การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนสำหรับงานเคลือบผิวจากน้ำมันปาล์มดัดแปร

นางสาววัชรา จันทร์เพียร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5264-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF URETHANE OILS FOR SURFACE COATING FROM MODIFIED PALM OIL

Miss Watchara Junpien

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5264-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนสำหรับงานเคลือบผิวจากน้ำมันปาล์มดัดแปร
โดย	นางสาววัชรา จันทร์เพียร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัชรา จันทร์เพียร : การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนสำหรับงานเคลือบผิวจากน้ำมันปาล์มดัดแปร. (SYNTHESIS OF URETHANE OILS FOR SURFACE COATING FROM MODIFIED PALM OIL) อ.ที่ปรึกษา : รศ. อรอุษา สรวารี, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ จำนวนหน้า 98 หน้า. ISBN 974-17-5264-4.

งานวิจัยนี้เป็นการนำน้ำมันปาล์มมาดัดแปรด้วยปฏิกิริยาอินเตอร์เอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันทังหรือน้ำมันลินสีดที่ปริมาณน้ำมันปาล์ม 50-90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้น นำน้ำมันปาล์มที่ผ่านการดัดแปรมาทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลและโทลิลีนไดไอโซไซยาเนตที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1:0.8 และใช้เมทานอลเป็นสารบล็อก ได้น้ำมันยูรีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ยังสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1:0.9 ถึง 1:0.7 จากการทดลอง พบว่า น้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันทังเกิดเป็นเจลภายในเวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด เกิดเป็นเจลเช่นเดียวกัน โดยมีระยะเวลาการเกิดเป็นเจลตั้งแต่ 2-10 วัน ขึ้นกับปริมาณน้ำมันลินสีด สำหรับน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใสที่มีความหนืดต่ำและมีเสถียรภาพในการเก็บได้นานโดยไม่เกิดเป็นเจล

เมื่อนำน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีดและจากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรมาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มเปรียบเทียบกับน้ำมันยูรีเทนทางการค้า พบว่า ในกรณีของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปร ฟิล์มแห้งตัวได้เร็วขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันลินสีดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการแห้งตัวเป็นฟิล์มของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรลดลง เมื่อปริมาณหมู่ไอโซไซยาเนตลดลง สำหรับผลทดสอบสมบัติของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้จากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์ทุกสูตร มีความแข็งดี ความติดแน่นและความอ่อนตัวดีมาก และความทนทานต่อแรงกระแทกสูง ส่วนความทนน้ำและกรดดีเยี่ยม ความทนด่างพอใช้ แต่ความต้านทานการสึกหรอต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากน้ำมันยูรีเทนทางการค้า

ภาควิชาวัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต วัชรา จันทร์เพียร
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อรอุษา สรวารี
ปีการศึกษา 2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

4572484523 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORD : URETHANE OIL / MODIFIED PALM OIL / INTERESTERIFICATION

WATCHARA JUNPIEN : SYNTHESIS OF URETHANE OILS FOR SURFACE COATING FROM MODIFIED PALM OIL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. ONUSA SARAVARI. THESIS COADVISOR : ASST.PROF. VIMOLVAN PIMPAN , Ph.D. 98 pp. ISBN 974-17-5264-4

Modified palm oil was modified by interesterification with tung oil or linseed oil at 50-90 wt% of palm oil using sodium hydroxide as a catalyst. The modified palm oils were further reacted with glycerol and tolylene diisocyanate to obtain urethane oils at hydroxyl to isocyanate ratios of 1:0.8 using methanol as a blocking agent. Urethane oils from the unmodified palm oil with hydroxyl to isocyanate ratios varied from 1:0.9 to 1:0.7 were also synthesized. It was found that all the urethane oils synthesized from tung oil-modified palm oil were converted to gel within 24 hours whereas those prepared from linseed oil-modified palm oil were also converted to gel with the gel time varied from 2 to 10 days depended on linseed oil content. Meanwhile, the urethane oils synthesized from unmodified palm oil were yellowish, transparent, low viscosity liquids and had good storage stability without gel formation.

The urethane oils synthesized from linseed oil-modified and unmodified palm oils were characterized and their various film properties were determined and compared with those of the commercial urethane oil. A higher linseed oil amount in the urethane oils synthesized from modified palm oil and a lower diisocyanate content in those synthesized from unmodified palm oil resulted in shorter drying time. The films of all synthesized urethane oils exhibited good hardness, very good flexibility and adhesion, and high impact strength. They also showed excellent water and acid resistance but only fair alkali resistance. However, they had lower wear resistance compared to that of the commercial urethane oil.

Department Materials Science — Student's signature Watchara Junpien

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technilogy — Advisor's signature Onusa Saravari

Academic year 2003 — Coadvisor's signature Vimolvan Pimpan

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รศ. อรอุษา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผศ.ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงช่วยตรวจสอบในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและ แนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. รศ. ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

5. อ.ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

6. คุณวิไลศรี ลิมปพยอม นักวิทยาศาสตร์ของสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือในการใช้เครื่อง GC

7. บริษัท มรกตอินดัสตรี้ จำกัด, บริษัท ไทยมิตซุย สเปเชียลตี้ เคมิคัล จำกัด, โรงพิมพ์ธนบัตร ธนาคารแห่งประเทศไทย, บริษัท สยามเคมิคัลอินดัสตรี้ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบและสารเคมีในการทำวิจัย

8. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฏ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. วารสารปริทรรศน์..... 3

2.1 สารเคลือบผิว..... 3

2.1.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว..... 3

2.1.2 ส่วนประกอบของสารเคลือบผิว..... 4

2.1.3 การเกิดฟิล์ม..... 5

2.1.4 การแห้งของสารเคลือบผิว..... 6

2.2 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน..... 7

2.2.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน..... 7

2.2.1.1 ไอโซไซยาเนต..... 7

2.2.1.2 พอลิออล..... 9

2.2.1.3 สมบัติของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน..... 10

2.2.2 ประเภทของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน..... 10

2.3 น้ำมันยูรีเทน..... 11

2.3.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 12

2.3.1.1 น้ำมัน..... 12

2.3.1.2 ไดไอโซไซยาเนต และ พอลิออล..... 27

2.3.2 การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 27

2.3.3 กลไกของการเกิดพอลิเมอไรเซชันและการแห้งตัวของน้ำมันยูรีเทน.... 28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.3.3.1 กระบวนการออกซิไดซ์เอง..... 28
2.3.3.2 การเพิ่มขนาดโมเลกุลและการทิ้งไว้ให้บ่มตัว..... 30
2.3.4 สมบัติและการใช้งานของน้ำมันยูรีเทน 31

3. การทดลอง..... 34
3.1 การดัดแปรน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาอินเตอร์เอสเทอริฟิเคชัน..... 34
3.2 การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 36
3.3 การตรวจสอบสมบัติของสารเคลือบผิว..... 41
3.3.1 การทดสอบสมบัติในสถานะของเหลว..... 41
3.3.2 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม..... 45

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... 51
4.1 การดัดแปรน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาอินเตอร์เอสเทอริฟิเคชัน..... 51
4.1.1 การตรวจสอบชนิดและปริมาณของกรดไขมันในน้ำมัน
ด้วยเทคนิค GC..... 51
4.1.2 การทดสอบสมบัติของน้ำมันปาล์ม น้ำมันทัง น้ำมันลินสีดและ
น้ำมันปาล์มดัดแปร..... 52
4.2 การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 53
4.2.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 53
4.2.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันทังหรือ
น้ำมันลินสีดสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 54
4.2.2.1 น้ำมันปาล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยน้ำมันทัง..... 54
4.2.2.2 น้ำมันปาล์มที่ผ่านการดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด..... 55
4.3 การวิเคราะห์น้ำมันยูรีเทนเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี..... 56
4.4 การทดสอบสมบัติของน้ำมันยูรีเทน..... 63
4.4.1 การทดสอบสมบัติในสถานะของเหลว..... 63
4.4.2 การทดสอบระยะเวลาการแห้งตัว..... 66
4.4.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์มยูรีเทน..... 68
4.4.3.1 สมบัติเชิงกล..... 68

หน้า

4.4.3.2 การทดสอบความทนน้ำ ทนกรดและด่าง..... 70
4.4.3.3 การเปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้
กับน้ำมันยูรีเทนทางการค้า 71

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 74
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 74
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 75

รายการอ้างอิง..... 76

ภาคผนวก..... 79
ภาคผนวก ก..... 80
ภาคผนวก ข..... 86
ภาคผนวก ค..... 95

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	โครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ.....	14
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันชนิดต่าง ๆ.....	16
ตารางที่ 2.3	ผลของปริมาณและชนิดของน้ำมันที่มีผลต่อสมบัติของน้ำมันยูรีเทน.....	17
ตารางที่ 2.4	สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม.....	18
ตารางที่ 2.5	ตัวอย่างของพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน	27
ตารางที่ 3.1	สูตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการดัดแปรน้ำมันปาล์ม.....	36
ตารางที่ 3.2	สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มดัดแปร.....	39
ตารางที่ 3.3	สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร...	40
ตารางที่ 3.4	ความหนืดคิเนมาติก (สโตกส์) ของบับเบิลวิสโคมิเตอร์ที่ 25°C.....	42
ตารางที่ 3.5	การจัดลำดับความบกพร่องของฟิล์มจากการกรีดเป็นตาราง.....	49
ตารางที่ 4.1	ชนิดและปริมาณของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม น้ำมันทัง น้ำมันลินสีดและน้ำมันปาล์มดัดแปร.....	51
ตารางที่ 4.2	สมบัติของน้ำมันปาล์ม น้ำมันทัง น้ำมันลินสีด และน้ำมันปาล์มดัดแปร.....	52
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองในการหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน.....	54
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันทัง.....	55
ตารางที่ 4.5	ผลการทดลองการสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด.....	56
ตารางที่ 4.6	สมบัติในสถานะของเหลวของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด.....	64
ตารางที่ 4.7	สมบัติในสถานะของเหลวของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....	64
ตารางที่ 4.8	ความสามารถในการละลายของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด.....	65
ตารางที่ 4.9	ความสามารถในการละลายของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....	66

ตาราง หน้า

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาการแห้งตัวของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด (ชั่วโมง:นาที)..... 67

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาการแห้งตัวของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ชั่วโมง:นาที) 68

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด..... 69

ตารางที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร..... 69

ตารางที่ 4.14 สมบัติความทนน้ำ ความทนกรดและด่างของฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีด..... 70

ตารางที่ 4.15 สมบัติความทนน้ำ ความทนกรดและด่างของฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร..... 71

ตารางที่ 4.16 สมบัติของน้ำมันยูรีเทนทางการค้าเปรียบเทียบกับน้ำมันยูรีเทนที่เตรียมจากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีดและที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปร..... 72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยา Intramolecular Interesterification และ Intermolecular Interesterification..... 24

รูปที่ 3.1 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี..... 37

รูปที่ 3.2 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์..... 37

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การสังเคราะห์น้ำมันยูรีเทน..... 39

รูปที่ 3.4 มาตรวัดความหนืดชนิดการ์ดเนอร์–โฮลท์บับเบิลวิสโคมิเตอร์..... 42

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดสีแบบการ์ดเนอร์..... 43

รูปที่ 3.6 แอพพลิเคเตอร์..... 46

รูปที่ 3.7 Mechanical Scratch Test Apparatus..... 46

รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทก..... 47

รูปที่ 3.9 Conical Mandrel Test Apparatus..... 48

รูปที่ 3.10 Cross Hatch Cutter..... 48

รูปที่ 3.11 Wet Abrasion Scrub Tester 50

รูปที่ 4.1 สีของน้ำมันชนิดต่าง ๆ..... 53

รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1:0.8..... 57

รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันยูรีเทนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่ OH:NCO เท่ากับ 1:0.8..... 58

รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยน้ำมันลินสีดที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่ OH:NCO เท่ากับ 1:0.9 ที่เวลาต่าง ๆ กัน.... 59

รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่ OH:NCO เท่ากับ 1:0.9 ที่เวลาต่าง ๆ กัน... 60

รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1:0.9..... 61

รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มยูรีเทน..... 62

รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาแสดงการเกิดยูเรียและไบยูเรต..... 63