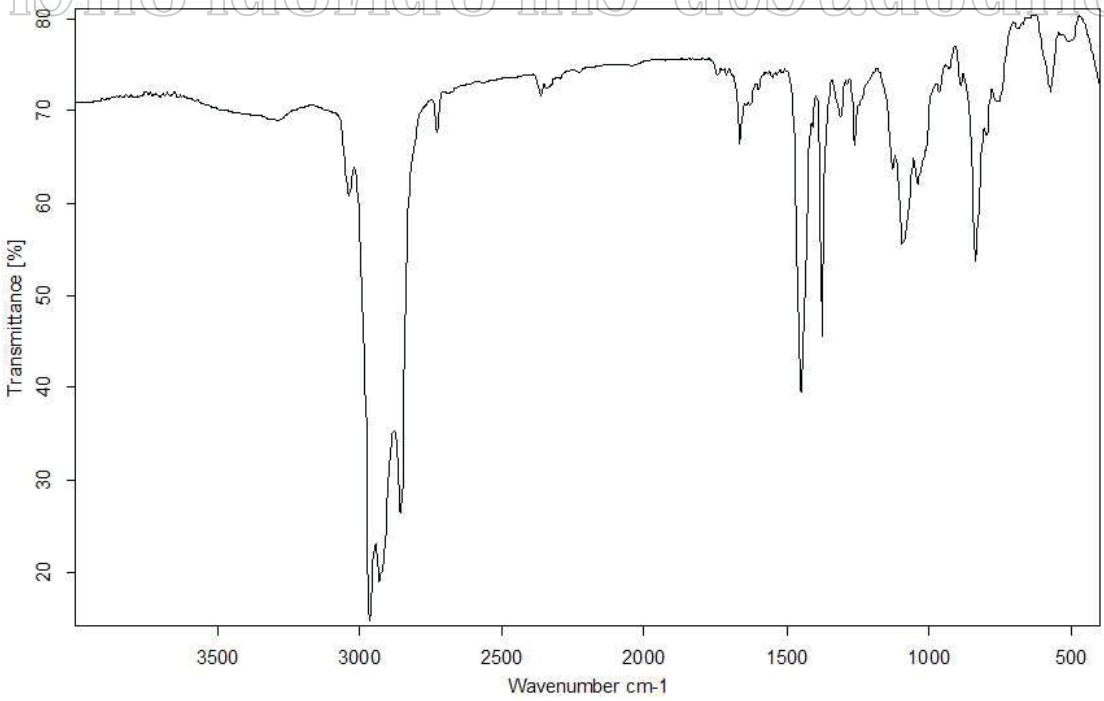
ภาพที่ 38 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride 9 phr (MNR 9 phr)



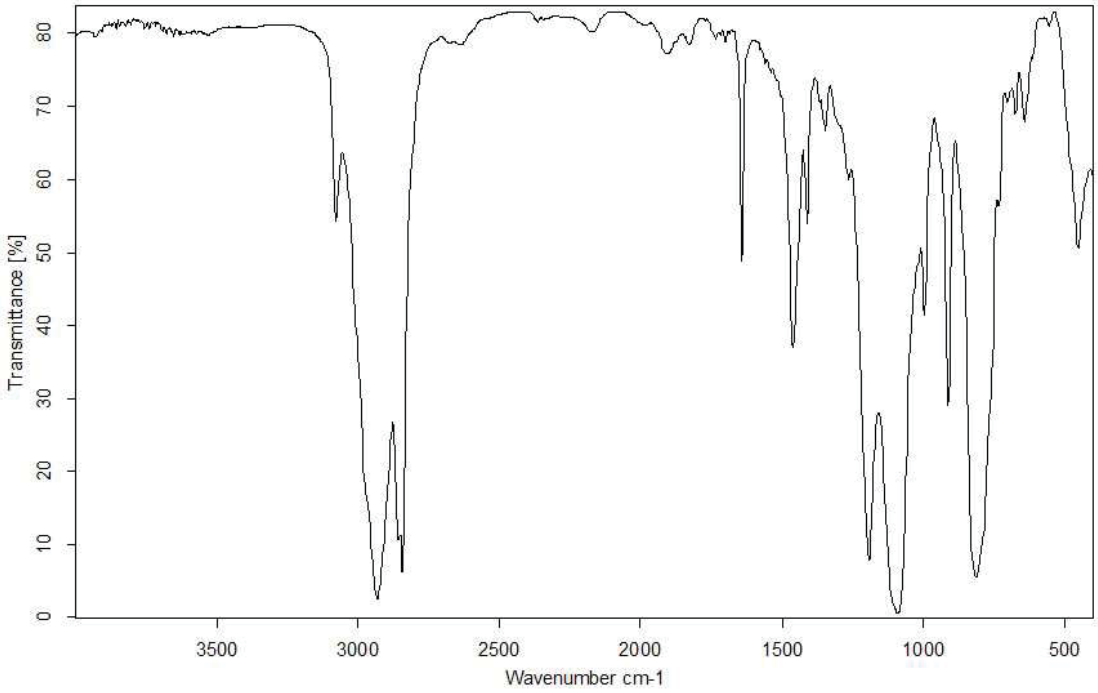
ภาพที่ 39 FT-IR spectrum ของ Dimethoxymethylvinylsilane (DMMS)



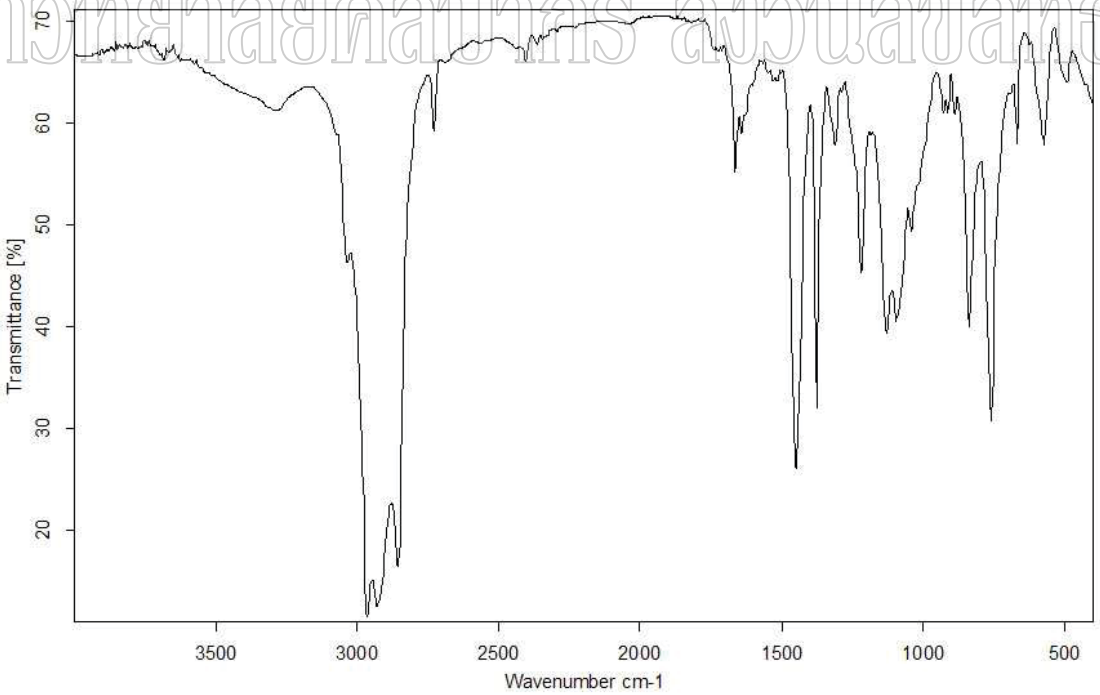
ภาพที่ 40 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane 9 phr (NR-g-DMMS 9 phr)



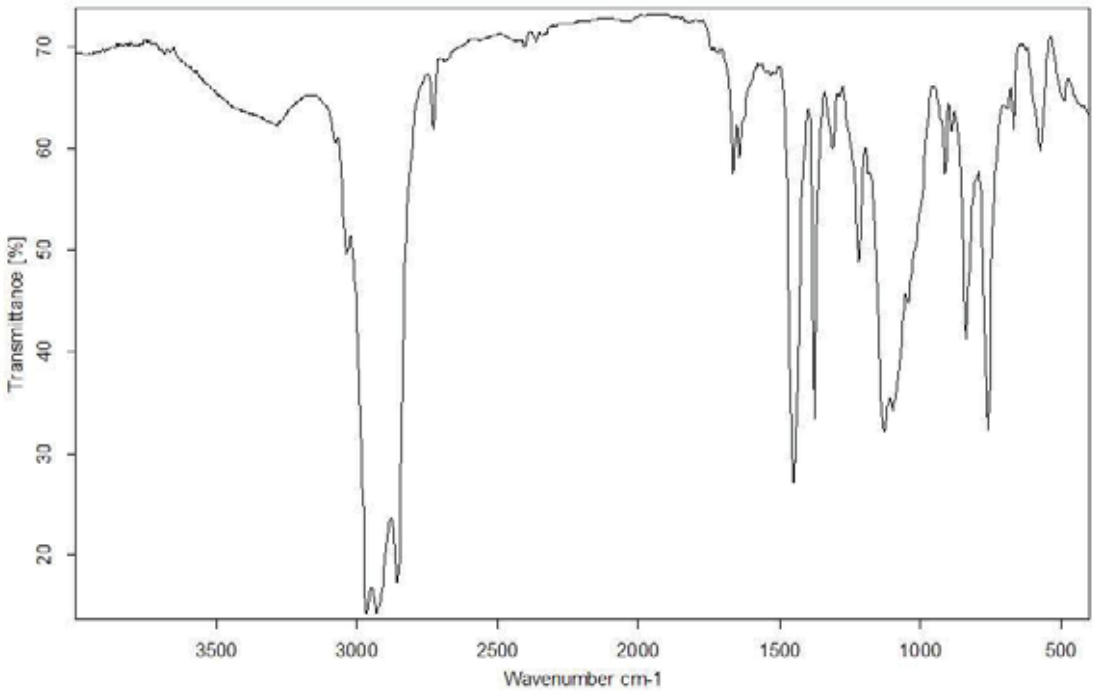
ภาพที่ 41 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane 20 phr (NR-g-DMMS 20 phr)



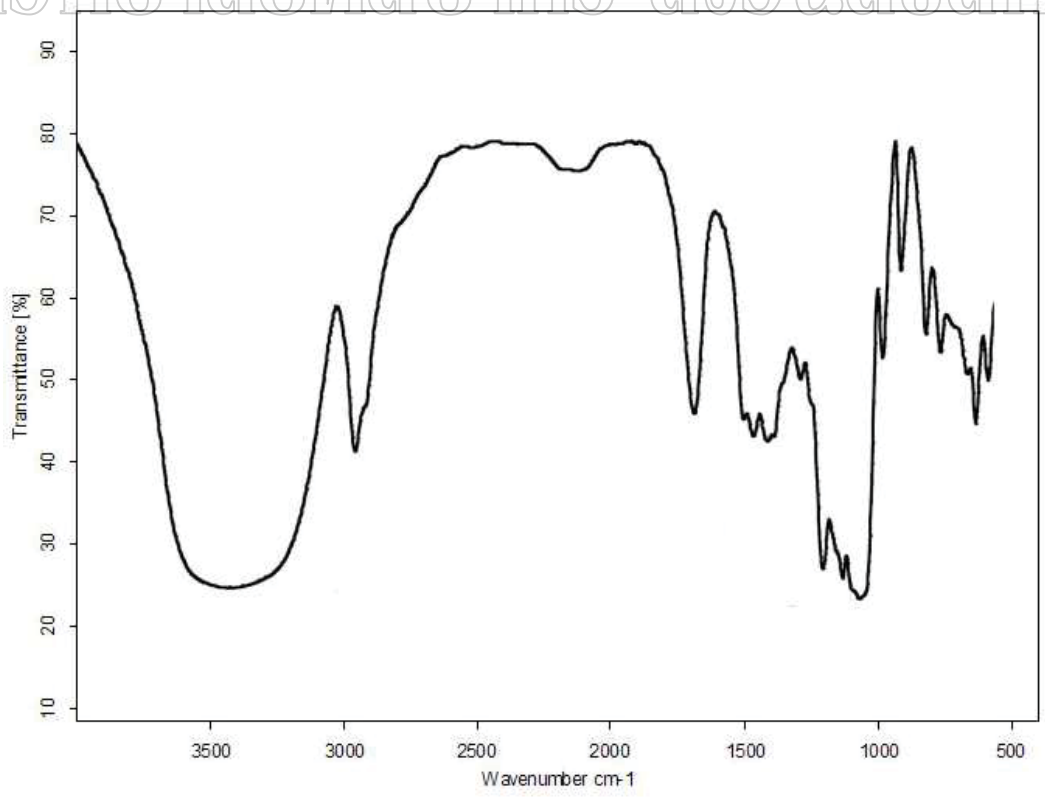
ภาพที่ 42 FT-IR spectrum ของ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane (TMOS)



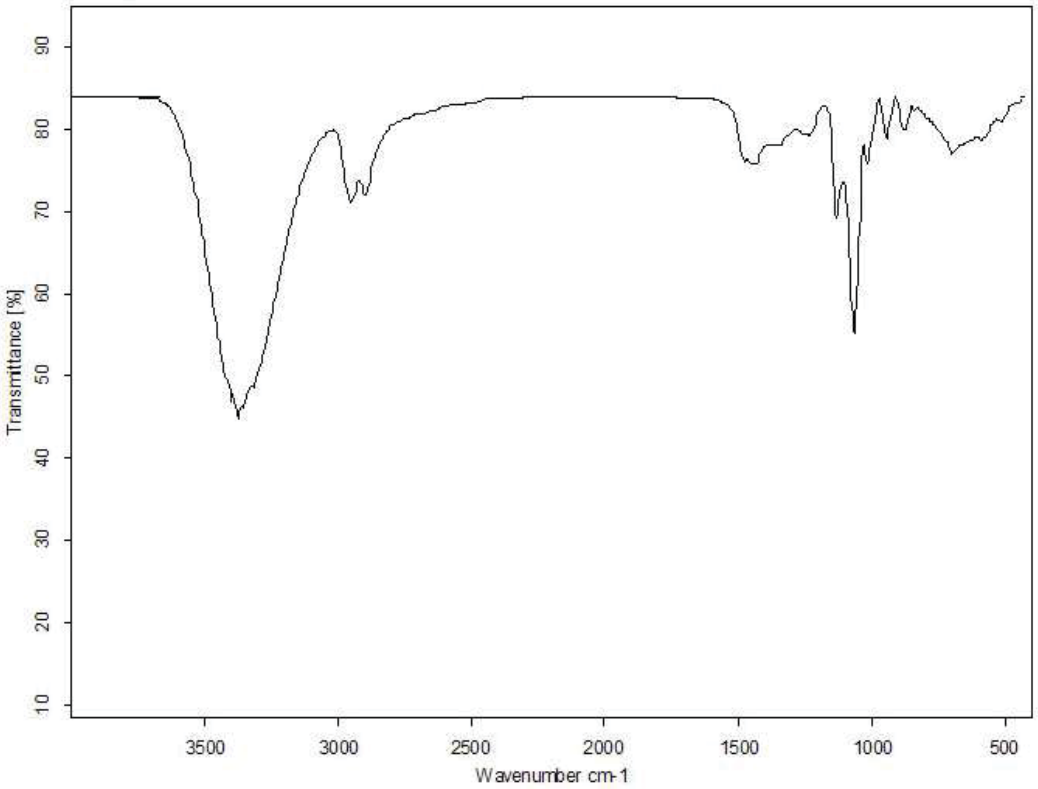
ภาพที่ 43 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 9 phr (NR-g-TMOS 9 phr)



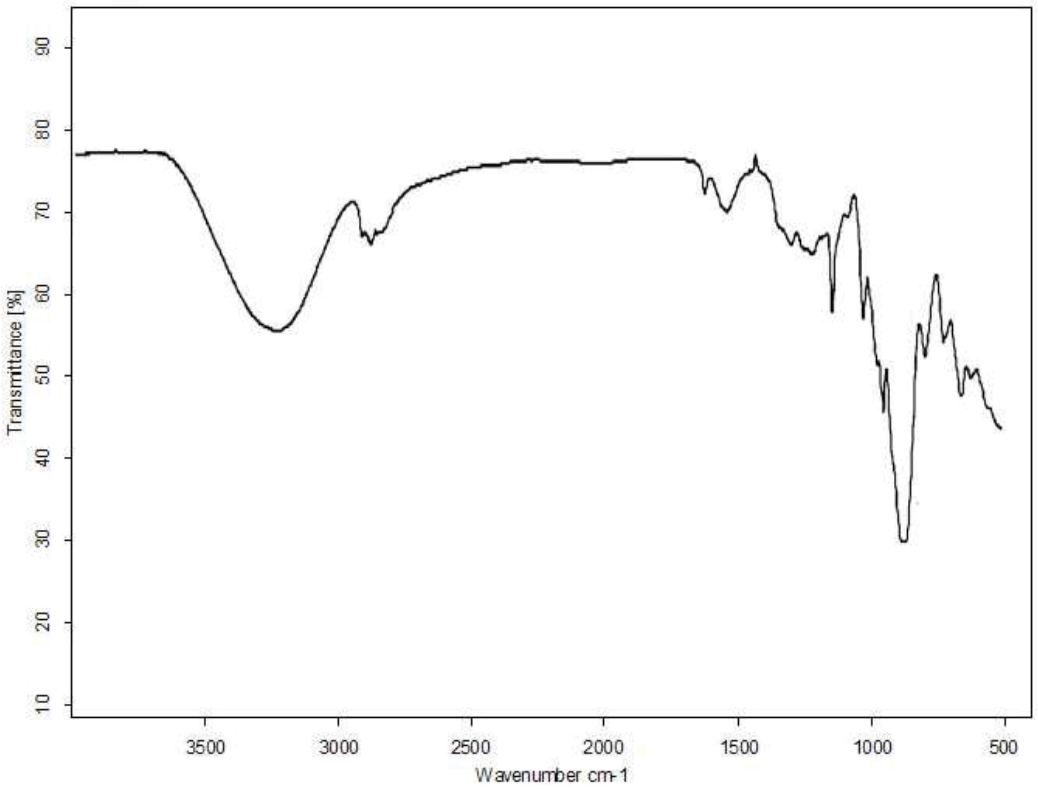
ภาพที่ 44 FT-IR spectrum ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 20 phr (NR-g-TMOS 20 phr)



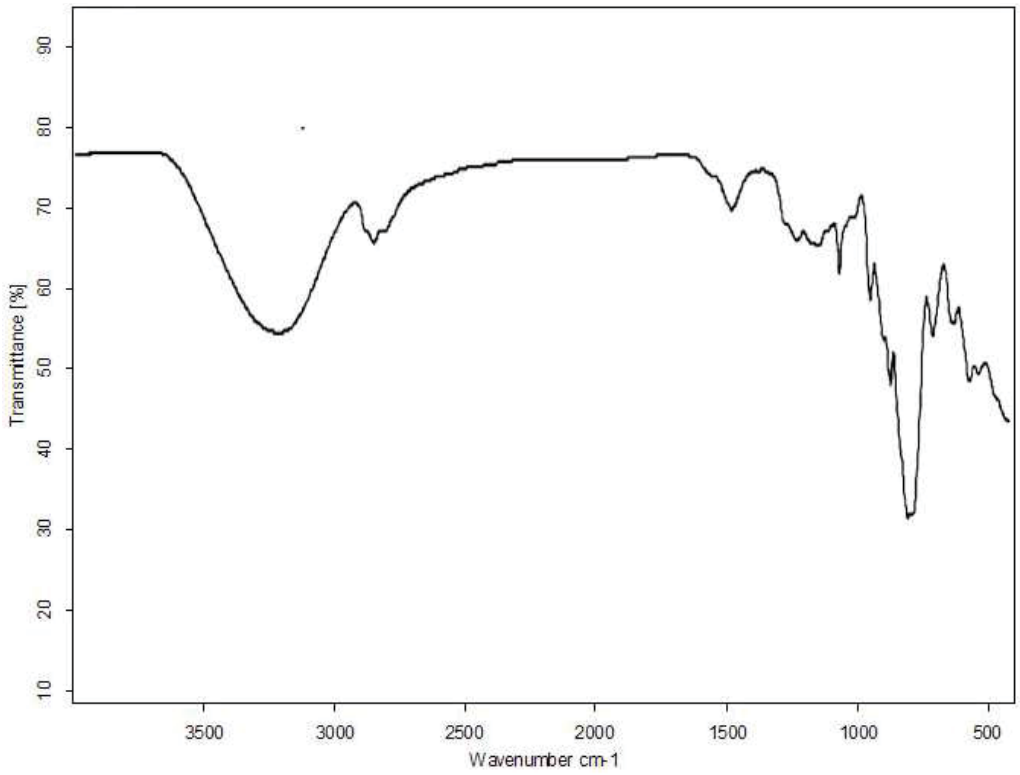
ภาพที่ 45 FT-IR spectrum ของแป้งมันสำปะหลัง



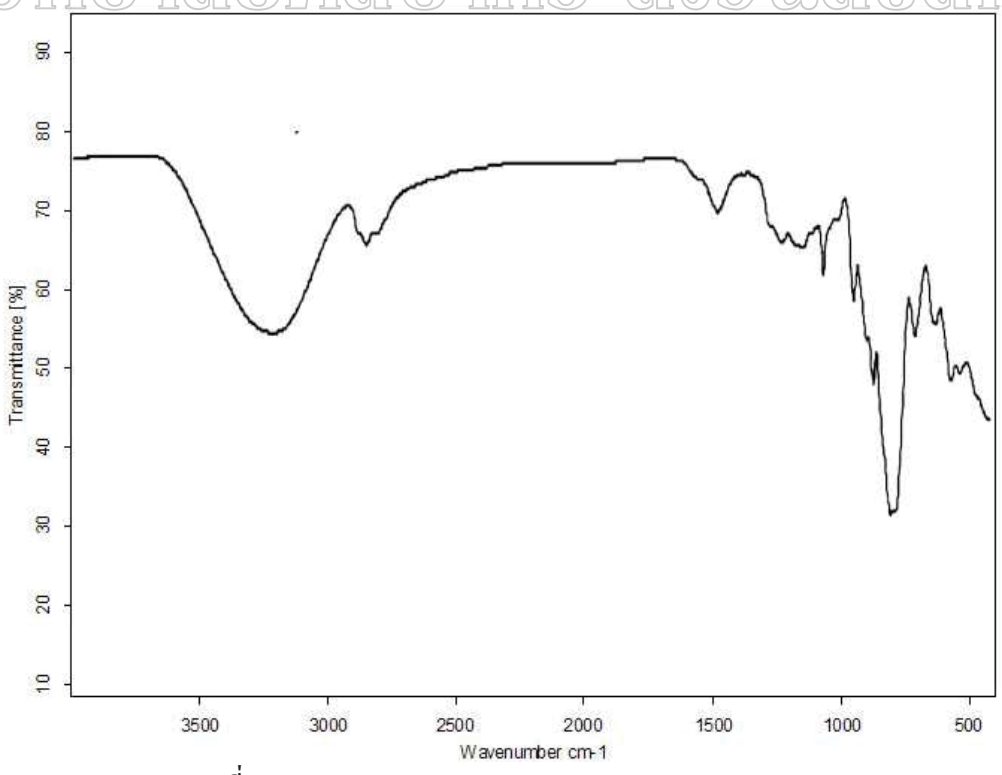
ภาพที่ 46 FT-IR spectrum ของกลีเซอรอล



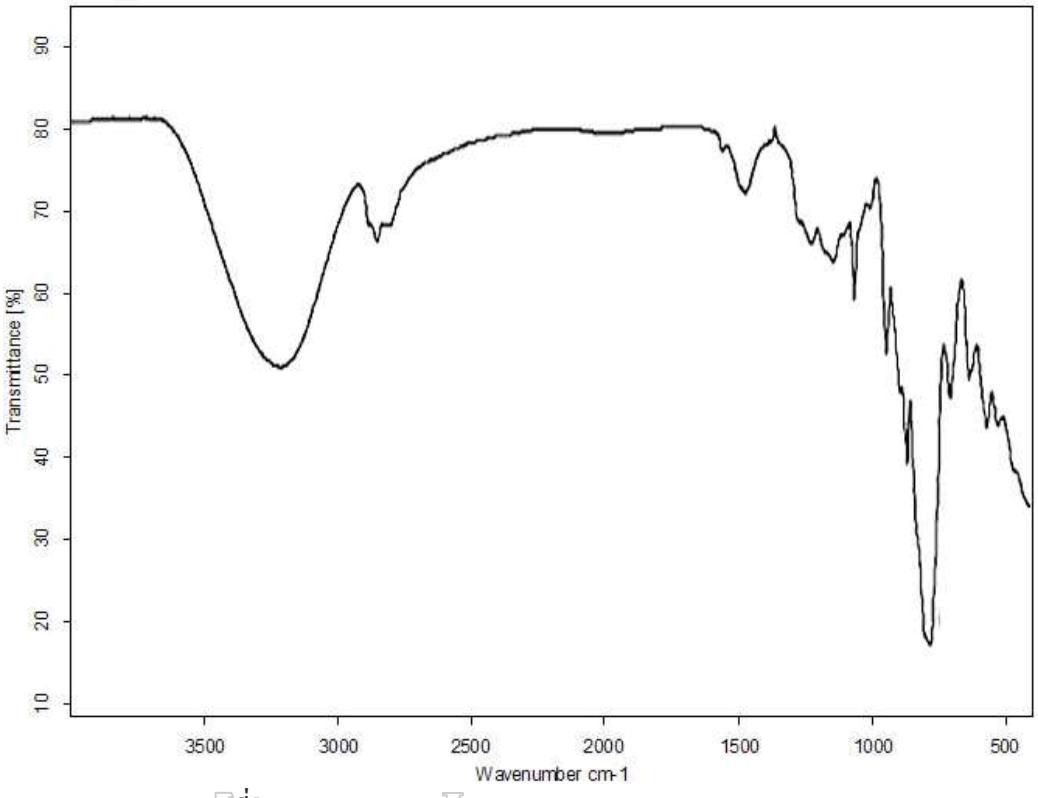
ภาพที่ 47 FT-IR spectrum ของ TPS



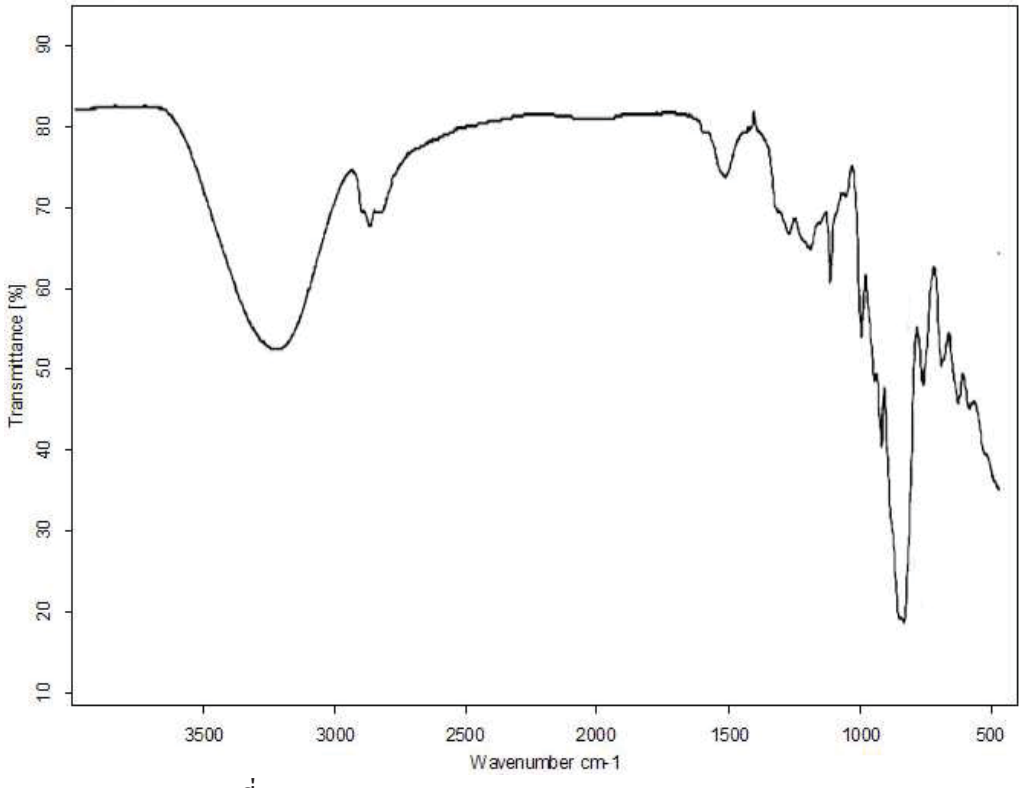
ภาพที่ 48 FT-IR spectrum ของ TPS+NR



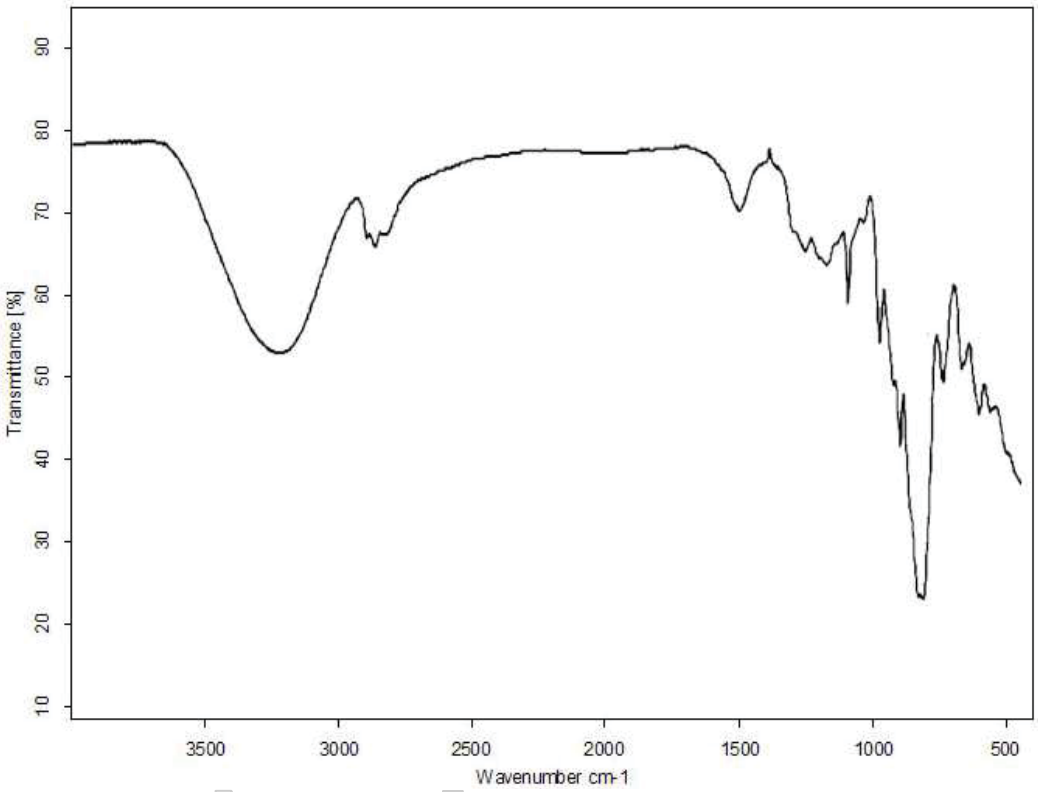
ภาพที่ 49 FT-IR spectrum ของ TPS+NR-g-DMMS 9 phr



ภาพที่ 50 FT-IR spectrum ของ TPS+NR-g-DMMS 20 phr



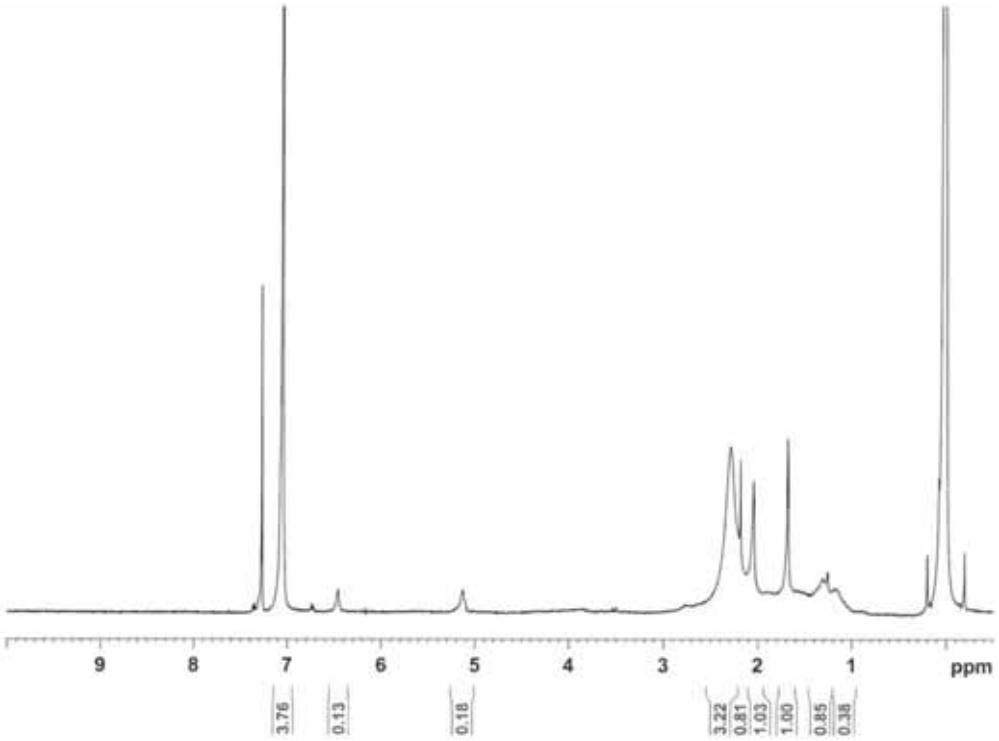
ภาพที่ 51 FT-IR spectrum ของ TPS+NR-g-TMOS 9 phr



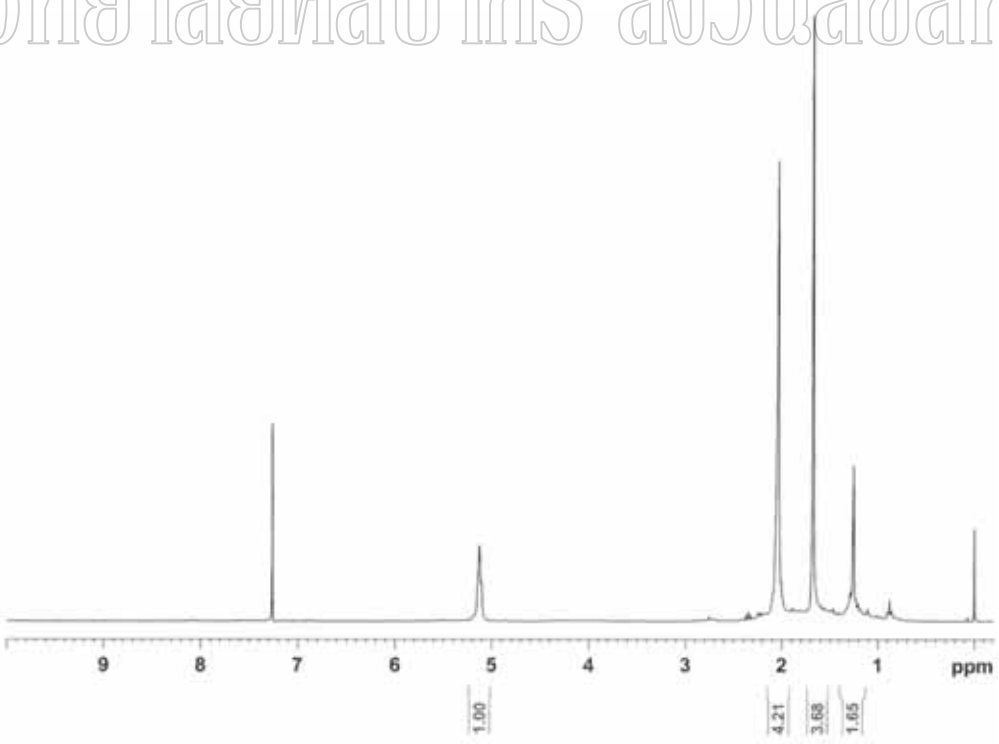
ภาพที่ 52 FT-IR spectrum ของ TPS+NR-g-TMOS 20 phr

ภาคผนวก ค

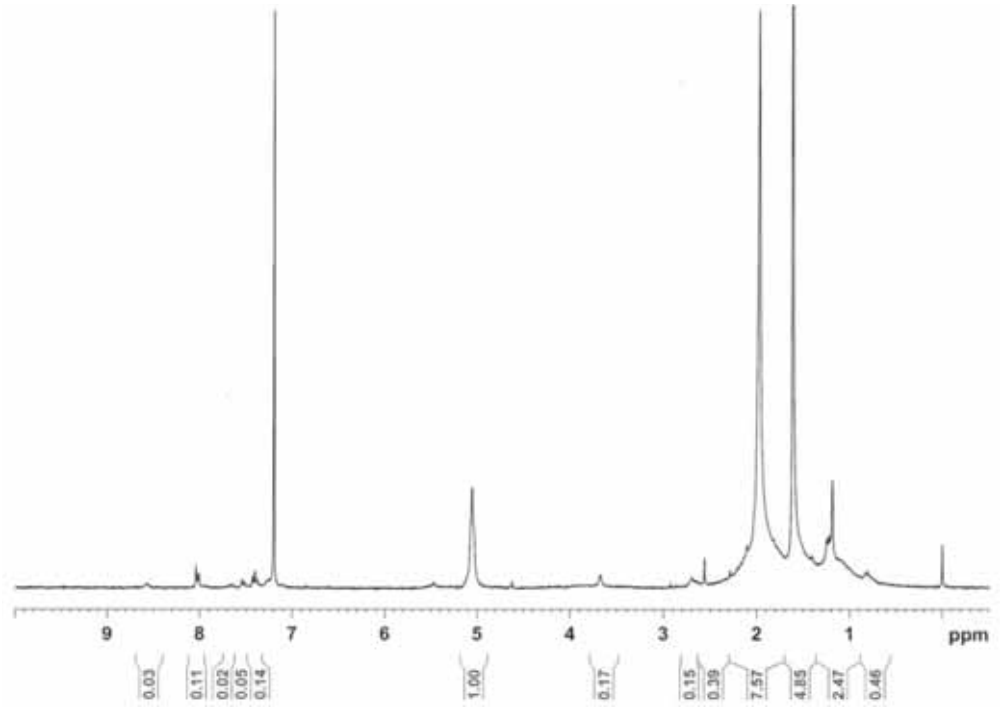
NMR spectra ของสารตัวอย่าง



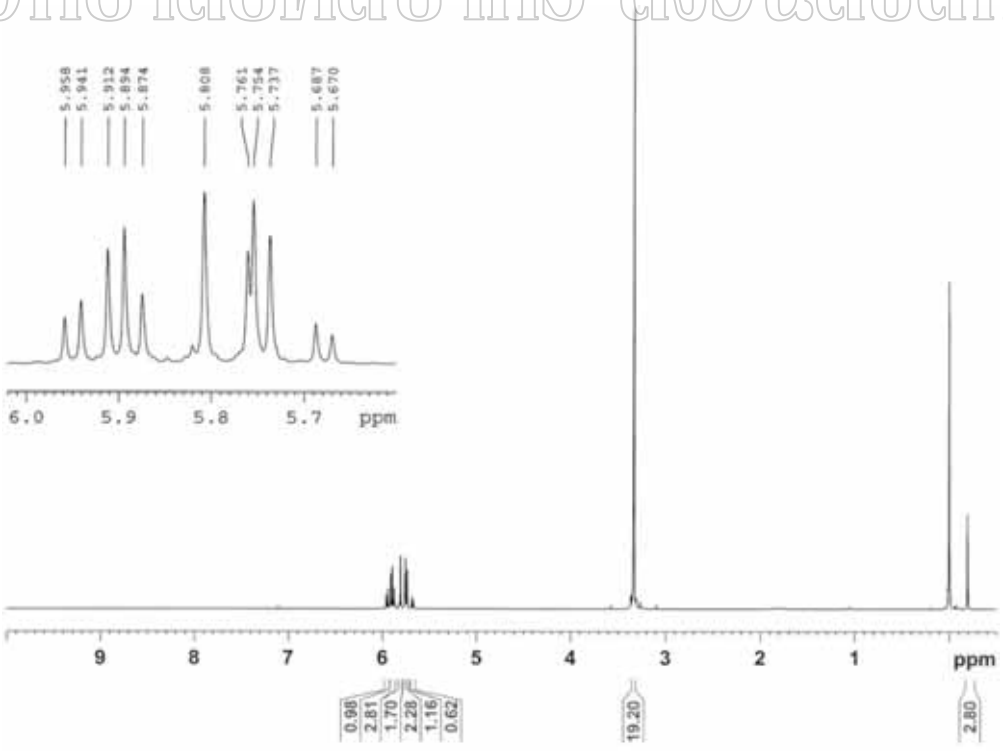
ภาพที่ 53 ^{1}H-NMR spectra ของ maleic anhydride



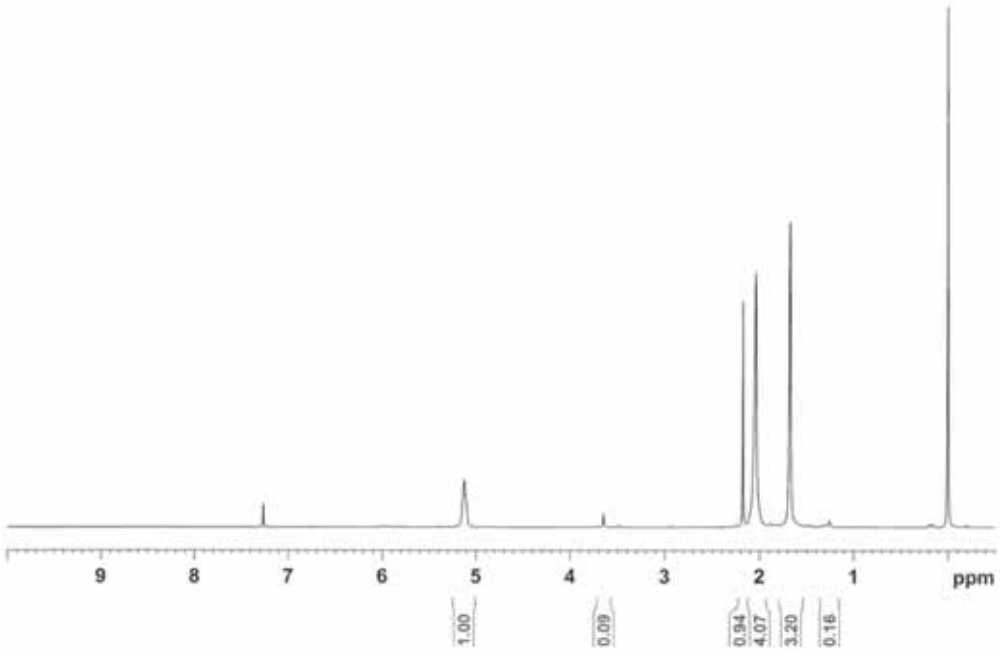
ภาพที่ 54 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride 3 phr (MNR 3 phr)



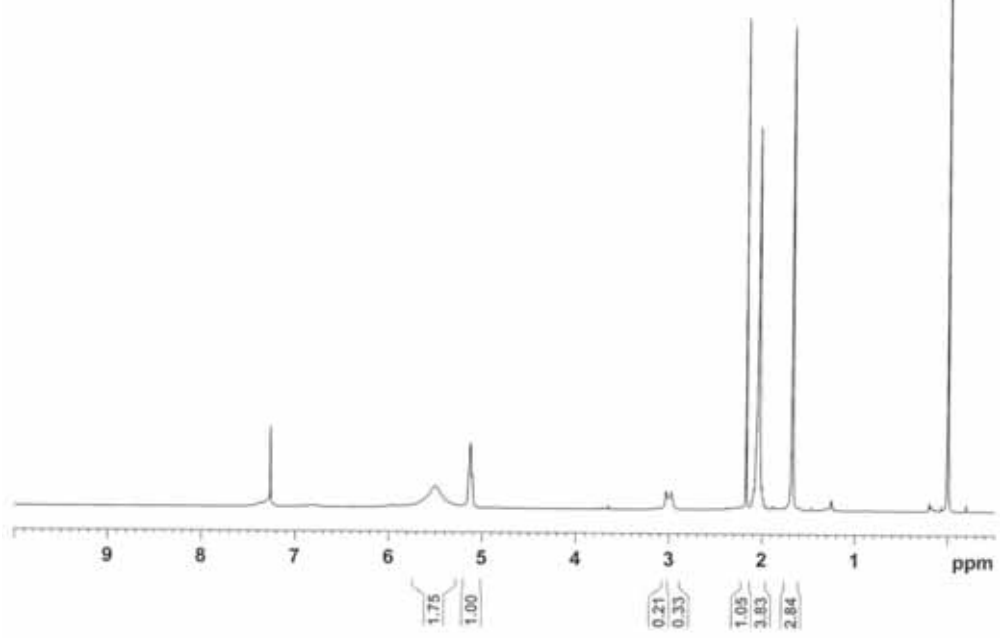
ภาพที่ 55 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย maleic anhydride 9 phr (MNR 9 phr)



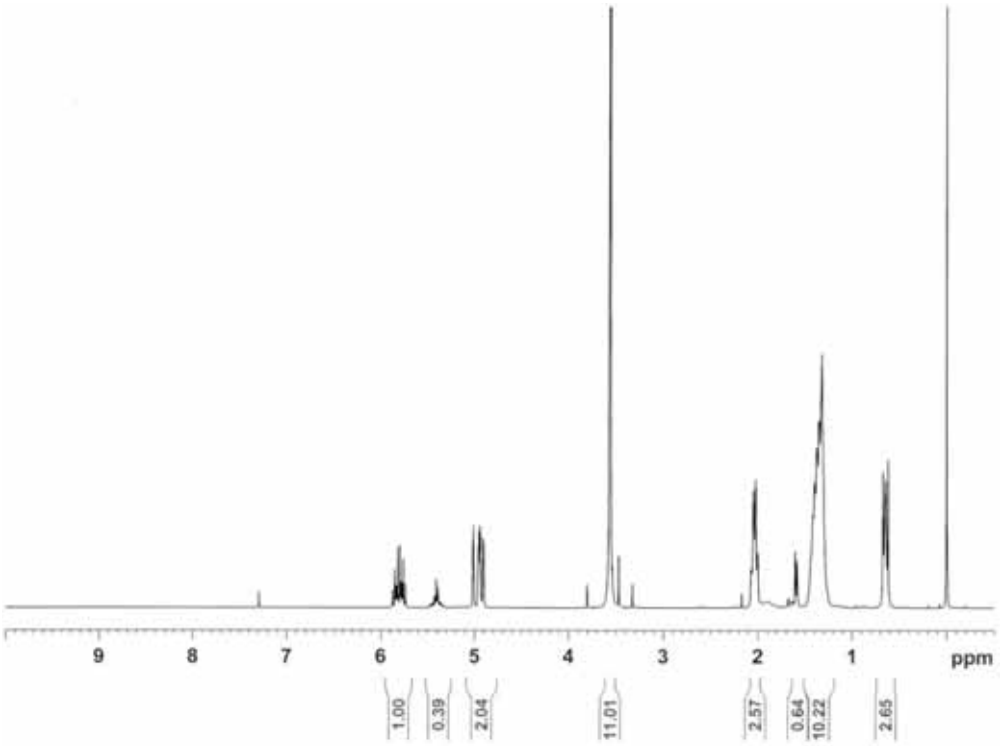
ภาพที่ 56 ^{1}H-NMR spectra ของ Dimethoxymethylvinylsilane (DMMS)



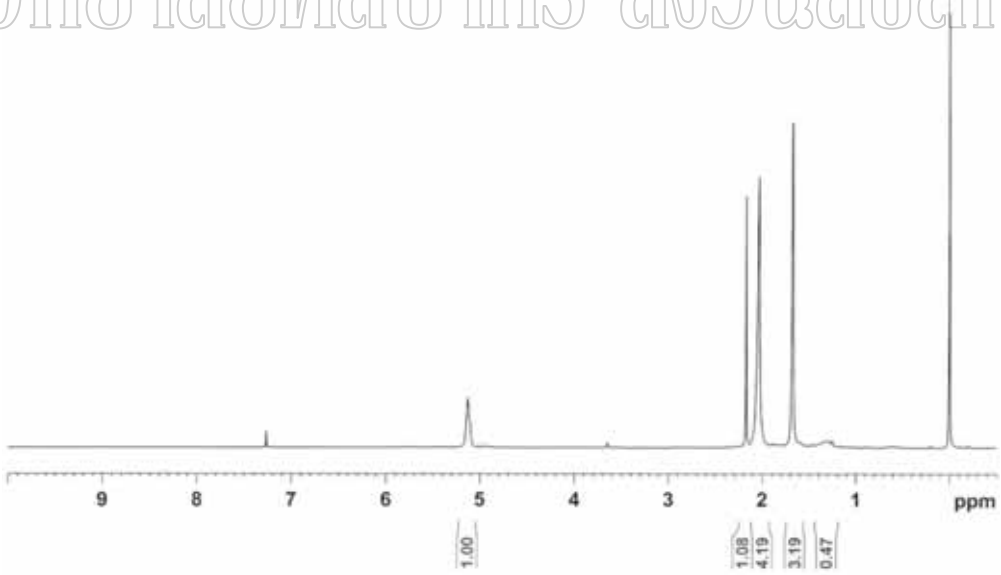
ภาพที่ 57 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane 9 phr (NR-g-DMMS 9 phr)



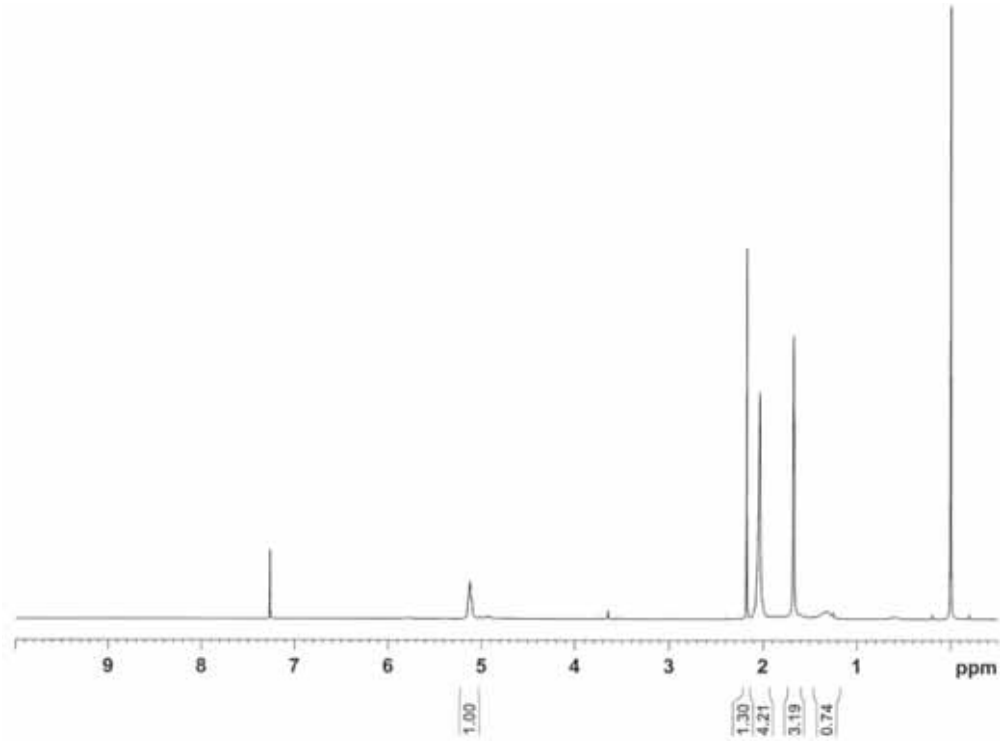
ภาพที่ 58 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Dimethoxymethylvinylsilane 20 phr (NR-g-DMMS 20 phr)



ภาพที่ 59 ^{1}H-NMR spectra ของ Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane (TMOS)



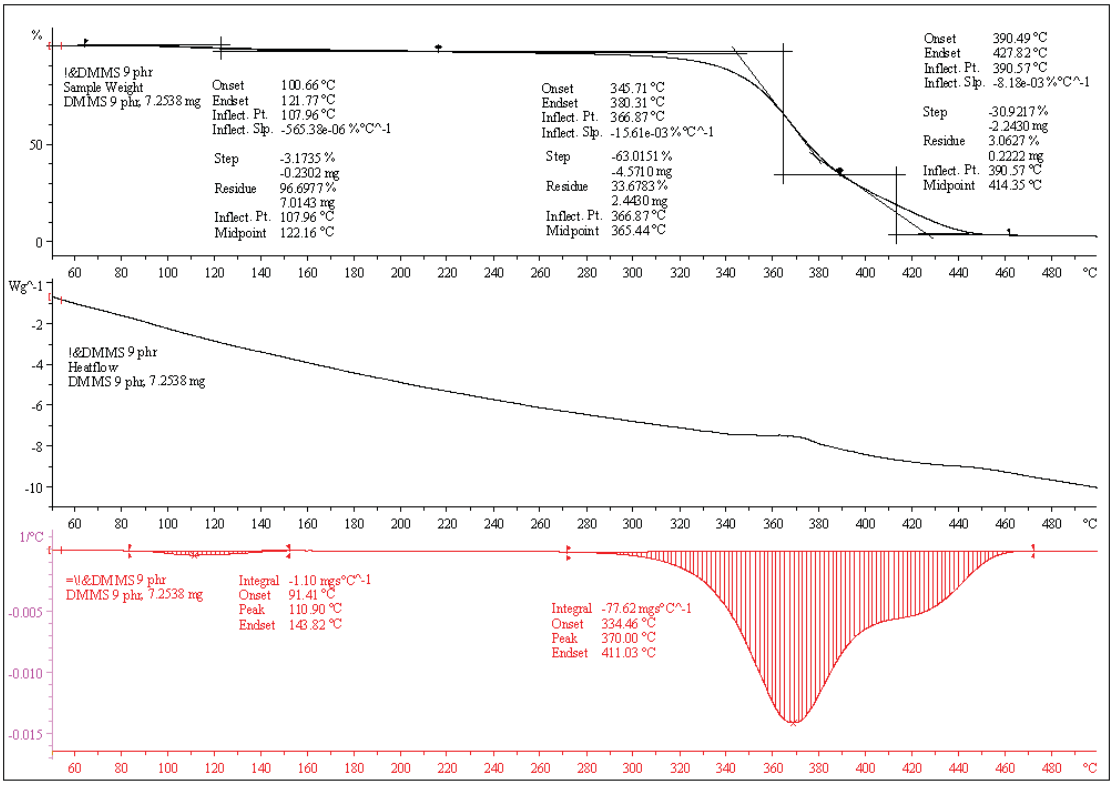
ภาพที่ 60 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 9 phr (NR-g-TMOS 9 phr)



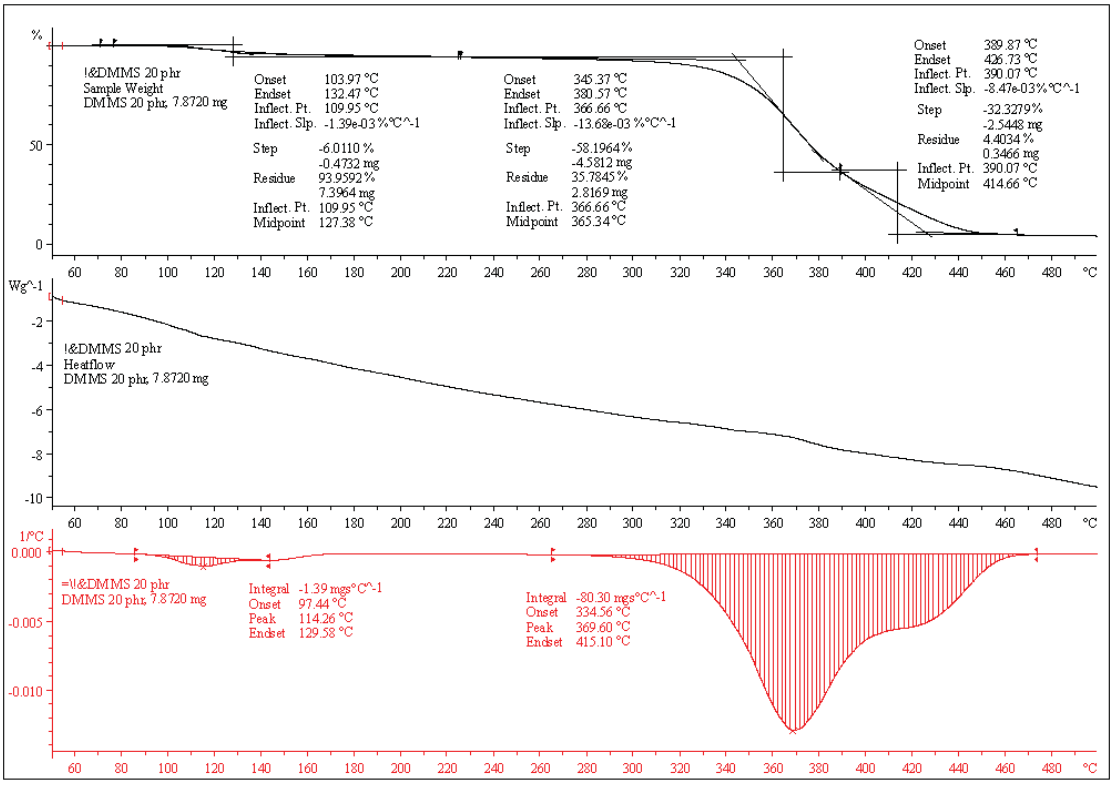
ภาพที่ 61 ^{1}H-NMR spectra ของยางธรรมชาติที่ผ่านการกราฟต์ด้วย Trimethoxy(7-octen-1-yl)silane 20 phr (NR-g-TMOS 20 phr)

ภาคผนวก ง

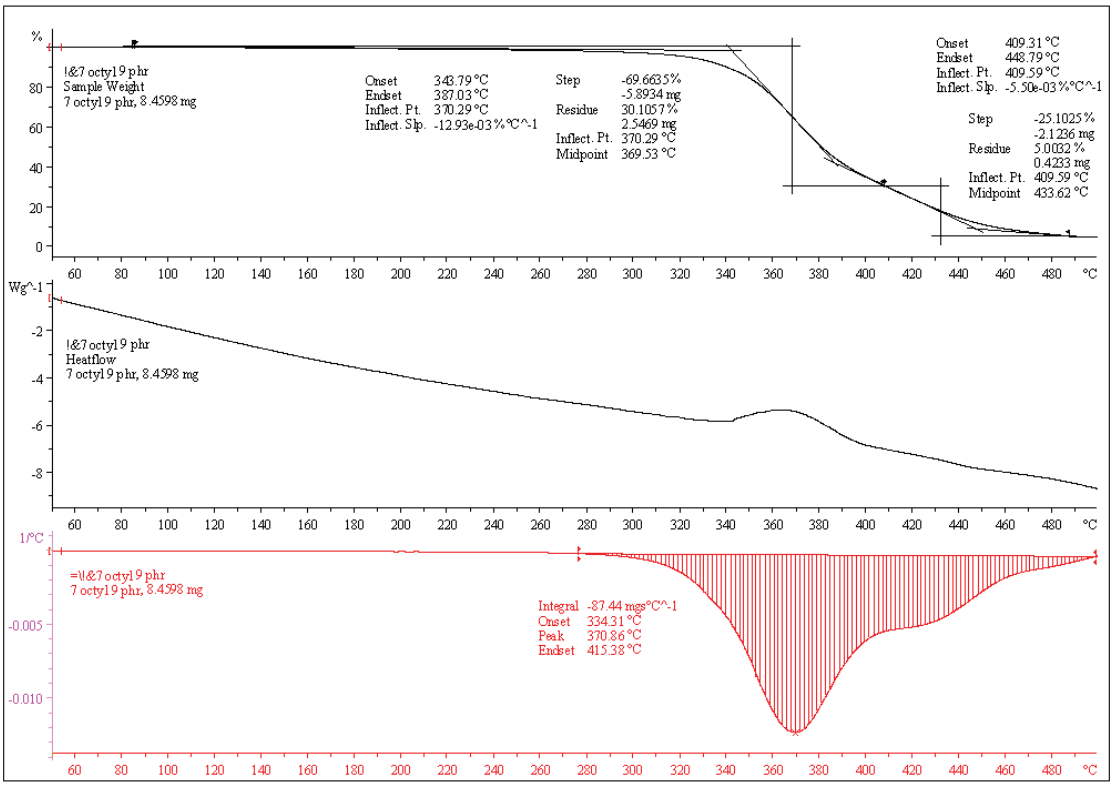
TGA Thermogram ของสารตัวอย่าง



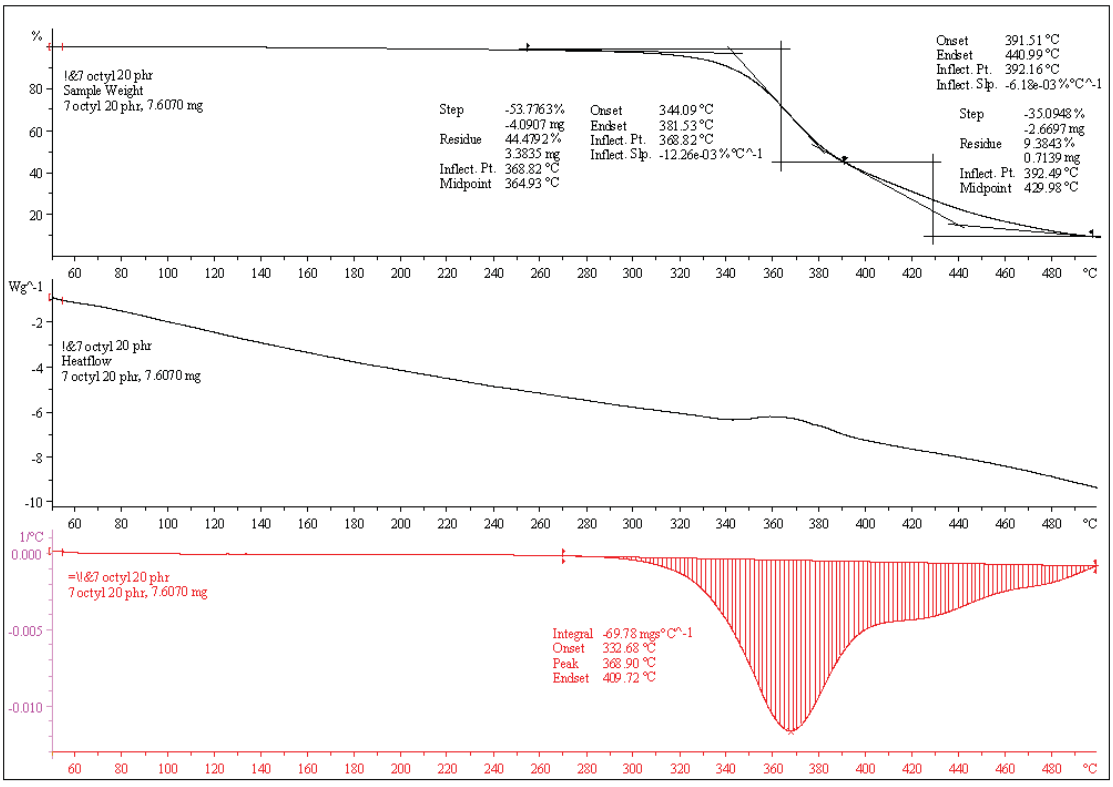
ภาพที่ 62 TGA thermogram ของ NR-g-DMMS 9 phr



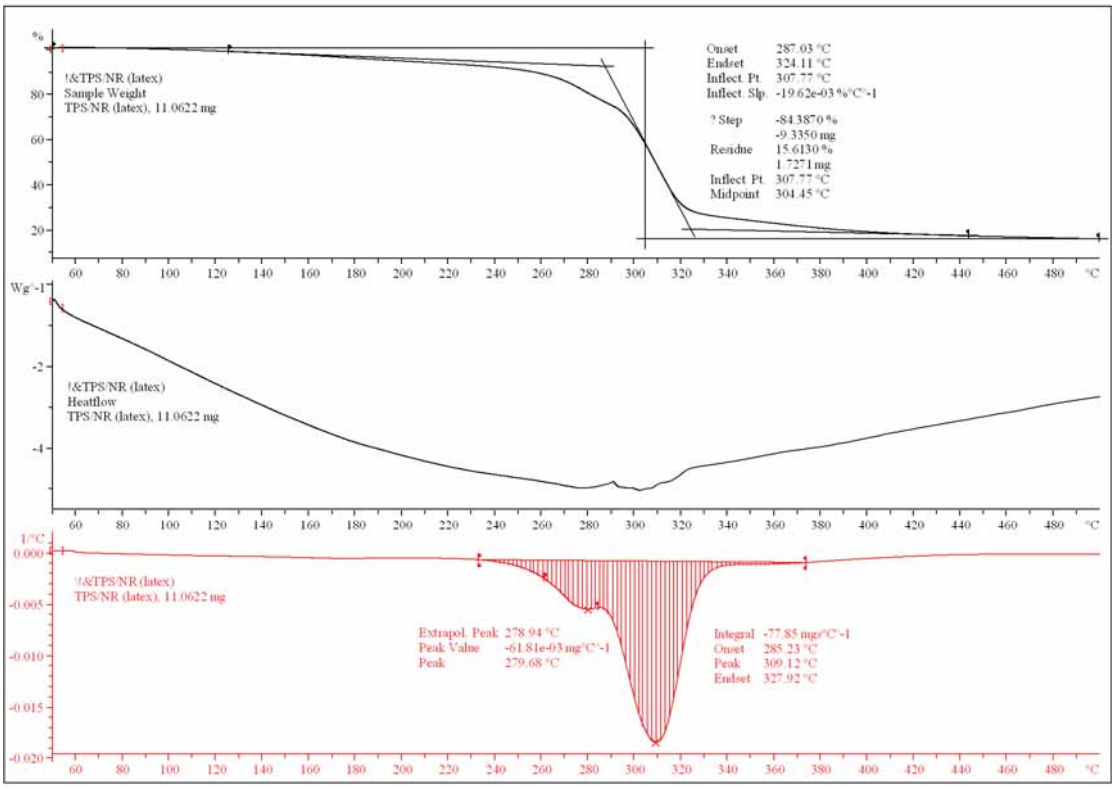
ภาพที่ 63 TGA thermogram ของ NR-g-DMMS 20 phr



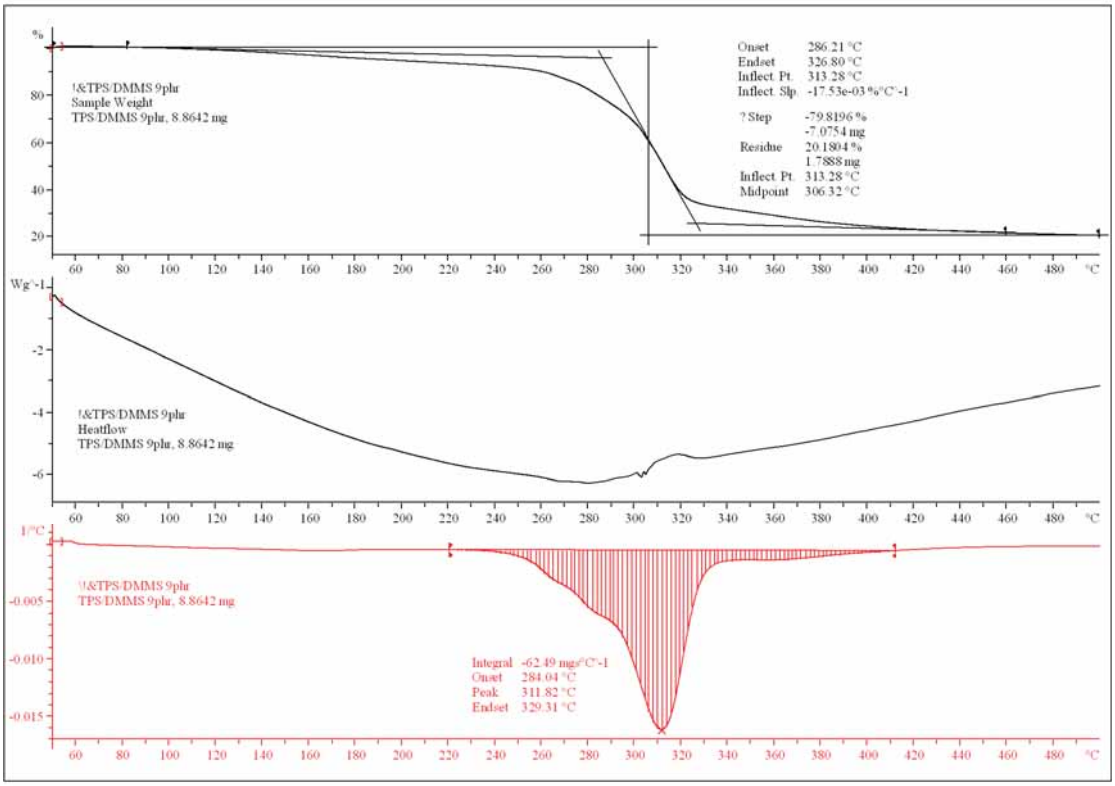
ภาพที่ 64 TGA thermogram ของ NR-g-TMOS 9 phr



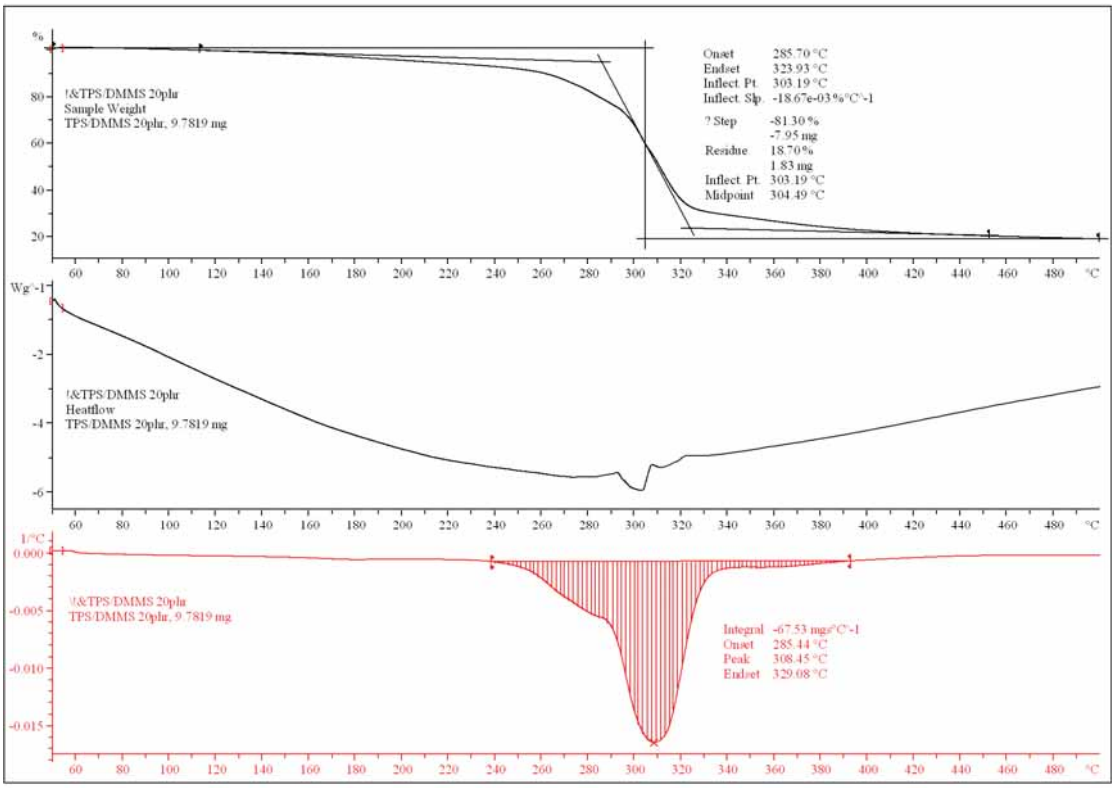
ภาพที่ 65 TGA thermogram ของ NR-g-TMOS 20 phr



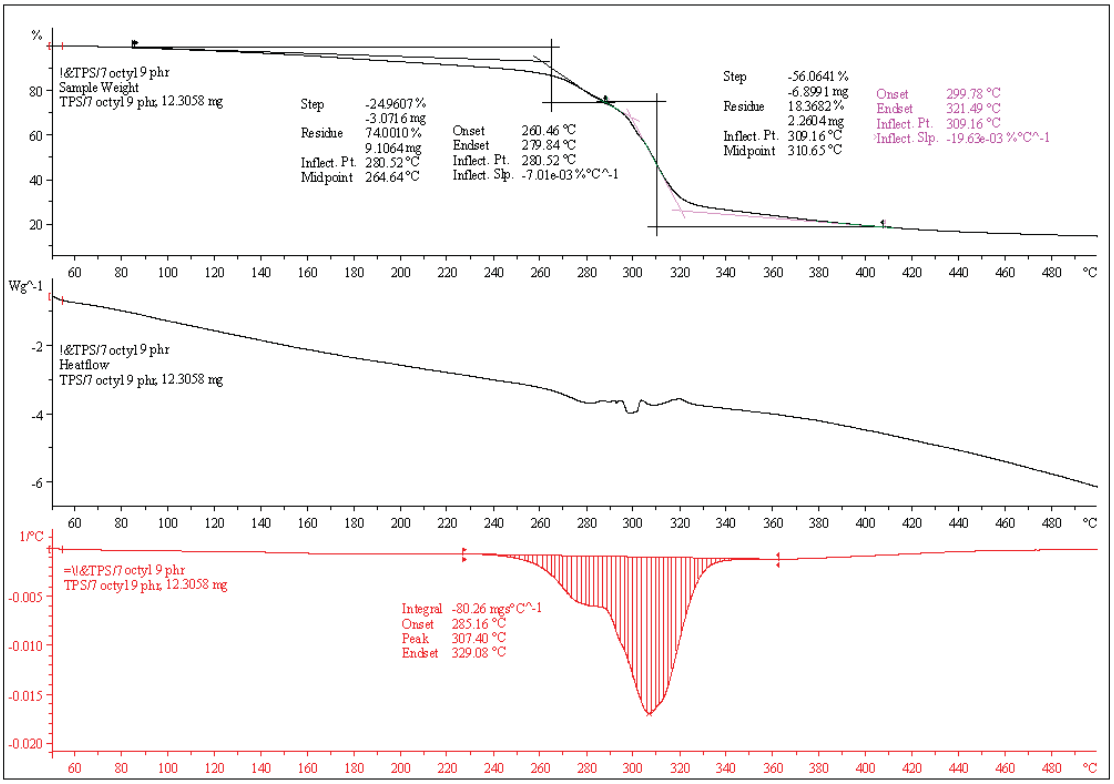
ภาพที่ 66 TGA thermogram ของ TPS+NR



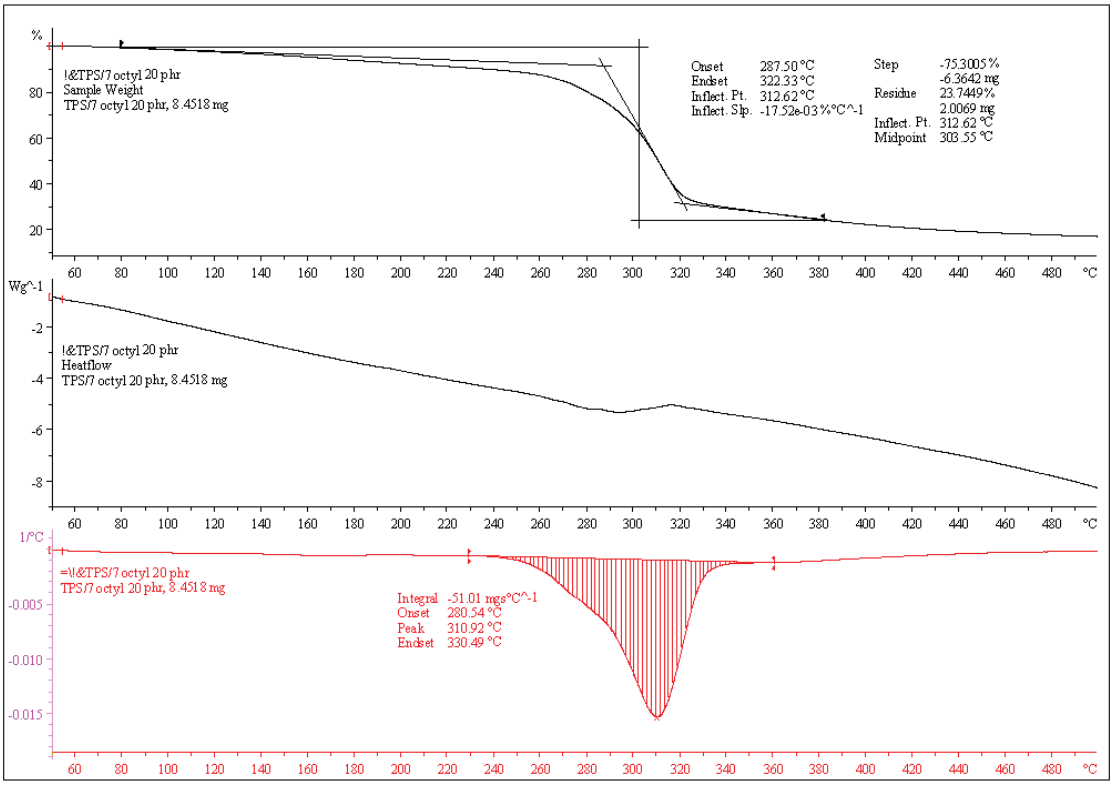
ภาพที่ 67 TGA thermogram ของ TPS+NR-g-DMMS 9 phr



ภาพที่ 68 TGA thermogram ของ TPS+NR-g-DMMS 20 phr



ภาพที่ 69 TGA thermogram ของ TPS+NR-g-TMOS 9 phr



ภาพที่ 70 TGA thermogram ของ TPS+NR-g-TMOS 20 phr

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาว เจกิตาน์ แก้วพารา
ที่อยู่	48 หมู่ 7 ตำบลบางระกำ อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม 73130
โทรศัพท์	08-5182-6532

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2551	ศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประสบการณ์ฝึกงาน

ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์และตรวจคุณภาพ
บริษัท เอสเอสแอล เมนูแฟคเจอริง (ประเทศไทย) จำกัด

ผลงานทางวิชาการ

1. **เจกิตาน์ แก้วพารา**, วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อำนาจ สิทธัตระกูล, “การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและยางธรรมชาติดัดแปร”, การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12, อาคารวิทยาลัยการปกครองส่วนท้องถิ่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น, 2554
2. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, อำนาจ สิทธัตตระกูล และ**เจกิตาน์ แก้วพารา** “ศักยภาพการผลิตและพัฒนาเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งในประเทศไทย”, ส่งเสริมเทคโนโลยี ปีที่ 35 ฉบับที่ 200(2551), 056-064, สิงหาคม-กันยายน