

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเมมเบรนจากยางธรรมชาติคอมโพสิต  
ไทเทเนียมไดออกไซด์  
Preparation and Characterization of Natural Rubber-TiO<sub>2</sub>  
Composites Membrane

กฤษฎา พ็ชรสิทธิ์  
Kritsada Phatcharasit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology  
Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

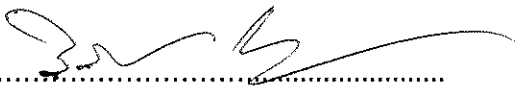
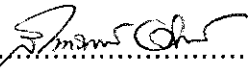
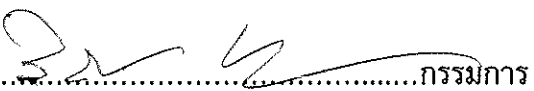
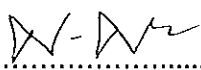
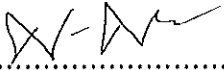
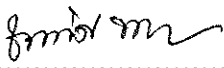
๖

|         |                      |
|---------|----------------------|
| เลขหมู่ | TS 1892 ๗4๕ ๒๕๕3 ๓.๒ |
| lib Key | 34646๕               |


(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์     การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเมมเบรนจากยางธรรมชาติคอมโพสิต  
 ไทยเหนียวไดออกไซด์  
 ผู้เขียน            นายกฤษฎา พัชรสิทธิ์  
 สาขาวิชา            วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

---

|                                                                                     |                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก                                                     | คณะกรรมการสอบ                                                                                         |
|    |  .....ประธานกรรมการ |
| (ดร.วิรัช ทวีปรีดา)                                                                 | (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพงษ์ อำนวยพานิชย์)                                                        |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม                                                     |  .....กรรมการ       |
|  | (ดร.วิรัช ทวีปรีดา)                                                                                   |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)                                                       |  .....กรรมการ     |
|                                                                                     | (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)                                                                         |
|                                                                                     |  .....กรรมการ     |
|                                                                                     | (ดร.ชวนพิศ ขาวคง)                                                                                     |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์  
 และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

  
 .....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเมมเบรนจากยางธรรมชาติคอมโพสิต  
ไทเทเนียมไดออกไซด์  
ผู้เขียน นายกฤษฎา พัทธสิทธิ์  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ปีการศึกษา 2552

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมและพัฒนาฟิล์มบางจากยางธรรมชาติคอมโพสิตไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการปรับปรุงสูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี ด้วยการผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปสารแขวนลอย แล้วขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยกระบวนการปาดฟิล์มบนแผ่นกระจก การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมด้วยกระบวนการบดผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำ 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะใช้สารละลายพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเลือกสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้ PEG ที่ความเข้มข้น 0.04 และ 0.10% โดยน้ำหนัก (T5PEG2 และ T5PEG5 ตามลำดับ) เนื่องจากสามารถผสมเข้ากับน้ำยางธรรมชาติได้ดี ไม่เกิดการปนเปื้อนจากสารพอลิเมอร์ และให้ฟิล์มบางที่มีลักษณะพื้นผิวที่ต้องการมากที่สุด ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากที่สุดที่สามารถเติมในฟิล์มยางได้ คือ 30% โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นเมื่อเลือกใช้สารตัวเร่งชนิด ZDEC เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเร่ง CBS และ TMTD นอกจากนี้สมบัติหลังการปมเร่งของแผ่นฟิล์มบางที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการใช้สารตัวเร่งชนิด CBS และ TMTD จากการศึกษาลักษณะของพันธะเชื่อมโยงโดยใช้เทคนิค XANES พบว่าฟิล์มบางที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC ให้พันธะเชื่อมโยงที่สั้นที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยแผ่นฟิล์มที่ได้จากการผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาคที่ความเข้มข้น 0.20% โดยน้ำหนัก (NR-T5PEG05-50) พบว่า แผ่นฟิล์มที่ได้มีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอด้านที่สัมผัสกับแผ่นกระจก ในขณะที่แผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศจะมีลักษณะขรุขระที่เกิดจากการเกาะรวมตัวกันของไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีหลุมลักษณะขนาด 50-100 นาโนเมตร เนื่องมาจากการแพร่ซึมผ่านของ PEG ออกไปที่ผิว โดย PEG สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C ลักษณะการเกาะรวมตัวกันของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) โดยลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางจะศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy) ส่วนสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางทำการวัดค่าความต้านทาน

ต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ก่อนและหลังการบ่มแรง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ  
ลักษณะของพันธะกำมะถันที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค XANES และ EXAFS

**Thesis Title** Preparation and Characterization of Natural Rubber-TiO<sub>2</sub> Composites Membrane  
**Author** Mr. Kritsada Phatcharasit  
**Major Program** Polymer science and Technology  
**Academic year** 2009

### ABSTRACT

In this research, natural rubber (NR) composite with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) film was prepared and developed from NR latex. The dispersion of TiO<sub>2</sub> was mixed with NR latex and other chemicals before casting on glass. The 50% dispersion of TiO<sub>2</sub> was prepared using ball mill and varied the type and concentration of dispersing agent such as poly(ethylene glycol) (PEG) and poly(vinyl alcohol) (PVA). The results showed that TiO<sub>2</sub> dispersion with PEG concentration at 0.04 and 0.10% by wt. can be mixed with NR latex very well and enhance the thin film with desired surface properties. The optimum concentration of TiO<sub>2</sub> that can be composite with NR latex is 30% by wt. The mechanical property, tensile strength, can be improved by choosing the accelerator. The results indicated that ZDEC is the best accelerator for this system to increase the film strength compared with CBS and TMTD. The results were confirmed using Sulfur K-edge XANES spectra. The peak shifting of Sulfur K-edge XANES spectra respond with the type of sulfidic crosslink and were found that the exiting of peak correspond with the film properties. Surface morphology of NR latex which mixed with 50% TiO<sub>2</sub> dispersion in the presence of PEG 0.20% by wt. was found that the surface adjacent to glass- surface is prune with many small holes dispersed on the surface while the other surface is difference with roughness and bigger size of hole, 50-100 nm in depth. The film morphology was studied using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The sulfur and titanium bonding were studied using XANES and EXAFS.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.วิรัช ทวีปรีดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและรองศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีตง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางการทำวิจัย การเขียน และการแก้ไขวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพงษ์ อำนวยพานิชย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำในงานวิจัย และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร.ชวนพิศ ขาวคง ที่รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนผู้ช่วยนักวิจัย (Research Assistant, RA) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนสำหรับหลักสูตรปริญญาโทเป็นระยะเวลา 2 ปี

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่กรุณาให้เวลาในการใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน ที่ BL8 และบริษัท โคแอกซ์ กรุ๊ป คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ขอขอบคุณศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างสูง และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์สารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้ความรัก ความอบอุ่น การอบรมเลี้ยงดูอย่างดี ตลอดจนอุปการะและสนับสนุนทางการศึกษา และเป็นกำลังใจสำคัญยิ่ง ขอขอบพระคุณญาติๆ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ทุกท่านที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ สนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในการวิจัยมาโดยตลอด

กฤษฎา พันธ์สิทธิ์

## สารบัญ

|                                   | หน้า |
|-----------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                          | (3)  |
| ABSTRACT                          | (5)  |
| กิตติกรรมประกาศ                   | (6)  |
| สารบัญ                            | (7)  |
| รายการตาราง                       | (10) |
| รายการภาพประกอบ                   | (11) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ           | (15) |
| บทที่                             |      |
| 1. บทนำ                           |      |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย       | 2    |
| 1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย   | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ     | 2    |
| 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  |      |
| 2.1 ยางธรรมชาติ                   | 3    |
| 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ  | 3    |
| 2.1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ     | 3    |
| 2.1.3 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ | 4    |
| 2.1.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ  | 6    |
| 2.2 สารเคมีประกอบยาง              | 9    |
| 2.2.1 สารทำให้ยางคงรูป            | 9    |
| 2.2.2 สารป้องกันยางเสื่อม         | 11   |
| 2.2.3 สารตัวเติม                  | 11   |
| 2.2.4 สารช่วยในกระบวนการผลิต      | 11   |
| 2.2.5 สารกลุ่มอื่นๆ               | 12   |
| 2.2.6 พอลิเอทิลีนไกลคอล           | 14   |
| 2.2.7 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์          | 15   |
| 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์            | 17   |
|                                   | (7)  |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                           | หน้า |
|-----------------------------------------------------------|------|
| 2.4 กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน                               | 20   |
| 2.4.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน             | 22   |
| 2.4.2 ประเภทของเยื่อเลือกผ่าน                             | 25   |
| 2.4.3 วัสดุสำหรับผลิตเยื่อเลือกผ่าน                       | 27   |
| 2.4.4 การแบ่งชนิดของเยื่อเลือกผ่าน                        | 28   |
| 2.4.5 โครงสร้างพอลิเมอร์ต่อสมบัติเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น    | 29   |
| 2.4.6 การวัดคุณลักษณะของเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น             | 30   |
| 2.4.7 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน                  | 30   |
| 2.5 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษา                                | 35   |
| 2.6 การตรวจสอบเอกสาร                                      | 37   |
| 3. วิธีการทดลอง                                           |      |
| 3.1 สารเคมี                                               | 42   |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย                             | 43   |
| 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง                                    | 51   |
| 3.3.1 ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์          | 51   |
| 3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์       | 53   |
| 3.3.3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ             | 53   |
| 3.3.4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางจากน้ำยางคอมโพสิต             | 62   |
| 3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ                           | 62   |
| 3.3.4.2 การศึกษาลักษณะของพันธะการเชื่อมโยงในฟิล์มบาง      | 63   |
| 3.3.4.3 การศึกษาการกระจายตัวของ $\text{TiO}_2$ ในฟิล์มบาง | 64   |
| 3.3.4.4 การศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์มบาง                  | 64   |
| 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง                         |      |
| 4.1 ผลของการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์    | 65   |
| 4.1.1 ขนาดอนุภาค $\text{TiO}_2$ ในสารแขวนลอย              | 68   |
| 4.1.2 การกระจายตัวและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารแขวนลอย    | 70   |
| 4.1.3 โครงสร้างของ $\text{TiO}_2$ ในสารแขวนลอย            | 75   |



## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                      | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| 4.2 ผลของการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ                  | 76   |
| 4.2.1 ผลของชนิดสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติฟิล์มบาง         | 76   |
| 4.2.1.1 สมบัติเชิงกล                                                 | 76   |
| 4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา                                         | 78   |
| 4.2.1.3 องค์ประกอบของแผ่นฟิล์มบางคอมโพสิตด้วย TiO <sub>2</sub>       | 86   |
| 4.3 ผลของการปรับปรุงสมบัติของ NR-TiO <sub>2</sub>                    | 87   |
| 4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา                           | 87   |
| 4.3.2 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเร่ง และกำมะถัน                        | 90   |
| 4.3.2.1 สมบัติเชิงกล                                                 | 90   |
| 4.3.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา                                         | 97   |
| 4.3.2.3 ลักษณะของพันธะเชื่อมโยง                                      | 104  |
| 4.3.2.4 โครงสร้างของ TiO <sub>2</sub> ในฟิล์มบาง NR-TiO <sub>2</sub> | 109  |
| 5.สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ                                        |      |
| 5.1 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์                            | 112  |
| 5.2 การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ                               | 112  |
| 5.3 การปรับปรุงสมบัติของ NR-TiO <sub>2</sub>                         | 112  |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ                                                       | 113  |
| บรรณานุกรม                                                           | 114  |
| ภาคผนวก                                                              | 120  |
| ก สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางจากน้ำยางคอมโพสิต                           | 121  |
| ข ผลของสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย TiO <sub>2</sub>         | 132  |
| ค ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย                      | 136  |
| ง FT-IR ของฟิล์มบางธรรมชาติคอมโพสิต                                  | 148  |
| จ การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน                                             | 149  |
| ประวัติผู้เขียน                                                      | 156  |

## รายการตาราง

| ตาราง                                                                                            | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ                                                                  | 4    |
| 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูป                                                                 | 8    |
| 2.3 หน้าที่ของสารเคมีและปริมาณการใช้สารต่างๆ                                                     | 13   |
| 2.4 ส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ในสูตรยางพื้นฐาน                                    | 14   |
| 2.5 สมบัติต่างๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์                                                            | 17   |
| 2.6 ประเภทกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน                                                         | 24   |
| 2.7 วิธีหลักๆ ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างและขนาดของรูพรุน                                               | 30   |
| 2.8 ขนาดโมเลกุลของก๊าซหลายชนิด                                                                   | 33   |
| 2.9 วัสดุเยื่อเลือกผ่านและโมดูลของการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน                                   | 34   |
| 3.1 สูตรการเตรียมสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$                                                       | 51   |
| 3.2 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$ โดยมี PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค | 55   |
| 3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$ โดยมี PVA เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค | 56   |
| 3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี                                                                 | 57   |
| 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี                                                                 | 58   |
| 4.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$ โดยมี PEG เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค  | 77   |
| 4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$ โดยมี PVA เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค  | 77   |
| 4.3 ปริมาณการหายไปขององค์ประกอบต่างๆ ใน NR- $\text{TiO}_2$                                       | 87   |

## รายการรูป

| รูปที่                                                                                                                                                             | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-Polyisoprene                                                                                                            | 3    |
| 2.2 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ trans-1,4-Polyisoprene                                                                                                          | 4    |
| 2.3 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ                                                                                                                         | 5    |
| 2.4 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก เมื่อ $x \geq 3$ (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล (thiol) | 10   |
| 2.5 โครงสร้างพอลิเอทิลีนไกลคอล                                                                                                                                     | 14   |
| 2.6 กลไกการเกิดโพโตแคตะไลซิส                                                                                                                                       | 18   |
| 2.7 กลไกการเกิดสภาพซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก                                                                                                                               | 19   |
| 2.8 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน                                                                                                                                 | 22   |
| 2.9 ตัวอย่างโมเลกุล/อนุภาค ที่สามารถแยกได้โดยใช้กระบวนการเยื่อเลือกผ่านและการกรอง                                                                                  | 24   |
| 2.10 การแบ่งประเภทของเยื่อเลือกผ่านตามโครงสร้างของเยื่อเลือกผ่าน                                                                                                   | 26   |
| 2.11 เยื่อเลือกผ่านแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น                                                                                                                       | 29   |
| 2.12 ลักษณะการแพร่ของก๊าซผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น                                                                                                                 | 32   |
| 2.13 รูปร่างภายนอกโมดูลของกระบวนการ gas separation membrane และรูปตัดขวางของเยื่อเลือกผ่าน                                                                         | 35   |
| 2.14 ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยกลวง                                                                                                                                   | 35   |
| 3.1 มีดปาดฟิล์ม                                                                                                                                                    | 43   |
| 3.2 เครื่องชั่งสาร                                                                                                                                                 | 44   |
| 3.3 ชุดกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง                                                                                                                                      | 44   |
| 3.4 เครื่องบดลดขนาดอนุภาคด้วยลูกบดในหม้อบดบนรางกลิ้ง                                                                                                               | 45   |
| 3.5 เครื่องวัดขนาดอนุภาค                                                                                                                                           | 45   |
| 3.6 เครื่องทดสอบหาความทนต่อแรงดึง                                                                                                                                  | 46   |
| 3.7 ตู้อบบ่มเร่ง                                                                                                                                                   | 46   |
| 3.8 ตู้อบอากาศร้อน                                                                                                                                                 | 47   |
| 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน                                                                                                                                | 47   |
| 3.10 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบล                                                                                                                               | 48   |
| 3.11 เครื่องวัดความหนา                                                                                                                                             | 48   |
| 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด                                                                                                                           | 49   |
| 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม                                                                                                                               | 49   |

## รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                      | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.14 เครื่องวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบของธาตุ                                                                                                                  | 50   |
| 3.15 เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์                                                                                                                         | 50   |
| 3.16 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการ casting                                                                                         | 54   |
| 3.17 ขั้นตอนการชุบตั้มเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C                                                                                                   | 62   |
| 4.1 ลักษณะของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่เตรียมโดยใช้ PEG ร่วมกับ $TiO_2$<br>a) PEG 0.04% b) PEG 0.10% และ c) PEG 0.20% โดยน้ำหนัก                                | 66   |
| 4.2 ลักษณะของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่เตรียมโดยใช้ PVA ร่วมกับ $TiO_2$<br>a) PVA 0.04% b) PVA 0.10% และ c) PVA 0.20% โดยน้ำหนัก                                | 67   |
| 4.3 ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่เตรียมโดยใช้ $TiO_2$ 50 phr<br>ร่วมกับ PEG ที่ความเข้มข้น 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก                         | 69   |
| 4.4 ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่เตรียมโดยใช้ $TiO_2$ 50 phr<br>ร่วมกับ PVA ที่ความเข้มข้น 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก                         | 69   |
| 4.5 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่เตรียมโดยใช้ $TiO_2$ 50 phr<br>ร่วมกับ PEG 0.04% โดยน้ำหนัก                                               | 70   |
| 4.6 ภาพถ่าย SEM ของสารแขวนลอย $TiO_2$                                                                                                                       | 71   |
| 4.7 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ผสมเบนโทไนด์เคลย์ร่วมกับวัลทามอล                                                                                   | 72   |
| 4.8 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ผสม PEG เป็นปริมาณ<br>a) 0.04 และ b) 0.10% โดยน้ำหนัก                                                              | 73   |
| 4.9 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ผสม PVA เป็นปริมาณ<br>a) 0.04 และ b) 0.10% โดยน้ำหนัก                                                              | 74   |
| 4.10 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของ $TiO_2$                                                                                                | 75   |
| 4.11 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางผสมกับสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ใช้วัลทามอล เป็น<br>dispersing agent a) ด้านผิวที่สัมผัสกับอากาศ, b) ด้านผิวที่สัมผัสกับแผ่นกระจก   | 78   |
| 4.12 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบางผสมกับสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ใช้วัลทามอล เป็น<br>dispersing agent a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก | 79   |
| 4.13 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางผสมกับสารแขวนลอย $TiO_2$ ที่ใช้ PEG เป็น<br>dispersing agent เป็นปริมาณ a) 0.09, b) 0.20 และ c) 0.40% โดยน้ำหนัก                | 81   |

## รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.14   | 82   |
| 4.15   | 84   |
| 4.16   | 85   |
| 4.17   | 86   |
| 4.18   | 87   |
| 4.19   | 89   |
| 4.20   | 90   |
| 4.21   | 91   |
| 4.22   | 92   |
| 4.23   | 93   |
| 4.24   | 94   |
| 4.25   | 95   |
| 4.26   | 96   |
| 4.27   | 97   |
| 4.28   | 98   |
| 4.29   | 99   |
| 4.30   | 100  |
| 4.31   | 101  |

## รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                                       |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.32   | ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO <sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr                                  | 102 |
| 4.33   | ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO <sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr                                  | 103 |
| 4.34   | ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO <sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr                                  | 104 |
| 4.35   | การศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันโดยเทคนิคซินโครตรอน                                                         | 105 |
| 4.36   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr                                                  | 105 |
| 4.37   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr                                                  | 106 |
| 4.38   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr                                                  | 107 |
| 4.39   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกำมะถัน 0.5 phr                                | 108 |
| 4.40   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกำมะถัน 1.0 phr                                | 108 |
| 4.41   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr                                | 109 |
| 4.42   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของสารแขวนลอย T5PEG2 ของตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr | 110 |
| 4.43   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของสารแขวนลอย T5PEG5 ของตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr | 110 |
| 4.44   | การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของ TiO <sub>2</sub> ชนิดโครงสร้าง Rutile                     | 111 |

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

| ตัวย่อ              | ชื่อภาษาอังกฤษ                                        | ชื่อภาษาไทย                                                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| AFM                 | Atomic force microscope                               | กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม                                        |
| CBS                 | N-Cyclohexy-2-benzothizyl sulfonamide                 | ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์                            |
| EXAFS               | extended x-ray absorption fine structure spectroscopy |                                                               |
| FT-IR               | Fourier transform infrared spectrometer               | เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์               |
| NR                  | natural rubber                                        | ยางธรรมชาติ                                                   |
| NR-TiO <sub>2</sub> | natural rubber-titanium dioxide                       | ยางธรรมชาติคอมโพสิตไทเทเนียมไดออกไซด์                         |
| PEG                 | polyethylene glycol                                   | พอลิเอทิลีนไกลคอล                                             |
| PVA                 | poly vinyl alcohol                                    | พอลิไวนิลแอลกอฮอล์                                            |
| S                   | sulfur                                                | กำมะถัน                                                       |
| SEM                 | scanning electron microscope                          | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด                           |
| TiO <sub>2</sub>    | titanium dioxide                                      | ไทเทเนียมไดออกไซด์                                            |
| TMTD                | tetramethyl thiuram disulfide                         | เตตระเมทิลไทยูรามไดซัลไฟด์                                    |
| XANES               | x-ray absorption near edge structure spectroscopy     | เทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ช่วงใกล้ขอบการดูดกลืนรังสี |
| ZDEC                | zinc diethyldithiocarbamate                           | ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต                                   |
| ZnO                 | zinc oxide                                            | ซิงค์ออกไซด์                                                  |

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์         | ชื่อภาษาอังกฤษ               | ชื่อภาษาไทย                          |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| °C                | degree celsius               | องศาเซลเซียส                         |
| %                 | percent                      | เปอร์เซ็นต์                          |
| N                 | newton                       | นิวตัน                               |
| N/mm <sup>2</sup> | newton per millimeter squar  | นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร              |
| mm <sup>2</sup>   | millimeter squar             | ตารางมิลลิเมตร                       |
| MPa               | Mega pascal                  | เมกะพาสคาล                           |
| phr               | Part per hundred rubber      | ส่วนในร้อยส่วนของยาง                 |
| T <sub>g</sub>    | Glass transition temperature | อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ<br>คล้ายแก้ว |
| µm                | micrometer                   | ไมโครเมตร                            |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยจัดว่ายางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยมีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่ประเทศไทยใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางใช้ในประเทศเพียงร้อยละ 10 อีกร้อยละ 90 เป็นการส่งออก ซึ่งการส่งออกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของยางแปรรูปขั้นต้น ประกอบด้วย ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางเครพ และน้ำยางข้น โดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางสามารถสร้างรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศได้ประมาณ ร้อยละ 38.5 ของการส่งออกและผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมด (สถาบันวิจัยยาง, 2009) เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) และความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) จึงมีการนำยางธรรมชาติมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ ถุงมือแพทย์ วัสดุวิศวกรรม และอื่นๆ

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตเยื่อเลือกผ่านได้มีการปรับปรุงทั้งทางด้านการวิจัยและการประยุกต์การใช้งานที่หลากหลาย การพัฒนาเยื่อเลือกผ่านจะต้องเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ปัจจุบันมีการใช้เยื่อเลือกผ่านกันอย่างแพร่หลายในประเทศแต่อุตสาหกรรมภายในประเทศไทยยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง หากสามารถผลิตเยื่อเลือกผ่านมีคุณภาพขึ้นมาใช้เองในประเทศจะสามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้

การปรับปรุงหรือพัฒนาสมบัติของแผ่นเยื่อเลือกผ่านจากยางธรรมชาติให้มีลักษณะเฉพาะ นอกจากการปรับปรุงโครงสร้างและการผสมพลาสติกเข้าไปในยางด้วยวิธีต่างๆ แล้วยังสามารถทำได้โดยการใส่สารตัวเติมที่มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป สารตัวเติมโดยทั่วไปที่ใส่เข้าไปในยาง เช่น ซิลิกา (silica) เกลย์ (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) เป็นต้น เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตและเป็นการเสริมประสิทธิภาพในบางประการให้แก่ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ แต่จะต้องใช้สารตัวเติมในปริมาณมากระดับหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาและปรับปรุงความเข้ากันได้ของสารตัวเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในยางทั้งที่อยู่ในรูปของยางแท่งและน้ำยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระดับต่างๆ นอกจากจะช่วยเพิ่มความขาว และสมบัติทางกลบางประการแล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการซึมผ่านได้ของก๊าซบางชนิด ทำให้สามารถแยกก๊าซบางชนิดออกจากก๊าซที่ต้องการเพิ่มความบริสุทธิ์ได้ และงานวิจัยนั้นนอกจากจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติแล้วยังทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ๆ ของ

การนำยางธรรมชาติไปใช้งานด้านเยื่อเลือกผ่าน ทำให้ได้องค์ความรู้ใหม่ๆของการแปรรูปยางธรรมชาติและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีเยื่อเลือกผ่านได้อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติและลักษณะของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมไทเทเนียมไดออกไซด์
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมแผ่นฟิล์มบางจากยางธรรมชาติคอมโพสิต

### 1.3 ขอบเขตและการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาความเข้ากันได้ของ  $\text{TiO}_2$  โดยทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ด้วยการผสมกับ
  - พอลิเอทิลีนไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 4000 กรัมต่อโมล
  - พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ น้ำหนักโมเลกุล 8000 กรัมต่อโมล
2. ศึกษาความเข้ากันได้ของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  กับน้ำยางธรรมชาติ
3. ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่เตรียม
4. ศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางกลของฟิล์มบางที่เตรียม
5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เยื่อเลือกผ่านชนิดที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ
2. สามารถนำไปพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์เยื่อเลือกผ่านที่มีความหลากหลายมากขึ้น
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการซึมผ่านของก๊าซบางชนิด ทำให้สามารถแยกก๊าซบางชนิดออกจากก๊าซที่ต้องการได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

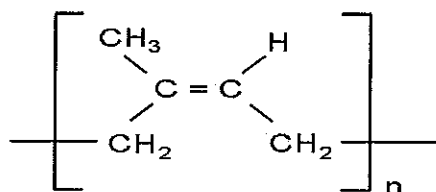
#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

##### 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนใหญ่มีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรทางเคมี คือ  $C_5H_8$  โครงสร้าง 1 โมเลกุลประกอบด้วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบ *cis* (*linear cis*-1,4-polyisoprene) ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วยไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 กรัมต่อโมล มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างมาก โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนอยู่ด้วยประมาณ 5% เช่น สารพวกโปรตีน ซีเถ้า เป็นต้น (วารสาร, 2549) ยางธรรมชาติมีความหนาแน่น เท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20°C มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางธรรมชาติเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะคล้ายแก้ว (พงษ์ธร, 2547)

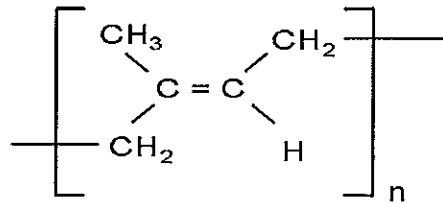
##### 2.1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ได้มาจากต้นยางพาราที่อยู่ในตระกูล *Hevea Brasiliensis* ซึ่งมีแหล่งกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ มีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-Polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่สม่ำเสมอทำให้ยางธรรมชาติไม่ตกผลึกที่อุณหภูมิห้องและเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Young, 1991)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ *cis*-1,4-Polyisoprene (Young, 1991)

ส่วนน้ำยางจากต้น Gutta percha และ Balata จะมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ *trans*-1,4-Polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และมีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นระเบียบกว่าแบบ *cis*-1,4-Polyisoprene ดังนั้นจึงสามารถตกผลึกได้ ทำให้เป็นวัสดุที่แข็งภายใต้สภาวะปกติ (Young, 1991)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ *trans*-1,4-Polyisoprene (Young, 1991)

### 2.1.3 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว จัดเป็นสารแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดมีค่าประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ (centipoise)

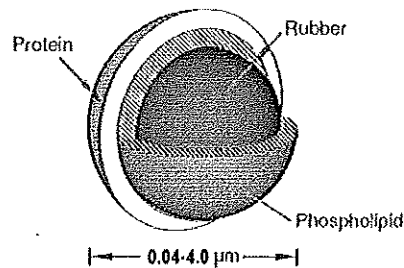
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ (Blackley, 1997)

| ส่วนประกอบ                                          | เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content; TSC) | 27 - 48                  |
| เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC)              | 25 - 45                  |
| สารพวกโปรตีน                                        | 1 - 1.5                  |
| สารพวกเรซิน                                         | 1 - 1.25                 |
| ซีเถ้า                                              | สูงถึง 1                 |
| น้ำตาล                                              | 1                        |
| น้ำ                                                 | ส่วนที่เหลือจนครบ 100    |

### 1. ส่วนของเนื้อยาง มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ คือ

1.1 อนุภาคยาง ถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีนโดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกและอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5% โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวก

ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีความหนาแน่น 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปค่อนข้างกลมคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากอยู่ระหว่าง 0.04-4 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 2.3 อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดไม่เกิน 0.4 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กจะอยู่กับหางน้ำยาง (Skim latex)



รูปที่ 2.3 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ (กนกวรรณ, 2543)

1.2 โปรตีน (Protein) โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางมีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง ส่วนที่เหลือประมาณ 50% จะอยู่ในชั้นน้ำ และอีก 25% จะอยู่ในส่วนของสารลูทอยด์ โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่เป็นชนิดแอลฟาไกลบูลิน และฮีวิน ( $\alpha$ -Globulin และ Hevein) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยางมีโปรตีนห่อหุ้มส่วนใหญ่เป็นพวกแอลฟาไกลบูลิน ซึ่งไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายในกรด ต่าง สำหรับโปรตีนที่ห่อหุ้มผิวรอบนอกของอนุภาคยาง ซึ่งเป็นโปรตีนพวกฮีวินสามารถละลายในน้ำได้ ทำหน้าที่ป้องกันอนุภาคยางมารวมตัวกัน

1.3 ไขมัน (Lipid) ไขมันอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิด ชนิด  $\alpha$ -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง

## 2. ส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ คือ

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม เซรัมของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรตเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาชิทอล (Quebrachitol) น้ำตาลเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียใช้เป็นอาหารเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายตัวให้กรดโมเลกุลขนาดเล็กๆ ทำให้น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพและรวมตัวเป็นก้อน กรดเหล่านี้เป็นกรดที่ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) ประกอบด้วย กรดฟอร์มิก กรดอะซีติก และกรดโพรไพโอนิก เป็นต้น ดังนั้นว่า

VFA จึงเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสภาพของน้ำยาง โดยมาตรฐานสากลของน้ำยางชั้นกำหนดให้มีค่า VFA ไม่เกิน 0.2 หน่วย

2.2 โปรตีน และกรดอะมิโนเป็นส่วนที่อยู่ในเซรุ่มของน้ำยางมีค่า Isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า Isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ

2.3 ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่นๆ ลูทอยด์ (Lutoids) เป็นอนุภาคที่ค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5–3 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อบางๆ ภายในเยื่อบางๆ นี้มีทั้งสารละลายและสารที่แขวนลอย มีค่า pH เท่ากับ 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 3% และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2% นอกจากนี้ยังมีส่วนของสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5% และมีสารโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลืองหรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ลูทอยด์ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสด ทำให้ลูทอยด์บวมและแตกง่าย ขณะที่ลูทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเมื่อลูทอยด์แตกความหนืดก็จะลดลง หากเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางสด พบว่า ส่วนของลูทอยด์และสารพวกโลหะแมกนีเซียมจะรวมตัวกับแอมโมเนีย เกิดการตกตะกอนเป็นตะกอนสีน้ำตาลและสีม่วงแยกตัวออกจากเนื้อยางและเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างสามารถแยกออกได้ สารอื่นๆ โดยมากเป็นอนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey wyssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้นมีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้มสามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรุ่ม

#### 2.1.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัว ได้ค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า strain-induced crystallization ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวนี้ทำให้น้ำยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) ซึ่งการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังคงทำให้น้ำยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีสมบัติอื่น ดังต่อไปนี้ (พงษ์ธร, 2547)

2.1.4.1 ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม หรือใกล้เคียงขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2.1.4.2 ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติเยื่อมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

2.1.4.3 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง โดยปกติยางธรรมชาติมีความทนต่อแรงดึงประมาณ 20 MPa หรือมากกว่า และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วยอาจมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงถึง 30 MPa (Hofmann, 1989) ซึ่งสมบัตินี้ ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่ม และแข็งแรงได้ เช่น การทำถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น

2.1.4.4 ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

2.1.4.5 สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

2.1.4.6 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงต่ำกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

2.1.4.7 ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง  $10^{15}$  หรือ  $10^{16}$  ohm cm

2.1.4.8 การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งมีสมบัติดีกว่ายางเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ ยางบิวตาไดอีน (BR) และยางซิลิโคน (Q)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูป (พงษ์ธร, 2547)

| สมบัติ                                          | ชนิดของยาง |    |     |    |     |    |        |      |
|-------------------------------------------------|------------|----|-----|----|-----|----|--------|------|
|                                                 | NR         | IR | SBR | BR | NBR | CR | (X)IIR | EPDM |
| ความทนทานต่อแรงดึง<br>(ไม่มีสารตัวเติมเสริมแรง) | 1          | 2  | 5   | 6  | 5   | 3  | 4      | 5    |
| ความทนทานต่อแรงดึง<br>(มีสารตัวเติมเสริมแรง)    | 1          | 2  | 2   | 4  | 2   | 2  | 3      | 3    |
| การยืดตัวสูงสุด                                 | 1          | 1  | 2   | 3  | 2   | 2  | 2      | 3    |
| ความต้านทานต่อการขาด<br>(มีสารตัวเติมเสริมแรง)  | 4          | 4  | 3   | 1  | 2   | 3  | 4      | 3    |
| ความทนต่อการฉีกขาด                              | 2          | 2  | 3   | 5  | 3   | 2  | 3      | 3    |
| การกระด้าง                                      | 2          | 2  | 3   | 1  | 3   | 3  | 6      | 3    |
| การยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ                       | 2          | 2  | 3   | 2  | 3   | 3  | 2      | 2    |
| ความทนทานต่อความร้อน                            | 5          | 5  | 4   | 4  | 3   | 3  | 3      | 2    |
| ความทนทานต่อการเกิด<br>ออกซิเดชัน               | 4          | 4  | 3   | 2  | 3   | 2  | 2      | 1    |
| ความทนทานต่อแสง UV                              | 4          | 4  | 3   | 3  | 3   | 2  | 2      | 1    |
| ความทนทานต่อโอโซนและ<br>สภาพอากาศ               | 4          | 4  | 4   | 3  | 3   | 2  | 2      | 1    |
| ความทนต่อน้ำมัน                                 | 6          | 6  | 5   | 6  | 1   | 2  | 6      | 4    |
| ความทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง                       | 6          | 6  | 6   | 6  | 2   | 3  | 6      | 5    |
| ความทนทานต่อกรด                                 | 3          | 3  | 3   | 3  | 4   | 2  | 2      | 1    |
| ความทนทานต่อด่าง                                | 3          | 3  | 3   | 3  | 4   | 2  | 2      | 1    |
| ความทนทานต่อการติดไฟ                            | 6          | 6  | 6   | 6  | 6   | 2  | 6      | 6    |
| ความเป็นฉนวนไฟฟ้า                               | 1          | 1  | 2   | 2  | 5   | 4  | 2      | 2    |
| การซึมผ่านของก๊าซ                               | 5          | 5  | 4   | 4  | 2   | 3  | 1      | 4    |

หมายเหตุ 1 = ดีมากที่สุด, 6 = ด้อยที่สุด

NR = ยางธรรมชาติ

IR = ยางไอโซพรีน

SBR = ยางสไตรีนบิวตาไดอีน

BR = ยางบิวตาไดอีน

NBR = ยางไนไตรล์

CR = ยางคลอโรพรีน

X(IIR) = ยางบิวไทล์

EPDM = ยางเอธิลีนโพรพิลีนไดอีน



## 2.2 สารเคมีประกอบยาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นการนำยางไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เพื่อช่วยปรับปรุงและแก้ไขข้อเสียต่างๆ รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยสารเคมีผสมยางมีดังนี้ (พงษ์ธร, 2547)

### 2.2.1 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า คงรูป แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า ยางสุก สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

#### 2.2.1.1 ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

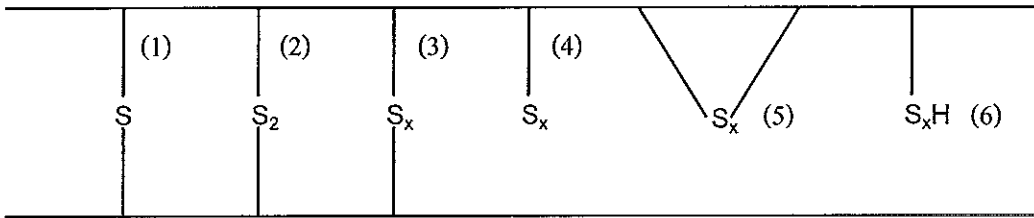
เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูงคงรูป เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาคัดในเชนซ์ด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

1. กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน มี 3 ระบบ คือ

ระบบธรรมดา (conventional vulcanization, CV system) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย ทำให้มีพันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ polysulphide crosslinks

ระบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV system) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ monosulphide และ disulphide crosslinks

ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization, semi-EV system) ซึ่งจะอยู่ที่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ: (1) มอนอซัลไฟดิค (2) ไดซัลไฟดิค (3) พอลิซัลไฟดิค เมื่อ  $x \geq 3$  (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล (thiol) (พงษ์ธร, 2547)

2. สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยางจะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ว่าที่อุณหภูมิสูงๆก็ตาม การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มดังนี้

กลุ่มไดไทโอคาร์บาเมท (Dithiocarbamates) สารตัวเร่งในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูปที่สูงมาก ที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ ซิงค์ไดเอธิลไดไทโอคาร์บาเมท (Zinc diethyl dithiocarbamates, ZDEC) สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาล้วนๆ หรือใช้ร่วมกับ ZMBT (Zinc salt of 2-mercapto benzothiazole) จะทำให้ค่าของมอดุลัสสูง ทำให้มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงมาก

กลุ่มแซนเทท (Xanthates) สารกลุ่มนี้ว่องไวต่อปฏิกิริยามาก เกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจะมีกลิ่นเหม็นมาก

กลุ่มไทอาโซล (Thiazole) นิยมใช้กันมากเนื่องจากสารตัวเร่งในกลุ่มนี้มีราคาไม่แพง และยังทำให้ยางคงรูปได้เร็ว สามารถใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ เช่น ZDEC ทำให้มีค่ามอดุลัสสูง

กลุ่มไทยูแรม (Thiuram) ไม่มีความว่องไวในปฏิกิริยาเพียงพอที่จะใช้กับระบบการทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันได้ แต่อาจใช้เป็นตัวช่วยพวกสารเร่งปฏิกิริยากกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมทได้ เช่น ใช้ TMTD (tetra methyl thiuram disulphide) กับ ZDEC โดยถ้าใช้ในปริมาณน้อยจะช่วยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาล้วนๆ แต่ถ้าใช้ปริมาณมากโดยที่ใช้กำมะถันจะทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์

3. สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ สารอนินทรีย์พวกซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรดสเตียริก

(stearic acid) และสารที่เป็นต่าง (นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิกา รวมอยู่ด้วย) ได้แก่ สาร DEG (diethylene glycol)

### 2.2.1.2 ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ระบบนี้ใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง

### 2.2.2 สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจนทำลายให้เสื่อมสภาพ การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (-p-cresol)) เป็นต้น

### 2.2.3 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรง เรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แบริ่ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.2.4 สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนึ่งในระหว่างการผลิตบดผสม ได้แก่ พวกน้ำมัน (oils) และสารเคมีย่อยยาง (peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้งยางมีความหยุ่นตัว (nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการผลิต เพราะยางจะพันลู่กักขังยาก สารพวกนี้ ได้แก่ factice เป็นต้น

### 2.2.5 สารกลุ่มอื่น ๆ (miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้อย่างที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วง ได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น

สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางฟองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น

สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสีอินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอินทรีย์

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่างๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) และเรียกเป็น phr หรือ pphr (part per hundred of rubber) ตารางที่ 2.3 แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารต่างๆ

ตารางที่ 2.3 หน้าที่ของสารเคมีและปริมาณการใช้สารต่างๆ

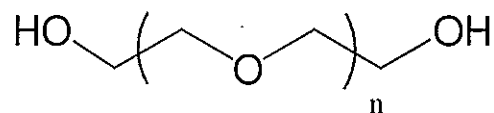
| สมบัติที่ต้องการ                                                 | สารเคมี                                                                                                                                                    | ปริมาณการใช้ (phr)       |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| สมบัติความยืดหยุ่น<br>(elasticity)                               | สารทำให้ยางคงรูป<br>(vulcanizing crosslink agents)                                                                                                         | 1-3.5                    |
|                                                                  | สารกระตุ้น (activator)                                                                                                                                     | 1-5                      |
|                                                                  | สารเร่ง (accelerator)                                                                                                                                      | 0.5-2.5                  |
| ป้องกันยางเสื่อมอัน<br>เนื่องจาก O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> | สารป้องกันยางเสื่อม เช่น 6 PPD,<br>Flectol H, Antioxidant 2246,<br>Wingstay L, Vulkanox MB                                                                 | 1-4                      |
| เสริมความแข็งแรงให้ยาง                                           | สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น<br>เขม่าดำ (Carbon black), เขม่าขาว<br>(Silica), ไทเทเนียมไดออกไซด์                                                     | 10-100                   |
| ลดความหนืด (viscosity)<br>ของยางดิบ                              | บดให้นิ่ม (Mastication) และ/หรือ<br>เติมสารย่อยยาง (Chemical<br>peptizer)                                                                                  | 0.1-1.5                  |
| เชื่อมติดผ้า โลหะ กระเบื้อง                                      | สารพวกเป็นตัวเชื่อม (bonding<br>agent) และต้องทำความสะอาด<br>หรือมีวิธีการพิเศษ treat ผิวของสิ่งที่<br>ต้องการเชื่อม                                       | 2-10                     |
| สี                                                               | สีอินทรีย์ หรือสีอนินทรีย์                                                                                                                                 | ตามความเข้มที่ต้องการ    |
| ลดต้นทุน                                                         | สารตัวเติมชนิดราคาถูก ยางรีเคลม<br>เศษยางคงรูป                                                                                                             | 10-200 , 10-100,<br>5-50 |
| ฟองพรุน (cellular<br>structure)                                  | สารฟู พวกอินทรีย์สาร<br>หรืออนินทรีย์สาร                                                                                                                   | 05.-20<br>5-30           |
| ลดอันตรายจากการติดไฟ<br>(self extinguishing)                     | สารลดการติดไฟ เช่น พวก<br>phosphates, antimony salts,<br>halogenated organics, borates<br>(antimonytrioxide and chlorinated<br>wax – มักใช้กับยางธรรมชาติ) | 1-20                     |
| ฉนวนกันไฟฟ้า                                                     | สารพวกไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น<br>สารตัวเติมพวกแร่ธาตุ                                                                                                       | 5-50                     |

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ในสูตรยางพื้นฐาน

| ส่วนประกอบ                                                     | ปริมาณ (phr)    |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|
| ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (rubber)                     | 100             |
| กำมะถัน (sulphur)                                              | 2.5-3.5         |
| สารกระตุ้น (activator)                                         | 1-5             |
| สารเร่งให้ยางคงรูป (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (accelerator) | 0.5-2.0         |
| สารตัวเติม (filler)                                            | (ตามที่ต้องการ) |
| สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizer, peptizer)                        | 5-10            |
| สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradant)                        | 1-2             |

### 2.2.6 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)

พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) และพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide, PEO) เป็นโพลิโกลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ของเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งทั้ง 2 นี้มีความหมายทางเคมีเหมือนกัน แต่ PEG เป็นโพลิโกลิเมอร์และพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 20,000 g/mol ส่วน PEO เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 20,000 g/mol PEG และ PEO มีสถานะเป็นของเหลวใส และหนืด จนกระทั่งเป็นของแข็งคล้ายแว็กซ์ ขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่หรือน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์ สามารถเตรียมได้โดยการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนออกไซด์และสารทางการค้าที่หาได้ง่าย ซึ่งมีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างจาก 300 g/mol ถึง 10,000,000 g/mol ความแตกต่างระหว่าง PEG และ PEO คือ น้ำหนักโมเลกุลและสมบัติทางเคมี เช่น ความหนืด เนื่องจากความยาวของสายโซ่และสูตรโครงสร้างของ PEG และ PEO ดังรูปที่ 2.5

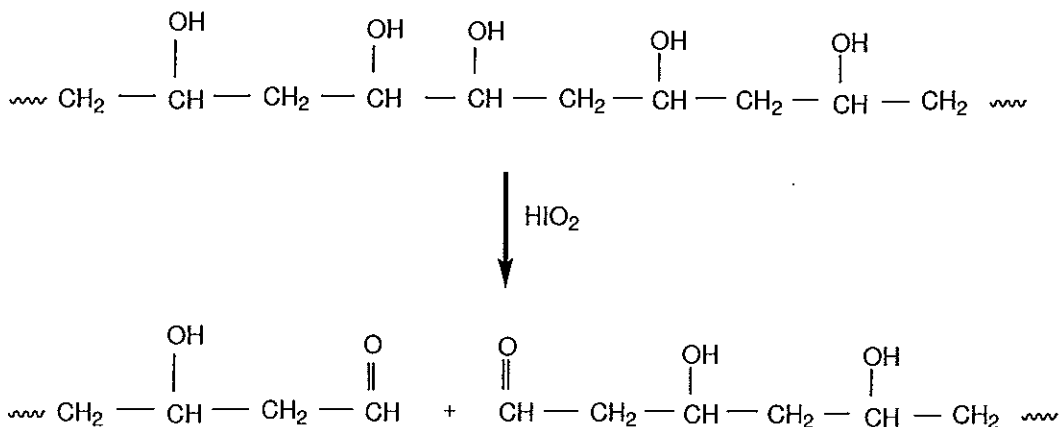


รูปที่ 2.5 โครงสร้างพอลิเอทิลีนไกลคอล

สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนไกลคอล ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ เสถียรต่อความร้อน และสารเคมีหลายชนิด ใช้เป็น พลาสติกไซเซอร์ สารปรับความนุ่ม สารปรับความชุ่มชื้น สารหล่อลื่น วัสดุเคลือบกระดาษ เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง และยาเป็นตัวทำละลาย และเป็นแอดดิทีฟในอาหาร

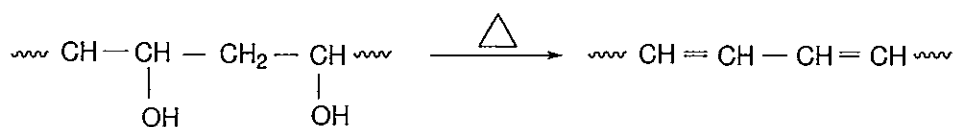
### 2.2.7 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol, PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol, PVA) มีโครงสร้างการเชื่อมต่อนอนอเมอร์แบบหัวต่อหางเกือบทั้งหมด แต่มีการเชื่อมต่อแบบหัวต่อหัว ประมาณร้อยละ 1-2 ทั้งนี้ทราบได้จากการให้พอลิเมอร์นี้ทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ไอโอดีก (HIO<sub>4</sub>) หรือเลดเตตระอะซิเตต (Pb(OAc)<sub>4</sub>) พบว่า มีความหนืดลดลง แสดงว่าได้เกิดการแตกตัวของโมเลกุล ดังนี้



สมบัติทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ขึ้นกับองศาของแอลกอฮอล์ซิส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ -OH 100% มีแรงดึงสูงกว่า และสามารถทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ -OH ไม่ถึง 100% เพราะพอลิเมอร์ที่มีหมู่ -OH 100% มีความเป็นผลึกสูงกว่าและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลมากกว่า นอกจากนี้แล้วสมบัติทางกายภาพยังขึ้นกับความชื้นของสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะน้ำทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์สำหรับพอลิเมอร์นี้ เช่น เมื่ออากาศมีความชื้น 50% แรงดึงของพอลิเมอร์นี้จะลดต่ำลง แต่ความสามารถในการยืดตัวออกจะเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสลายตัวลงก่อนอุณหภูมิหลอมตัว เมื่อให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 150 °C จะเริ่มสูญเสีย H-O-H จากหมู่ -OH ที่อยู่เคียงข้างกันในโมเลกุล ก่อให้เกิดความไม่อิ่มตัวขึ้น ถ้ามีพันธะคู่เกิดขึ้นมาก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะเกิดมีสีขึ้นได้



Poly(vinyl alcohol)

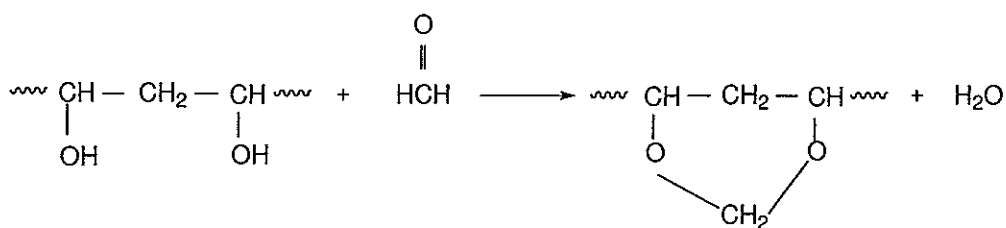
สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ สามารถละลายน้ำได้ โดยละลายอย่างช้าๆในน้ำเย็น แต่จะละลายเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และทั่วไปจะสามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 °C ความสามารถในการละลายในน้ำของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นกับปริมาณของหมู่ -OH ในโมเลกุลเช่นกัน โดยจะสามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อมีหมู่ -OH 88% ในโมเลกุล แต่ถ้ามีร้อยละของหมู่ -OH สูงกว่านี้ ความสามารถในการละลายกลับลดต่ำลงตามลำดับ เพราะเกิดพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามลำดับ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถต้านทานตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดีและความสามารถในการต้านทานจะเพิ่มขึ้นตามองศาของหมู่ -OH ในโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ -OH สูง ไม่ละลายในอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน คลอรีเนตเตดไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนมาก (R-OH ซึ่ง R เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ยาว) เอสเทอร์ อีเทอร์ และคีโตน อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์นี้จะสามารถละลายในตัวทำละลายที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ -OH ของพอลิเมอร์นี้ได้ เช่น เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) และกลีเซอรอล (glycerol) และสารจำพวกอะไมด์ เช่น ฟอร์มาไมด์ (formamide) อะซิตาไมด์ (acetamide) สารจำพวกอะมีนก็สามารถละลายพอลิเมอร์นี้เช่นกัน

หมู่ -OH ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเปลี่ยนไปเป็นหมู่อะซิเตตได้โดยให้ทำปฏิกิริยากับอะซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) ในพีรีดีน (pyridine) และให้ความร้อน แต่พอลิไวนิลอะซิเตตที่ได้อาจมีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างออกไปจากพอลิไวนิลอะซิเตต

การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ ลักษณะแรกอาศัยสมบัติการละลายได้ในน้ำของพอลิเมอร์นี้ เช่น เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชันและแขวนลอยต่างๆขึ้นขึ้น (เรียกว่าใช้เป็น thickening agent) และใช้เป็นกาว (adhesives) ลักษณะที่สองอาศัยความไม่สามารถละลายในน้ำของพอลิเมอร์นี้โดยปฏิกิริยาเคมี นำพอลิเมอร์นี้ไปปั่นแบบเปียก (wet spun) เป็นเส้นเข้าไปยังสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น ที่มีกรดซัลฟิวริก และฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ด้วย ประมาณ 1/3 ของหมู่ -OH ของพอลิเมอร์นี้เปลี่ยนไปเป็นหมู่ฟอร์มาล (formal) กลายเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายในน้ำดังนี้

Poly(vinyl alcohol)





พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ฟอร์มัลอยู่ด้วยนี้สามารถดูดน้ำ และความชื้นเป็น  
 อย่างดี (ประมาณ 30%) โดยน้ำหนัก และดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไปอื่นๆ จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้าย  
 ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้ สวมใส่สบาย ชักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และ  
 สามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี (ชัยวัฒน์, 2528)

### 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมเป็นโลหะอยู่ในหมู่ IVB ตามตารางธาตุ พบตามธรรมชาติในรูปของแร่อิเลมไนต์  
 ( $\text{FeTiO}_3$ ), รูไทล์ (เตตระโกนอลไทเทเนียมไดออกไซด์), อะนาทาส (เตตระโกนอลไทเทเนียมได  
 ออกไซด์), บรูกไกต์ (รอมบิกไทเทเนียมไดออกไซด์), เพอโรฟสไกต์ ( $\text{CaTiO}_3$ ),  
 สฟีน ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) และโกโคไลท์ ( $\text{MgTiO}_3$ ) โลหะไทเทเนียมส่วนใหญ่นำไปใช้เกี่ยวกับด้าน  
 การบิน เพราะว่ามีคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์

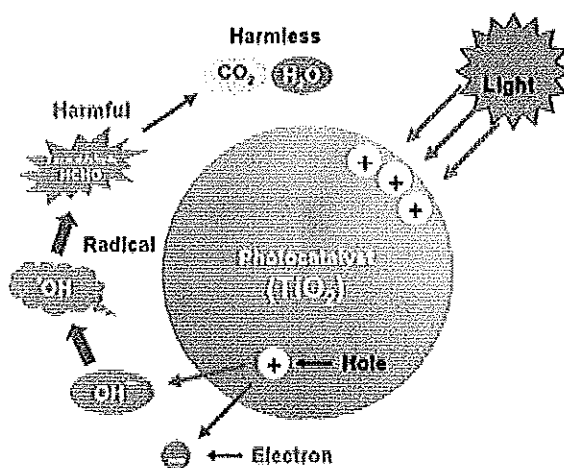
| Property                   | Value                                                 |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Molar, g/mol               | 79.866                                                |
| Melting point, °C          | 1,843                                                 |
| Boiling point, °C          | 2,972                                                 |
| Density, g/cm <sup>3</sup> | 4.23                                                  |
| Refractive index ( $n_D$ ) | 2.488 (anatase)<br>2.583 (brookite)<br>2.609 (rutile) |
| Modulus of elasticity, Gpa |                                                       |
| Compression                | 103                                                   |
| Shear                      | 44                                                    |

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเก่าแก่ชนิดหนึ่ง และเป็นหนึ่งใน 50 ชนิดของสารที่ผลิตมาก  
 ที่สุดในโลก ลักษณะทั่วไปมีสีขาว ทึบแสง เกิดเองตามธรรมชาติ มี 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ รูไทล์  
 (rutile) และอะนาทาส (anatase) ทั้ง 2 รูปแบบ มีไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์อยู่กับ  
 สารปนเปื้อน ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีจึงจะนำสารปนเปื้อนออกได้ เหลือไว้แต่ไทเทเนียม-  
 ไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีที่มีสีขาว มีดัชนีหักเหแสงและความทึบ  
 แสงสูง มีประโยชน์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น

สารเคมีที่เสถียรต่อปฏิกิริยา ไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับ แร่ชนิดนี้พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สีทาบ้านไปจนถึงอาหารและเครื่องสำอาง ในกลุ่มเครื่องสำอางใช้เพื่อหลายวัตถุประสงค์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีที่มีสีขาว เป็นตัวที่ทำให้เกิดการทึบแสง และเป็นตัวป้องกันแสงแดด

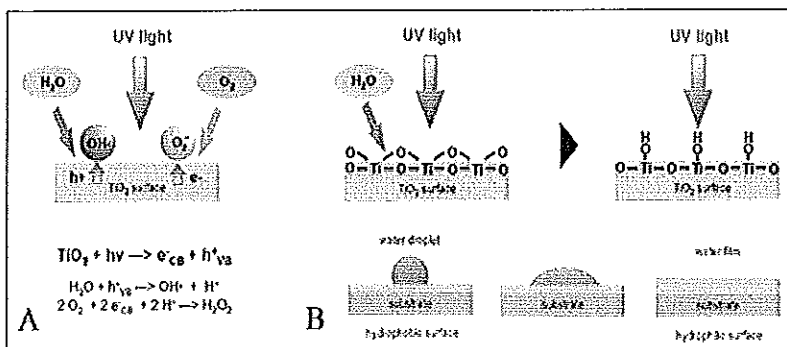
หนึ่งในรูปแบบของแร่ หรือการสกัดแร่รวมถึงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ควรคำนึง คือ อนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคขนาดนาโน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้สามารถทำแร่ให้มีขนาดเล็กอย่างไม่เคยมีมาก่อน มีการศึกษาพบว่า อนุภาคขนาดเล็กของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบอะนาทาส ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ก่อให้เกิดโรคได้ ขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ยิ่งขนาดอนุภาคเล็กความเป็นพิษก็ยิ่งมากขึ้น โดยที่ขนาดอนุภาค 70 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ ขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้ และขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้ (สุพิณ, 2550)

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งนำไปใช้เป็นโฟโตแคตะไลซิสในการละลายสารพิษต่างๆ เช่น สารอะโรมาติก แอลกอฮอล์ คลอโรฟอร์ม ยาฆ่าแมลง รวมทั้งสามารถใช้ฆ่าเชื้อโรคได้ ซึ่งในปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับมลพิษในสิ่งแวดล้อมกำลังจะกลายเป็นปัญหาใหญ่เนื่องจากมีอุตสาหกรรมต่างๆเกิดขึ้นมาก ส่งผลให้ปัญหามลพิษเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การกำจัดมลพิษจึงเป็นเรื่องสำคัญ การนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการกำจัดมลพิษกำลังได้รับความสนใจค่อนข้างมาก เพราะว่าเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ใช้ระยะเวลาสั้น และเกิดการสลายตัวได้สูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เช่น thermal biological pathways (Wang, 1997)



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดโฟโตแคตะไลซิส

จากสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้เป็นโฟโตแคตะไลซิสแล้ว ไทเทเนียมไดออกไซด์ ยังมีสมบัติที่เรียกว่า Bactericidal effects ซึ่งหมายความว่า มันสามารถฆ่าพวกแบคทีเรีย และ ย่อยสลายแบคทีเรียที่ตายแล้ว รวมทั้งสารพิษที่เกิดขึ้นหลังจากการฆ่าแบคทีเรียเหล่านั้น ทำให้ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีกว่าสารต่อต้านแบคทีเรียตัวอื่นๆ อีกทั้งตัวมันเองจะไม่ เสื่อมสลาย แต่ยังคงสามารถทำงานได้ต่อไปเป็นระยะเวลาานานตราบใดที่ยังคงมีแสง สำหรับสาร ที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่างๆ เช่น แก๊สเรือนกระจก และสารประกอบที่มีไนโตรเจนหรือซัลเฟอร์ เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น ถ้าอยู่ในที่มีแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ก็สามารถกำจัดสารเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ปรากฏการณ์ทางโฟโตแคตะไลซิสในการสลายสารที่กล่าวมา ยังมีอีกปรากฏการณ์ที่ สำคัญเรียกว่า สภาพซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก (superhydrophilicity) กลไกนี้โดยได้ทดลองเตรียมฟิล์ม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  ในปริมาณหนึ่ง หลังจากถูกฉายด้วยแสงยูวี ทำให้ที่ ผิวมีสภาพเป็นซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก ซึ่งในกรณีนี้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นจะ เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างจากกรณีโฟโตแคตะไลซิส โดยที่อิเล็กตรอนจะไปรีดิวซ์ไอออนบวกของ  $\text{Ti(IV)}$  ให้อยู่ในสถานะ  $\text{Ti(III)}$  และโฮลจะไปออกซิไดซ์ไอออน  $\text{O}_2^-$  ซึ่งจากกระบวนการนี้ อะตอม ของโมเลกุลออกซิเจนจะถูกปลดปล่อยออกมาทำให้เกิดเป็นช่องว่างของออกซิเจน ดังนั้น โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่ในช่องว่างออกซิเจนเกิดเป็นหมู่  $-\text{OH}$  (OH groups) จุดจับที่ผิวทำ ให้ผิวหน้ามีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และเมื่อผิวหน้านี้ได้รับแสงยูวีนานขึ้นทำให้ค่า มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าลดลงจนกระทั่งเท่ากับศูนย์ ดังนั้น น้ำจึงไม่สามารถคงสภาพอยู่เป็นหยด และจะแผ่เป็นฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอคล้ายแผ่นแก้วใ สครอบคลุมที่ผิวอย่างสมบูรณ์ กลไกเหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ เคลือบอยู่บนผิวนี้สามารถที่จะรักษาสภาพไฮโดรฟิลิกนี้อย่างไม่เปลี่ยนแปลงตราบที่ยังมีแสงอยู่ ในปัจจุบันได้มีการนำสมบัติพิเศษทางพื้นผิว (ซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก) นี้ไปประยุกต์ใช้งาน เรียกว่า พื้นผิวที่ทำความสะอาดด้วยตัวเอง (self-cleaning) เช่น กระจกรถยนต์ กระจกกรอบหลอดไฟใน อุโมงค์ เป็นต้น (พรนภา, 2548)



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดสภาพซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่จัดอยู่ในกลุ่มสารสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็ง สารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ สารที่ทำให้ตัวอ่อนในครรภ์ผิดปกติ หรือสารที่มีพิษด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ใช่สารที่มีพิษ โดยทั่วไปมีความปลอดภัยในการใช้กับอาหาร ยา สี และเครื่องสำอาง

การใช้งานของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ (เล็ก, 2009)

1. การเคลือบอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำความสะอาดตัวเอง การนำมาเคลือบภาชนะ แก้ว จาน หรือภาชนะต่างๆ ที่ทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อรินน้ำใส่แก้วให้ถูกแสง น้ำสะอาดมากขึ้น ซึ่งเวลาที่จะให้ถูกแสง ขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำ และปริมาณแสงที่ได้รับบนพื้นที่ของไทเทเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม ทำให้เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ มีรสชาติดีขึ้น เพราะรสชาติที่เป็นกรด และรสชาติที่ไม่ต้องการ จะถูกกำจัดโดยหลุมประจุบวกของฟิล์ม จะมีการเคลือบหลายชั้น เพื่อป้องกันการหลุดออกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ ยังมีการนำมาทำไม้ดอกไม้ประดับปลอม เพื่อความสวยงามแล้วยังช่วยให้อากาศบริสุทธิ์ขึ้น

2. กำจัดกลิ่นและเชื้อโรค รวมทั้งเชื้อราที่ขอบขึ้นตามผนังอาคารที่ขึ้น

3. ทำให้อากาศบริสุทธิ์ได้แก่ การกำจัดก๊าซพิษต่างๆ ที่เกิดจากเขม่า ควันทรยนต์หรือโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น

4. การประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสีย

5. ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ใส่ในแผ่นกรอง (filter) เพื่อช่วยทำความสะอาดอากาศภายในบ้านให้ปลอดภัยจากสารที่ทำให้เกิดโรค เช่น ฝุ่น และสารระเหย เป็นต้น

#### 2.4 กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน (รัตน, 2541)

เยื่อเลือกผ่าน (membrane) คือ ตัวกลางที่กั้นระหว่าง 2 เฟส ซึ่งมีความหนาน้อยกว่าด้านกว้าง-ยาวมากๆ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็งและอาจเป็นของเหลว ลักษณะที่สำคัญที่สุดของเยื่อเลือกผ่าน คือ มีสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (semi-permeable/permeable membrane) การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมี affinity ของเยื่อเลือกผ่านต่อสาร หรือจากขนาดของรูพรุน หรือการมีประจุของเยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น โดยเมื่อนำเยื่อเลือกผ่านไปใช้งานจำเป็นต้องติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ เรียกว่า โมดูล (Module) ซึ่งมีหลายลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) แบบท่อม้วน (Spiral wound) และแบบท่อ (Tubular)

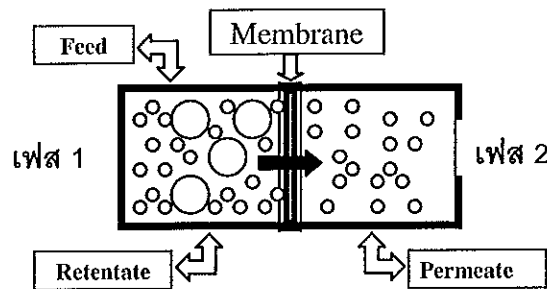
กระบวนการเยื่อเลือกผ่าน เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อเลือกผ่านเพื่อแยกสารเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ สำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม หลักการสำคัญของกระบวนการเยื่อเลือก

ผ่าน คือ ต้องมีแรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านและเกิดการแยกสาร โดยเยื่อเลือกผ่านที่มีสมรรถนะสูง คือ เยื่อเลือกผ่านที่มีสมบัติดังต่อไปนี้ (ชันทอง, 2547)

1. มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง (High flux and selectivity)
2. มีความแข็งแรงเชิงกล (Good mechanical)
3. ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการดำเนินการได้ดี (Chemical and thermal stability under operating condition)
4. มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกไว้ที่ผิวต่ำ (Low fouling tendency)
5. ราคาไม่แพง (Cost effective)

กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (ศิริวัฒน์, 2550) เป็นวิธีการแยกสารวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพการนำกระบวนการเยื่อเลือกผ่านมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แผ่นเยื่อผ่านเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการเยื่อผ่านเนื่องจากใช้เป็นตัวเลือกผ่านสาร (permselectivity) หรือตัวกั้นระหว่าง 2 เฟส กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (ชันทอง, 2547) ซึ่งมีจุดเด่นในด้านการใช้พลังงานที่ต่ำ เนื่องจากไม่มีเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น (ยกเว้นกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ซึ่งใช้วิธีการลดความดันทำให้เกิดการแยกเฟส) จึงไม่ต้องการความร้อนเพื่อการเปลี่ยนเฟส นอกจากนั้นยังสามารถใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านส่วนใหญ่ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน สามารถแยกสารที่ไม่ต้องการออกได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นขึ้น และทำให้สารที่ได้มีความบริสุทธิ์ได้พร้อมกัน

เยื่อเลือกผ่านจะเป็นตัวขวางกั้นระหว่างเฟสการไหล 2 เฟส ที่มีสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้โดยการถ่ายโอนมวลทั้งหมดเกิดขึ้นที่ด้านความหนาของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งมีขนาดมิติ (Dimension) น้อยกว่าความกว้าง-ความยาวของเยื่อเลือกผ่านมากๆ เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านมีหลักการแสดงดังในรูปที่ 2.8 โดยที่สารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) และส่วนของสารที่ไม่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล เช่น ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.8 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (ขันทอง, 2547)

#### 2.4.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (รัตนา, 2541)

กระบวนการแยกสารด้วยเยื่อเลือกผ่านออกจากกันมีหลายวิธี เช่น วิธีการแยกโดยการเปลี่ยนเฟส การแยกโดยใช้ตัวกลาง และการแยกเชิงกล โดยวิธีการแยกต่างๆทำให้เกิดกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน ได้แก่

##### 2.4.1.1 กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process)

กระบวนการไดอะไลซิสเป็นการใช้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเยื่อเลือกผ่านเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารผ่านเยื่อเลือกผ่าน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่าน เยื่อเลือกผ่านจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ ดังนั้น จึงสามารถใช้ในการแยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากตัวถูกละลายขนาดใหญ่ การใช้งาน เช่น การทำให้เลือดบริสุทธิ์ (ไตเทียม)

##### 2.4.1.2 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED)

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีประจุ (ไอออน) จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้เยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของเยื่อเลือกผ่านทำให้เกิดการแยก โดยไอออนบวกจะผ่านเยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่วนไอออนลบจะผ่านเยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออนลบเท่านั้น เป็นผลให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและสารละลายเจือจาง การใช้งาน คือ การทำน้ำดื่มจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล

##### 2.4.1.3 ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis, RO)

ออสโมซิสผันทกลับเป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กโดยใช้ผลต่างความดันที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 ดาลตัน (เช่น เกลือ และน้ำตาล) โดย

การบ่อนสารละลายภายใต้ความดันสูงผ่านเยื่อเลือกผ่านที่มีสมบัติให้น้ำผ่านได้ โดยเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในออสโมซิสผันกลับมีขนาดรู อยู่ที่ 5–20 อังสตรอม ค่าการกักกันสารน้อยกว่า 100 ดาลตัน ใช้ความดัน 1,300–7,000 กิโลพาสคาล การใช้งาน เช่น การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล น้ำกร่อย เพื่อผลิตน้ำจืด

#### 2.4.1.4 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

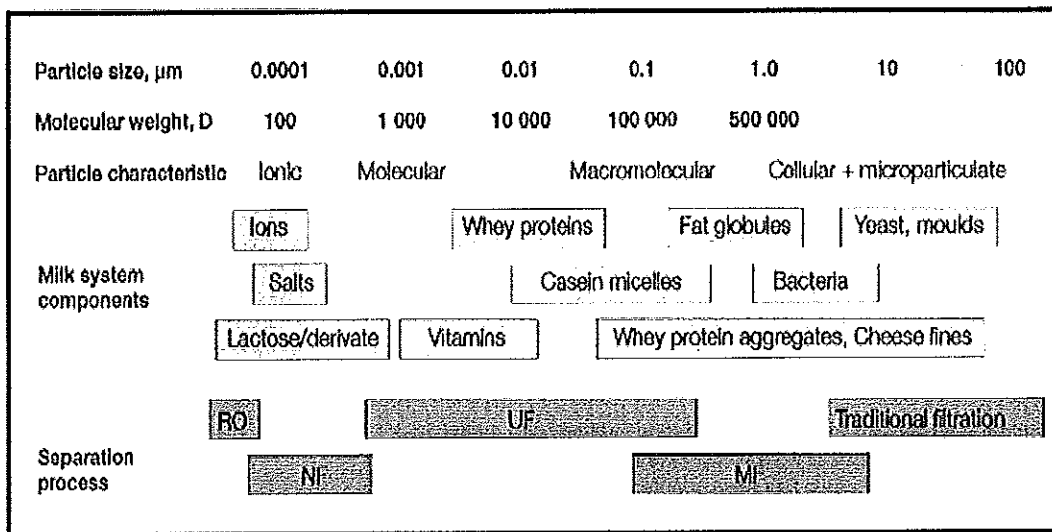
อัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกของแข็งแขวนลอยในระดับไมครอน และสารอนุภาคละเอียด เช่น แบคทีเรีย และคอลลอยด์ออกจากน้ำ และโมเลกุลขนาดเล็ก ปัจจัยเชิงกลของการแยกสารด้วยอัลตราฟิลเตรชัน เยื่อเลือกผ่านอัลตราฟิลเตรชันมีขนาดรู 30–1,000 อังสตรอม การใช้งาน เช่น การบำบัดน้ำเสีย

#### 2.4.1.5 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)

ไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อเลือกผ่านที่มีรูพรุนขนาดค่อนข้างใหญ่ (0.1-10  $\mu\text{m}$ ) สำหรับแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ๆ ขนาดไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอน เยื่อเลือกผ่านแบบนี้ สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลายและน้ำผ่าน กระบวนการตกตะกอนผ่านได้ มีขนาดช่องว่าง (Pore size) ประมาณ 500–2,000 อังสตรอม การใช้งาน เช่น การบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

#### 2.4.1.6 กระบวนการแยกก๊าซ (Gas separation)

กระบวนการแยกก๊าซเป็นกระบวนการที่ใช้แยกก๊าซผสม แบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรก คือ ก๊าซเพอเมชัน (gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น/ไม่มีรูพรุน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (คล้ายกับออสโมซิสผันกลับ) แรงขับเคลื่อนในการแยก คือ ความดัน หรือความดันย่อย ซึ่งอาจต่ำเพียง 10 kPa หรือสูงกว่า 10 MPa แบบที่สอง คือ ก๊าซดิฟฟิวชัน (gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่านเยื่อเลือกผ่านรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งแรงขับเคลื่อนอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ได้ ตัวอย่างของแบบที่สอง คือ การเพิ่มความเข้มข้นไอโซโทป (isotopes) ของยูเรเนียม ส่วนในอุตสาหกรรมใช้งานส่วนใหญ่เป็นก๊าซเพอเมชัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเร็ว ตัวอย่างเช่น การแยกฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซผสม



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโมเลกุล/อนุภาค ที่สามารถแยกได้โดยใช้กระบวนการเยื่อผ่านและการกรอง

กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านแต่ละประเภท แสดงในตารางที่ 2.6 โดยสารป้อนและเพอร์มิเนตของแต่ละกระบวนการมีเฟสต่างกัน ตัวอย่างการประยุกต์การใช้งานกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน ได้แก่ การแยกก๊าซเพื่อผลิตก๊าซใช้ในอุตสาหกรรมหรือแยกก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การกรองอนุภาคของแข็งออกจากสารแขวนลอย

ตารางที่ 2.6 ประเภทกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (ขันทอง, 2547)

| กระบวนการ            | สารป้อน | เพอร์มิเนต | ขนาดรู (อังสตรอม) | กลไกการแยก       |
|----------------------|---------|------------|-------------------|------------------|
| ไมโครฟิลเตรชัน       | ของเหลว | ของเหลว    | 500-20,000        | การคัดขนาด       |
| อัลตราฟิลเตรชัน      | ของเหลว | ของเหลว    | 30-1,000          | การคัดขนาด       |
| นาโนฟิลเตรชัน        | ของเหลว | ของเหลว    | 10-50             | การคัดขนาด       |
| ออสโมซิสผันกลับ      | ของเหลว | ของเหลว    | 5-20              | การคัดขนาด       |
|                      |         |            | <5                | การละลาย-การแพร่ |
| เพอร์แวกเพอเรชัน     | ของเหลว | ไอ         | <5                | การละลาย-การแพร่ |
| แยกก๊าซด้วยเยื่อผ่าน | ก๊าซ    | ก๊าซ       | <5                | การละลาย-การแพร่ |



ตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าเยื่อเลือกผ่านในกระบวนการต่างๆมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน อนุภาคหรือโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะถูกกันออกไปหมด อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่ใหญ่กว่ารูที่มีขนาดเล็กที่สุด อนุภาคนี้สามารถผ่านออกไปบางส่วนตามการกระจายของขนาดรูบนเยื่อเลือกผ่าน (Pore size distribution) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่เล็กที่สุดจะสามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ ดังนั้นหลักการของการแยกสารโดยใช้เยื่อเลือกผ่านมีรูพรุนจึงเป็นการคัดขนาดโมเลกุลที่ขนาดแตกต่างกัน

เยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน และกระบวนการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม ซึ่งไม่สามารถส่องมองเห็นรูบนเยื่อเลือกผ่านได้ด้วยเทคนิคของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) กล่าวคือ จะเห็นเยื่อเลือกผ่านเป็นเนื้อแน่น (Dense membrane) การแยกที่เกิดขึ้นเป็นอีกกลไกหนึ่งที่เรียกว่า “กลไกการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion)”

#### 2.4.2 ประเภทของเยื่อเลือกผ่าน (รัตนา, 2541)

ปัจจุบันได้มีการผลิตเยื่อเลือกผ่านขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเยื่อเลือกผ่านได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

##### 2.4.2.1 เยื่อเลือกผ่านสมมาตร (Symmetry membranes)

เป็นเยื่อเลือกผ่านที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอ สามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภท ได้แก่

1. ไมโครพอร์ัสเยื่อเลือกผ่าน (Microporous membranes) เยื่อเลือกผ่านประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับ การกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรองทรายมากคือ อยู่ที่ 0.01–10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงาน คือ การกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเยื่อเลือกผ่านเยื่อเลือกผ่านชนิดนี้ ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน

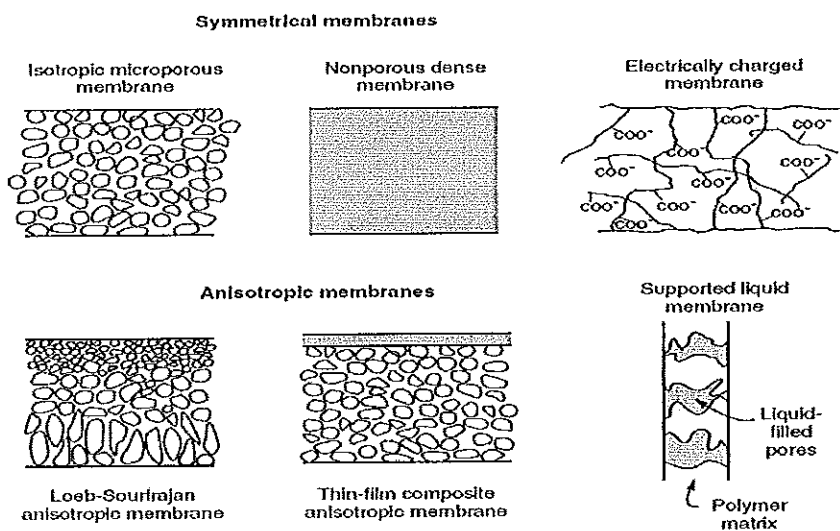
2. เยื่อเลือกผ่านแบบไม่มีรู (Non-porous/dense membranes) เป็นเยื่อเลือกผ่านที่เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน แยกสารด้วยการแพร่ผ่าน กลไกหลักคือ อาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านของสารละลาย 2 ชนิด ที่อยู่แต่ละด้านของเยื่อเลือกผ่าน เยื่อเลือกผ่านประเภทนี้จะมีคุณสมบัติสูง ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ เยื่อเลือกผ่านสำหรับแยกก๊าซ และเพอร์เวปเพอเรชัน

3. เยื่อเลือกผ่านแบบประจุ (Electrically charge membranes) เยื่อเลือกผ่านประเภทนี้อาจจะมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมากโดยที่ผนังของรูพรุนจะมีอิออนที่มีประจุลบหรือบวกติดแน่นอยู่ เยื่อเลือกผ่านที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า เยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนอิออนลบ (Anion Exchange Membranes) เนื่องจากอิออนลบในน้ำ

จะเข้ามาจับ ส่วนเยื่อเลือกผ่านที่มีประจุลบ เรียกว่า เยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Membrane) การแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นกับชนิดประจุของไอออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดไอออนเป็นหลัก เยื่อเลือกผ่านประเภทนี้ ได้แก่ อิเล็กโตรไดอะไลซิส

#### 2.4.2.2 เยื่อเลือกผ่านไม่สมมาตร (Asymmetric membranes)

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ผ่านเยื่อเลือกผ่านนั้นจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของเยื่อเลือกผ่านสำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความหนาแน่นของชั้นเยื่อเลือกผ่านที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบผลิตการประกอบเยื่อเลือกผ่านชั้นต่างๆ เข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้างแบบไม่สมมาตรซึ่งวางแผ่นฟิล์มเยื่อเลือกผ่านขนาดที่บางมากบนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและมีความหนามากกว่า ซึ่งเรียกว่า เยื่อบางประกอบ (thin film composite, TFC) ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุพอลิเมอร์คนละชนิดกัน ประโยชน์ที่ได้จากเยื่อเลือกผ่านประเภทนี้ คือ ได้อัตราการกรองน้ำสูงขึ้น ซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะมีผลผลิตเยื่อเลือกผ่านประเภทนี้



รูปที่ 2.10 การแบ่งประเภทของเยื่อเลือกผ่านตามโครงสร้างของเยื่อเลือกผ่าน (รัตนานา, 2541)

### 2.4.3 วัสดุสำหรับผลิตเยื่อเลือกผ่าน (ศิริโรจน์, 2550)

วัสดุที่ใช้ในการผลิตเยื่อเลือกผ่านมีมากมายหลายชนิด ในหัวข้อนี้จะแบ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตเยื่อเลือกผ่านออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เยื่อเลือกผ่านที่ผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ เยื่อเลือกผ่านที่ผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ และเยื่อเลือกผ่านชีวภาพ

#### 2.4.3.1 เยื่อเลือกผ่านอินทรีย์

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ส่วนใหญ่อาจจะนำมาผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่านได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์แตกต่างกันจึงทำให้มีพอลิเมอร์เพียงบางชนิดเท่านั้นที่นำไปผลิตเยื่อผ่าน การเลือกใช้พอลิเมอร์ในการผลิตเยื่อเลือกผ่านจะต้องพิจารณาทางด้านกระบวนการผลิต ความต้านทานสารเคมี ความร้อน การอุดตันและราคา การผลิตเยื่อเลือกผ่านจะมีการแบ่งชนิดตามโครงสร้างรูพรุน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. เยื่อเลือกผ่านรูพรุน (Porous membrane) ซึ่งใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แต่ปัญหาหลักในกระบวนการนี้ คือ การอุดตันในเยื่อเลือกผ่าน ดังนั้นหลักในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตเยื่อเลือกผ่านต้องคำนึงถึงการป้องกันการอุดตัน

2. เยื่อเลือกผ่านไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น (Dense/non-porous membrane) ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ การแยกก๊าซและเพอแวนพอเรชัน

#### 2.4.3.2 เยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์

วัสดุอนินทรีย์มีคุณสมบัติทนความร้อน และสารเคมีได้ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์ ปัจจุบันเยื่อเลือกผ่านชนิดนี้เป็นที่สนใจเพิ่มขึ้น แต่ที่นำมาผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่านมีอยู่จำกัด เยื่อเลือกผ่านชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เพราะสามารถผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่านที่มีรูพรุนได้เท่านั้น วัสดุอนินทรีย์ที่สามารถนำมาผลิตเยื่อเลือกผ่าน ได้แก่ เยื่อเลือกผ่านโลหะ (Metal membrane) เยื่อเลือกผ่านเซรามิก (Ceramic membrane) เยื่อเลือกผ่านคาร์บอน (Carbon membrane) และซีโอไลท์ (Zeolite membrane)

#### 2.4.3.3 เยื่อเลือกผ่านชีวภาพ

เป็นเยื่อเลือกผ่านที่มีหน้าที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งมีโครงสร้างเยื่อเลือกผ่านที่ประกอบด้วยชั้นไขมัน 2 ชั้น ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านโมเลกุล เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน

#### 2.4.4 การแบ่งชนิดของเยื่อเลือกผ่าน (รัตนานา, 2541)

การแบ่งชนิดของเยื่อเลือกผ่านขึ้นอยู่กับความแตกต่างในลักษณะการใช้งาน การผลิตหรืออาจแบ่งตามโครงสร้างว่าเป็นเยื่อเลือกผ่านไม่มีรูพรุนหรือแผ่นแบบมีรูพรุน บางกรณีอาจแบ่งตามการใช้งานของเหลว/ของเหลว ของเหลว/ก๊าซ หรือก๊าซ/ก๊าซ ในหัวข้อนี้ จะแบ่งชนิดของเยื่อเลือกผ่านแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น

##### 2.4.4.1 เยื่อเลือกผ่านแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น

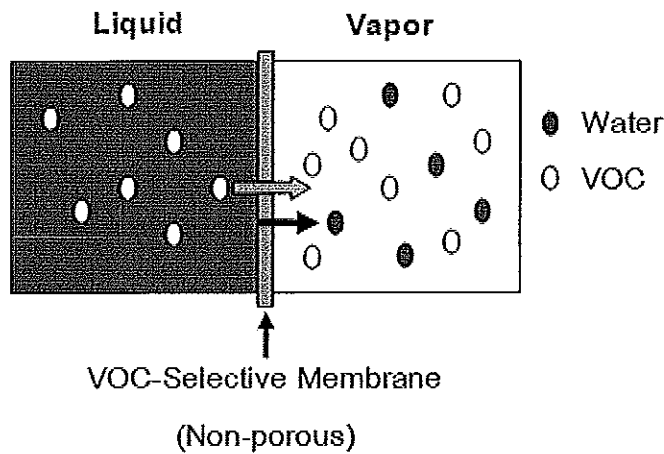
ส่วนมากผลิตจากพอลิเมอร์ แต่ก็มีบางชนิดที่ผลิตจากเยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์ โดยสามารถเตรียมเยื่อเลือกผ่านไม่มีรูพรุนได้หลายวิธี เช่น

1. เยื่อเลือกผ่านผลิตจากสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์และตัวทำละลายและอาจมีตัวไม่ละลาย (non solvent) สารพองตัว (swelling agent) และอื่นๆ โดยนำสารละลายมาทำเป็นแผ่นบางๆ หรือปาดบนแผ่นรองรับแล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยจนหมด จะได้เยื่อเลือกผ่านแบบแน่นที่มีช่องว่างน้อย และมีความเป็นผลึกสูงเมื่อเทียบกับเยื่อเลือกผ่านชนิดอื่นๆ ตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดคุณสมบัติของเยื่อเลือกผ่านแบบนี้ คือ องค์ประกอบของสารละลาย (evaporation/desolvation) และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะระเหย

2. เยื่อเลือกผ่านที่ผลิตจากพอลิเมอร์หลอมเหลว พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเมื่อหลอมเหลวจะสามารถทำให้มีรูปร่างตามต้องการได้ เมื่อทำให้เย็นตัวเป็นเยื่อเลือกผ่านจะมีโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์ชนิดนั้น (แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น) และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆที่เกิดระหว่างการเย็นหรือทำให้หลอมเหลว

3. เยื่อเลือกผ่านเกิดระหว่างพอลิเมอร์ไรเซชัน หมายถึง ในขณะที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (ซึ่งอาจมีการเชื่อมขวาง, chain transfer เกิดขึ้นด้วย) มีการทำให้พอลิเมอร์ตกผลึกอย่างช้าๆ และทำเป็นแผ่นฟิล์ม อัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างของเยื่อเลือกผ่าน ถ้าเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันช้าๆจะได้เยื่อเลือกผ่านแบบแน่น หรือมีความเป็นผลึกสูง ตัวอย่างเช่น เยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตโดยกรรมวิธีนี้มีโครงสร้างเป็นแบบแน่นหรือมีความเป็นเนื้อเดียว

4. เยื่อเลือกผ่านแบบบางมาก (ultrathin membrane) เป็นเยื่อเลือกผ่านแบบแน่นที่มีความหนาระหว่าง  $50-5000 \text{ \AA}$  ข้อดีของเยื่อเลือกผ่านแบบนี้คือ มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient) สูง เพราะบางมาก การพัฒนาเยื่อเลือกผ่านแบบนี้นำไปสู่การผลิตเยื่อเลือกผ่านแบบไม่สมมาตร (asymmetric membrane) ซึ่งใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ การผลิตเยื่อเลือกผ่านแบบบางมากอาจเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์เจือจางโดยการจุ่มแผ่นแก้วลงในสารละลาย สารละลายจะเกาะบนแผ่นแก้ว เมื่อแช่ลงในน้ำเยื่อเลือกผ่านจะหลุดออกหรืออาจทำเป็นแผ่นบางบนแผ่นรองรับ



รูปที่ 2.11 เยื่อเลือกผ่านแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น (Leland, 2008)

#### 2.4.5 โครงสร้างพอลิเมอร์ต่อสมบัติเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น (ชันทอง, 2547)

พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นำมาเป็นเยื่อเลือกผ่านแบบแน่นแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) โครงสร้างแบบเส้นตรงหรือโครงสร้างแบบกึ่ง
2. พอลิเมอร์คล้ายยาง (Rubbery polymer)
3. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ทั้งแบบโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรงหรือโครงสร้างแบบกึ่ง

ลักษณะทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ความโค้งงอได้ของสายโซ่ อันตรกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งองค์ประกอบของโมเลกุลจะมีผลต่อสมบัติเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ เช่น ความเสถียรทางเคมีและทางความร้อน ความแข็งแรงเชิงกล ค่าการซึมผ่าน หรือการคัดเลือกของเยื่อเลือกผ่าน และค่าการนำไฟฟ้าของเยื่อเลือกผ่าน ดังนั้น จึงมีความสำคัญต้องเลือกพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทำเยื่อเลือกผ่านให้เหมาะสมกับการประยุกต์ในการใช้งาน

สมบัติของเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น ขึ้นอยู่กับ

1. ระยะห่างระหว่างสายโซ่ (Interchain distance) ซึ่งมีผลต่อค่าการซึมผ่านของก๊าซ
2. อุณหภูมิทรานซิชัน (Glass transition temperature, Tg) เป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยาง
3. ระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารเกิดขึ้นผ่านส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานเท่านั้น
4. การเชื่อมขวาง (Crosslinking)
5. การบวม (Swelling)

#### 2.4.6 การวัดคุณลักษณะของเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น (รัตน, 2541)

เยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในออสโมซิสผันกลับ เพอร์แวกปอเรชัน การแยกก๊าซ กระบวนการเหล่านี้การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบแน่นสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ ดังนั้นวิธีหาขนาดของรูพรุนของเยื่อเลือกผ่านแบบแน่นจึงต้องแตกต่างกับเยื่อเลือกผ่านรูพรุน เพราะคุณสมบัติของตัวถูกละลาย เป็นตัวควบคุมความสามารถในการแยกจากตารางที่ 9.4 วิธีวัดคุณสมบัติของเยื่อเลือกผ่าน เช่น อุณหภูมิทรานซิชัน ความเป็นผลึกและความหนาแน่น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ไม่ได้บอกถึงขนาดของรูพรุน แต่บอกถึงความสามารถในการซึมผ่าน เทคนิคที่ใช้ เช่น DSC (Differential Scanning Calorimeter) และ DTA (Differential Thermal Analysis) วิธีที่วัดสภาพการซึมผ่านในรูปฟลักซ์หรือการกักกัน จึงเป็นที่นิยมและสะดวกที่สุด

1. เยื่อเลือกผ่านออสโมซิสผันกลับ นิยมบอกเป็นค่าการกักกัน
2. เยื่อเลือกผ่านสำหรับแยกก๊าซ บอกเป็นค่าของสภาพการซึมผ่านของก๊าซนั้น เมื่อนำสภาพการซึมผ่านมาเปรียบเทียบทำให้สามารถแยกก๊าซ 2 ชนิดขึ้นไปออกจากกันมาจนวน้อยจากค่าการแยก (Separation factor)
3. เยื่อเลือกผ่านเพอร์แวกปอเรชัน เป็นกระบวนการที่ชัดเจนที่ต้องการเยื่อเลือกผ่านแบบ hydrophilic หรือ hydrophobic จึงสามารถทดสอบกับสารละลายนั้นๆ ได้โดยตรง

ตารางที่ 2.7 วิธีหลักๆ ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างและขนาดของรูพรุน

| เยื่อเลือกผ่านรูพรุน                                                                            |                                                                               | เยื่อเลือกผ่านแบบแน่น                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| ไมโครฟิลเตรชัน                                                                                  | อัลตราฟิลเตรชัน                                                               |                                               |
| กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน<br>วิธี Bubble point<br>วิธี Mercury intrusion<br>การวัดสภาพการซึมผ่าน | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน<br>วิธี Gas adsorption-desorption<br>การวัดการกักกัน | การวัดสภาพการซึมผ่าน<br>การวัดคุณภาพทางกายภาพ |

#### 2.4.7 กระบวนการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน

การใช้เยื่อเลือกผ่านพอลิเมอร์ในการแยกก๊าซมีมานานกว่า 100 ปี แต่เริ่มใช้ในอุตสาหกรรมประมาณ 10-15 ปี ดังนั้น การแยกก๊าซจึงเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างใหม่ แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการแยกก๊าซปกติ เช่น กระบวนการ cryogenic การดูดซับและการดูดกลืน เป็นต้น

การแยกก๊าซมีความแตกต่างจากกระบวนการเยื่อเลือกผ่านอื่นๆ คือ ใช้แยกของผสมสถานะก๊าซไม่ใช่สารละลายของเหลว ทั้งสารป้อนและเพอมีเอทอยู่ในสถานะก๊าซ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เยื่อเลือกผ่านแบบรูพรุนและเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น แบ่งตามชนิดเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ตามกลไกการแยก

#### 2.4.7.1 กลไกการแพร่ของเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น

เยื่อเลือกผ่านแบบแน่นที่ใช้ในการแยกก๊าซเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น เช่น เยื่อเลือกผ่านเชิงประกอบและแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทเป็นผลต่างของความดันย่อยซึ่งอาจต่ำเพียง 10 kPa หรืออาจสูงถึง 10 MPa กลไกการแยกเป็นการละลาย-การแพร่ ซึ่งมี 3 ขั้นตอน (รัตนา, 2541)

1. การละลายของโมเลกุลบนผิวเยื่อเลือกผ่าน (ซึ่งอาจรวมถึงการดูดซับหรือ interaction ระหว่างโมเลกุลกับเยื่อเลือกผ่านแบบใดแบบหนึ่ง) ส่งผลให้เกิดความเข้มข้นทางด้านป้อนมีค่าสูง

2. เมื่อเกิดความเข้มข้นทางด้านป้อนมีค่าสูงจึงเกิดการแพร่เยื่อเลือกผ่าน

3. การปลดปล่อย (desorption) โมเลกุลออกจากผิวเยื่อเลือกผ่านทางด้านเพอมีเอท ทำให้อัตราการแยกและฟลักซ์ขึ้นอยู่กับโมเลกุลของก๊าซต่างชนิดมีการละลายในเยื่อเลือกผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านต่างกัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ของสาร

1. ความเข้มข้นของสารที่แพร่ สารที่มีความเข้มข้นสูงจะแพร่ไปสู่ที่มีความเข้มข้นต่ำ

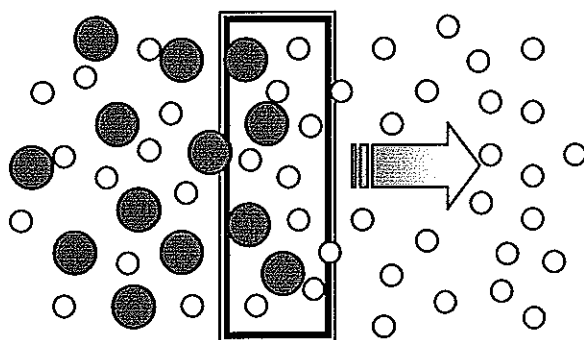
2. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้การแพร่เป็นไปอย่างรวดเร็ว

3. ความดัน การเพิ่มความดัน จะทำให้โมเลกุลหรือไอออนเคลื่อนที่

4. ขนาดและน้ำหนักของอนุภาคที่แพร่ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและเบา จะมีอัตราการแพร่เร็วกว่าสารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และหนัก

5. ความหนาแน่นของตัวกลาง สารที่มีสมบัติเหมือนกัน แต่แพร่ผ่านตัวกลางต่างชนิด อัตราการแพร่จะไม่เท่ากัน เช่น การแพร่ในอากาศจะมีอัตราการแพร่สูงกว่าน้ำ เพราะน้ำมีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศ

6. ความสามารถในการละลายของสารที่แพร่ สารที่ละลายได้ดี จะมีอัตราการแพร่สูงกว่าสารที่ละลายได้น้อย



รูปที่ 2.12 ลักษณะการแพร่ของก๊าซผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบเนน

#### 2.4.7.2 การละลายและการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อเลือกผ่านสำหรับแยกก๊าซ โดยส่วนมากจะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งโมเลกุลไม่อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน ขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  (Glass transition temperature) โมเลกุลของพอลิเมอร์อสัณฐานเคลื่อนที่ได้จำกัด (หรืออยู่ในสถานะแก้ว) การซึมผ่านต่ำ แต่มีการเลือกผ่านเนื่องจากขนาด และรูปร่างของโมเลกุลก๊าซแตกต่างกันไม่มากได้ดี ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  โมเลกุลมีความยืดหยุ่นสูง การซึมผ่านสูง แต่การเลือกผ่านจะด้อยกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะแก้ว

ในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจึงควรพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การแพร่และสารละลายประกอบกัน การละลายของโมเลกุลก๊าซในพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าโมเลกุลของเหลวมาก โมเลกุลของก๊าซที่รวมตัวได้ดี (เกิด condensation หรือ clustering) จะละลายในเยื่อเลือกผ่านได้ดีขึ้น ถ้าก๊าซมี affinity กับพอลิเมอร์สูง ทำให้สารละลายเพิ่มขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์มี affinity ละลายในพอลิเมอร์ hydrophilic ได้ดีกว่า hydrophobic

สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลก๊าซในพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและชนิดของพอลิเมอร์ โมเลกุลเล็กมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ตารางที่ 2.8 แสดงขนาดโมเลกุลของก๊าซหลายชนิด ตัวอย่างเช่น ออกซิเจนมีขนาดเล็กกว่าไนโตรเจน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ดังนั้น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของออกซิเจนควรสูงกว่าไนโตรเจน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นหลัก



ตารางที่ 2.8 ขนาดโมเลกุลของก๊าซหลายชนิด (Å)

| ก๊าซ    | He  | H <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO   | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> |
|---------|-----|----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|----------------|------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ขนาด(Å) | 2.6 | 2.89           | 3.3             | 3.3                           | 3.46           | 3.64           | 3.76 | 3.8             | 3.9                           | 4.3                           |

สัมประสิทธิ์การแพร่ในเยื่อเลือกผ่านขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และมีความแตกต่างกันสำหรับ พอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพยืดหยุ่นหรือแก้ว สำหรับพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่น ถ้าก๊าซละลาย (หรือมี affinity) ในเยื่อเลือกผ่านได้น้อย (เช่น N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าค่อนข้างคงที่ ก๊าซที่ละลายในเยื่อเลือกผ่านได้ดี สัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเป็นเส้นตรงและถ้าก๊าซนั้นเกิด plasticization กับ พอลิเมอร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ก็ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลและในกรณีหนึ่ง คือ โมเลกุลมีการเกาะกลุ่ม (clustering) ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่จะลดลงกับความเข้มข้น สำหรับพอลิเมอร์ในสถานะแก้ว ไม่ว่าก๊าซนั้นจะละลายในเยื่อเลือกผ่านได้มากหรือได้น้อย สัมประสิทธิ์การแพร่ก็จะเพิ่มความเข้มข้น

ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายมีลักษณะคล้ายคลึงกันเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยใช้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านและการละลาย (สมการ 2.1) จากการทดลองในเยื่อแผ่นยืดหยุ่น เช่น ยางธรรมชาติ สำหรับก๊าซหลายชนิด เช่น H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> พบว่าแปรผันตรงกับส่วนกลับของอุณหภูมิ คือ

$$D = D^0 \exp(-E_d/RT) \quad (2.1)$$

$D^0$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นต่ำ

$E_d$  = ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25-30°C สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นถึง 200-300% ขณะที่สัมประสิทธิ์การละลายอาจมีค่าค่อนข้างคงที่ หรือลดลง น้อยกว่า 30%

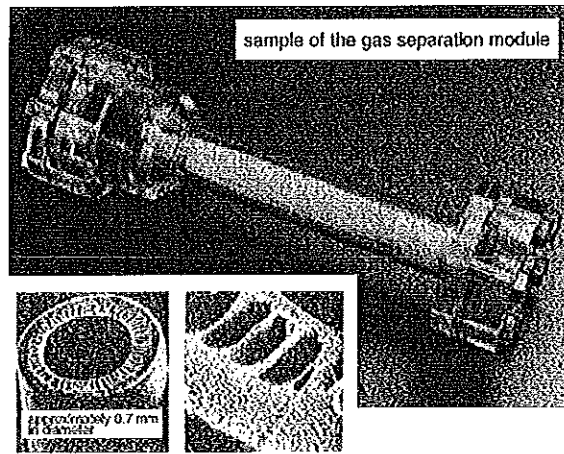
### 2.4.7.3 วัสดุเยื่อเลือกผ่านและโมดูล

ระบบการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่านเชิงอุตสาหกรรมทั้งหมดใช้เยื่อเลือกผ่านพอลิเมอร์ กระบวนการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน ส่วนใหญ่ต้องการชั้นเยื่อเลือกผ่านที่มีความสามารถในการคัดเลือกที่มีความบางมากๆ เพื่อให้ได้ฟลักซ์สูง ดังนั้น โดยทั่วไปจึงให้ความหนาของเยื่อเลือกผ่านน้อยกว่า 0.5 ไมครอน หรือให้น้อยกว่า 0.1 ไมครอน

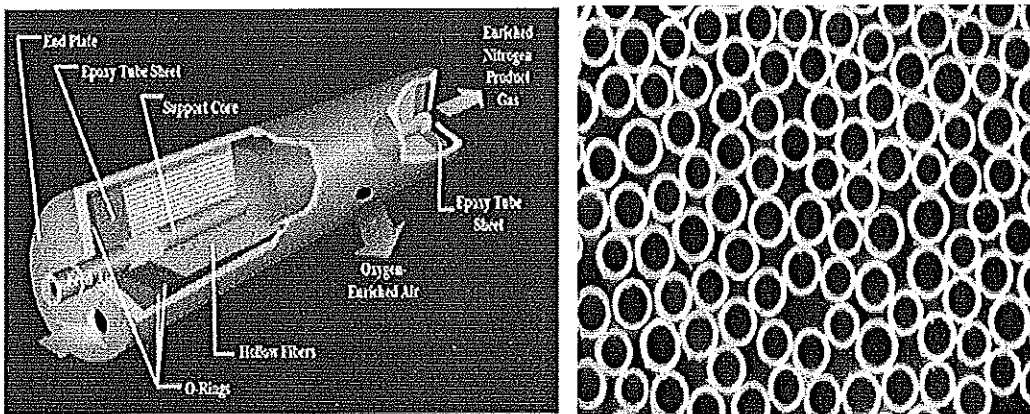
สำหรับโมดูลของเยื่อเลือกผ่านแยกก๊าซ มักอยู่ในรูปแบบที่เป็นโมดูลท่อม้วน (Spiral wound module) และโมดูลเส้นใยกลวง (Hollow-fiber module) ผงอนุภาค ละอองน้ำมัน และสารอื่นที่มีโอกาส ทำให้เกิด Fouling ที่ปะปนอยู่ในกระแสก๊าซป้อน สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมดโดยไม่แพงด้วยตัวกรองที่เรียกว่า Coalescing filter ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปัญหาของ Membrane fouling ได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้เยื่อเลือกผ่านแยกของเหลว การเลือกลักษณะโมดูลจึงขึ้นกับราคา และสมรรถนะของเยื่อเลือกผ่านที่ยอมรับได้จากการไหลาไรเซชันความเข้มข้นในการใช้งานบางกรณี ตารางที่ 2.9 เป็นการแสดงชนิดของวัสดุเยื่อเลือกผ่าน สมรรถนะการเลือก และลักษณะโมดูลของเยื่อเลือกผ่านแยกก๊าซ

ตารางที่ 2.9 วัสดุเยื่อเลือกผ่านและโมดูลของการแยกก๊าซด้วยเยื่อเลือกผ่าน

| การใช้แยกก๊าซ                    | วัสดุเยื่อเลือกผ่าน | สมรรถนะการเลือก | ลักษณะโมดูล  |
|----------------------------------|---------------------|-----------------|--------------|
| O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>   | Polyamide           | 6-7             | Hollow-fiber |
| H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>   | Polysulfone         | 100             | Hollow-fiber |
| CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> | Cellulose acetate   | 15-20           | Spiral wound |
| VOC/N <sub>2</sub>               | Silicone rubber     | 10-30           | Spiral wound |
| H <sub>2</sub> O/air             | Hydrophilic rubber  | >200            | Capillary    |



รูปที่ 2.13 รูปร่างกายนอกโมดูลของกระบวนการ gas separation membrane และรูปตัดขวางของเยื่อเลือกผ่าน (Hayashi, 1995)



รูปที่ 2.14 ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยกลวง (IGS Innovative gas systems, 2000)

## 2.5 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษา

### 2.5.1 X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)

เป็นเทคนิคทางด้านสเปกโทรสโกปีที่มีความสำคัญยิ่งต่องานวิเคราะห์โครงสร้างในระดับอะตอม ซึ่งอาศัยการศึกษาข้อมูลในสเปกตรัมที่เรียกว่า X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy (XAFS) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างสองส่วน คือ X-ray Absorption Near Edge Structure Spectroscopy (XANES) และ Extended X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy (EXAFS) การศึกษาสเปกตรัม XANES และ EXAFS จากการดูดกลืน

รังสีเอกซ์ของตัวอย่างจะทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมโดยรอบของอะตอมที่ดูดกลืนรังสี สถานะเคมีของอะตอม (chemical state) สถานะออกซิเดชัน (oxidation state) และจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณใกล้เคียง (coordination number) (วันทนา, 2550)

เทคนิคการทดลอง X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) คือ การทดลองและการดูดกลืนแสงรังสีเอกซ์ของอะตอมในสารตัวอย่างที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานโฟตอนหรือพลังงานรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ที่ใช้สำหรับการทดลองต้องมีความยาวคลื่นเดียวที่สามารถปรับค่าได้ และมีพลังงานโฟตอนอยู่ในช่วงพลังงานการดูดกลืนของอะตอมหรือใกล้เคียงกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอะตอมเกิดจากการสลายตัวของโฟตอนโดยที่พลังงานโฟตอนหนึ่งตัวจะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานอิเล็กตรอนหนึ่งตัวในอะตอม เนื่องจากพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้น K, L หรือ M ซึ่งเป็นพลังงานระดับลึกในชั้นอะตอม ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนในชั้น K, L หรือ M จึงสามารถกระโดดไปยังสถานะพลังงานที่สูงกว่าคือ พลังงานชั้นวาเลนซ์ เมื่ออิเล็กตรอนย้ายไปอยู่ในชั้นวาเลนซ์จึงเกิดสถานะว่างในชั้นพลังงานระดับลึก ข้อมูลสำคัญที่ได้จาก EXAFS ได้แก่ ชนิดของอะตอมที่อยู่เคียงข้างอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์ จำนวนเฉลี่ยของอะตอมข้างเคียงอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์ (coordination number, N) และความยาวพันธะเฉลี่ยของอะตอมที่ดูดกลืน (coordination number) กับอะตอมเคียงข้าง (interatomic distance)

โครงสร้างของ XANES เป็นสัญญาณการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานระดับลึกไปยังสถานะพลังงานที่ว่างอยู่ในอะตอม ซึ่งสถานะพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอาจประกอบด้วยพลังงานสถานะเดี่ยว เช่น พลังงานในชั้นวาเลนซ์ สถานะพลังงาน Rydberg และสถานะพลังงานที่ต่อเนื่อง โครงสร้างของ XANES มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างพลังงานของอะตอมและความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ว่างในระบบที่พิจารณา เช่น อะตอมของโลหะ อะตอมในโมเลกุล เป็นต้น รูปร่างของโครงสร้าง XANES จึงมีความเฉพาะเจาะจงกับสภาพแวดล้อมทางเคมีของอะตอม สามารถใช้วิเคราะห์ชนิดของเคมีของอะตอม (fingerprinting) และแยกแยะองค์ประกอบของสารเคมีในสารตัวอย่างได้ (Principle Component Analysis) สเปกตรัมการดูดกลืนรังสี นอกจากนี้โครงสร้าง XANES ยังมีส่วนประกอบของสัญญาณการกระเจิงของโฟโตอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ เนื่องจากโฟโตอิเล็กตรอนนี้สามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นทำให้เกิดการกระเจิงของอะตอมที่อยู่รอบข้างได้ การกระเจิงที่เกิดขึ้นในบริเวณของโครงสร้าง XANES จะเป็นการกระเจิง (multiple scattering) และมีความรุนแรงเพราะเป็นโฟโตอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างอะตอมหรือความยาวพันธะ การกระเจิงแบบซ้อนยังขึ้นกับมุมระหว่างอะตอมตัวกระเจิงด้วยกัน ทำให้โครงสร้าง XANES มีประโยชน์ในการศึกษาความสมมาตรของโมเลกุล โครงสร้าง EXAFS อยู่ถัดจาก XANES มีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่ขนาดลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น โครงสร้าง

EXAFS เกิดจากการแทรกสอดของโฟโตอิเล็กตรอนที่ประพุดิตัวแบบคลื่น โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอะตอมในระหว่างการดูดกลืนรังสีเอกซ์จะถูกกระเจิงโดยอะตอมรอบข้าง ทำให้สะท้อนกลับมาแทรกสอดกับตัวเองได้ ขนาดของการกระเจิง (scattering amplitude) มีค่าการเปลี่ยนแปลงตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้างสลับกันดังปรากฏให้เห็นเป็นคลื่นในสเปกตรัม EXAFS โครงสร้าง EXAFS

$$X(E) = \frac{\mu(E) - \mu_0(E)}{\mu_0(E)} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\mu(E)$  คือ สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง

$\mu_0(E)$  คือ การดูดกลืนรังสีพื้นฐานของอะตอมอิสระ (Atomic background absorption)

## 2.6 การตรวจสอบเอกสาร

### 2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์

Suppalak และคณะ (2006) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) อนุภาคขนาดนาโนเตรียมโดยกระบวนการ Sol-gel ซึ่งใช้ titanium tetraethoxide,  $\text{Ti}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4$  ในเอทานอลผสมกับ inorganic salts (KCl และ  $\text{KNO}_3$ ) หรือสารลดแรงตึงผิวประเภท non-ionic (Lutensol@ type) ช่วยให้มีอนุภาคขนาดนาโนขนาดเล็กมาก เกลลี่และสารลดแรงตึงผิวสนับสนุนให้สารแขวนลอยมีความเสถียรมากขึ้น (electrostatic และ hydrophobic มีแรงผลักระหว่างอนุภาค) และขัดขวางการรวมตัว Sol-gel อนุภาคขนาดนาโน ผลของการศึกษาปริมาณน้ำในกระบวนการ Sol-gel หากปริมาณน้ำมากการการเป็นของแข็งจะเป็นได้เร็วและผลลัพธ์จะได้อนุภาคขนาดนาโนขนาดเล็กมาก  $\text{TiO}_2$  อนุภาคขนาดนาโนมีขนาดเล็กกว่า 100 nm เมื่อใช้น้ำ 10 v/v ในเอทานอล และผสม  $\text{KNO}_3$  0.8 mM อนุภาคขนาดนาโนหลังจากเกิดปฏิกิริยา Sol-gel ในภายใต้บรรยากาศ การกระทำที่อุณหภูมิระหว่าง 200-550°C การเกิดผลึกในเฟส anatase เกิดที่ละน้อยเปลี่ยนเป็นเฟส rutile ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

Huang และคณะ (2006) คอมโพสิต Epoxy/ $\text{TiO}_2$  เตรียมโดยวิธีผสมสารละลายซึ่งใช้ Epoxy resin และของเหลว nano- $\text{TiO}_2$  ผสมร่วมกับ methyl isobutylketone ผลของการทดลอง พบว่าพันธะไฮโดรเจน สามารถเกิดรูปร่างโดยการผสมของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ Epoxy resin แล้ววิเคราะห์ด้วย SEM ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ปรากฏว่ามีการกระจายตัวในวัสดุได้ดี เทียบกับการต้านทานความร้อนและสมบัติเชิงกลของ Epoxy resin ทำได้ดีที่ผสม  $\text{TiO}_2$  แต่จะ

เสื่อมสภาพถ้า  $\text{TiO}_2$  มีมากเกินไป 3% นอกจากนี้คุณสมบัติสามารถทำให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มความเข้มข้นของ methyl isobutylketone

Wang และคณะ (2006)  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนใส่เข้าไปใน high-impact polystyrene (HIPS) ร่วมเข้าด้วยกัน ซึ่ง  $\text{TiO}_2$  จะกระจายตัวในคอมโพสิตของ HIPS และ ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) โดยการผสม ทำการวิเคราะห์กับ transmission electron microscopy (TEM), atomic force microscopy (AFM) และ UV-Vis spectrophotometry ผลลัพธ์ EVA ช่วยในการกระจายตัวของการจับตัวเป็นก้อนของ  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโน การกระจายตัวของ HIPS/ $\text{TiO}_2$  รวมตัวใน HIPS เมตริกซ์ดีขึ้นอย่างมาก โดยการเพิ่ม EVA

Tanachai และคณะ (2009) สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ (colloidal  $\text{TiO}_2$ ) เตรียมโดยการผสมผง  $\text{TiO}_2$  ปริมาณ 10 กรัม แล้วบดผสมกับน้ำปราศจากไอออน 4 มิลลิลิตร แล้วผสม acetylacetone 0.4 มิลลิลิตร ทดสอบด้วยเครื่อง XRD และ AFM ผลการทดลอง พบว่า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  มีความขรุขระประมาณ 10-12 นาโนเมตร รูปทรงกลมของกลุ่มอนุภาคที่เตรียมได้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการดูดซับสาร

พวงรัตน์ และคณะ (2005) ในงานวิจัยนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการกระบวนการไฮโดรไลซิส และการควบแน่นของสารละลายไททาเนียมด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยใช้ไททาเนียมอัลคอกไซด์ (titanium alkoxide) เป็นสารตั้งต้น ใช้เอทานอล (ethanol) เป็นตัวทำละลายและใช้ไดเอทานอลามีน (diethanolamine) ร่วมในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นแก้วและจะได้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า ไดเอทานอลามีน มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ ไดเอทานอลามีนจะช่วยทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีความแข็งแรง และสามารถยึดเกาะบนแผ่นตัวกลางที่เคลือบอยู่ได้ดีมากขึ้น โดยฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะเป็นผิวเรียบ

นวัล บินเหยีนีย และพิกุล วณิชากิชาติ (2003) ทำการเตรียมเซรามิกซ์ เมมเบรนชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นเยื่อฐาน เตรียมโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 3% (w/v) ทำการ ball-mill เป็นเวลา 1 ชม. แล้วทำการอัดแห้งให้เป็นแผ่นด้วยแรง 4,000 N. แล้วเผาอบที่อุณหภูมิ 1200°C, 1250°C และ 1280°C จะได้ เมมเบรนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 ซม. ทน 3 มม. มีความพรุน 31±0.4%, 29±0.2% และ 27±1.0% มีขนาดรูเฉลี่ย 2.59, 2.19 และ 1.90  $\mu\text{m}$

## 2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อเลือกผ่านผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

Tatiane และคณะ (2009) ศึกษาพฤติกรรมทางเคมีของ styrene-butadiene rubber (SBR), SBR/TiO<sub>2</sub> และการเสื่อมสภาพด้วยแสงของสารประกอบนาโน SBR/TiO<sub>2</sub> โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) ชนิดโครงสร้าง anatase เตรียมเป็นสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนผสมกับ SBR ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง แล้วทดสอบกับ nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) ในสถานะของแข็งกับ magic angle spinning (MAS) ในการเตรียมสารประกอบนาโนของ SBR และการสังเคราะห์ โครงสร้าง anatase ระดับอนุภาคนาโน จะเห็นว่าสเปกตรัมของ SBR/TiO<sub>2</sub> และ SBR มีค่าเหมือนกัน จากการสังเกตรูปร่าง และความสัมพันธ์ความเข้มข้นของพีคแต่เป็นการเคลื่อนที่ที่ 5 ppm ถึงสูงสุดของ chemical shift ป่งบอกการเกิดขึ้นของความเครียดภายในระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และ TiO<sub>2</sub> อนุภาคนาโน หลังจากทำการเสื่อมสภาพด้วยแสง ลักษณะของ butadiene ซึ่งให้เห็นสายโซ่ butadienic มีการเสื่อมสภาพ ในการทดสอบด้วย variable contact-time (VCT) สัญญาณการกระจายของ SBR และ SBR/TiO<sub>2</sub> สารประกอบนาโนจะกว้างและความเข้มในการเสื่อมสภาพด้วยแสงของ SBR/TiO<sub>2</sub> สารประกอบนาโนเกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยง

Hamamoto และคณะ (2004) การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของ polycarbonate compound กับ titanium dioxide โดยใช้ titanium dioxide ทำกับ methyl polysiloxane เคลือบบนชั้น alumina silica compound กลายเป็นพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่อง twin screw extruder ความแข็งแรงในการอัดของวัสดุคอมโพสิตสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่มี titanium dioxide การกระจายตัวของสารตัวเติมสังเกตได้โดยสังเกตรอยแตกของผิวหน้า และความขุ่นของสารละลายของวัสดุคอมโพสิต

Guan และคณะ (2006) ใช้วิธี Sol-gel และอสังฐานไททาเนียมเติมเข้าไปในช่องว่างของ epoxy เตรียมเป็นแผ่นฟิล์มตามลำดับขั้นนี้การหักเหของสารประกอบนาโน TiO<sub>2</sub>/epoxy resin แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR, AFM, DSC และ TGA เป็นต้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวของ TiO<sub>2</sub> มีการกระจายไม่แตกต่างกันในพอลิเมอร์เมตริกซ์และมีขนาดเล็กกว่า 100 nm ในแต่ละชั้น ที่สำคัญดัชนีการหักเหของวัสดุสามารถมีความต่อเนื่องปรับเปลี่ยนจาก 1.61 ถึง 1.797 กับปริมาณ TiO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 65% โดยมวล

Selvin และคณะ (2008) สารประกอบ polystyrene/TiO<sub>2</sub> ซึ่งมี TiO<sub>2</sub> เป็นสารตัวเติม เตรียมโดยการหลอมใน Brabender Plasticorder ใช้ความเร็วของการหมุน 60 rpm ที่อุณหภูมิ 180°C เติมสารตัวเติมที่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก แล้วทดสอบสมบัติ

เชิงกลของสารประกอบ วัดโดยเทคนิคต่างๆและคุณสมบัติของสารตัวเติมที่ปริมาณต่างๆ แล้วศึกษาผิวหน้าของสารประกอบโดยใช้ Atomic force microscopy จากการศึกษาสารประกอบ ความแข็งแรงในการยึดติดขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมน้อยและลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมมากแต่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น

Chen และคณะ (2006) เตรียมสารประกอบพอลิยูรีเทน (polyurethane, PU) ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด anatase และ rutile สำหรับศึกษาการออกซิเดชันของฟิล์มด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เตรียม PU/TiO<sub>2</sub> คอมโพสิต โดยผสม TiO<sub>2</sub> กับน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก แล้วเติมลงในน้ำยาง PU พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำน้ำยางคอมปาวด์บดด้วย ball mill เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปเคลือบบนแผ่นโลหะ

Hashimoto และคณะ (2005) เตรียมสารประกอบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น (high-density polyethylene, HDPE) สูงด้วย TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับผิวด้วยไซเลน ปริมาณ 40% โดยปริมาตร ผลการทดลองพบว่า การผสม TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับผิวด้วยไซเลน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและความต้านทานที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับผิว TiO<sub>2</sub> ด้วยไซเลนทำให้พันธะใหม่ระหว่าง TiO<sub>2</sub> กับ HDPE จึงไม่ปรากฏช่องว่างและรอยแตกระหว่างสารตัวเติมและเมตริกซ์จึงส่งผลให้สมบัติของฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

Silva และคณะ (2008) เตรียมยางคอมปาวด์ของยางซิลิโคนผสมด้วย TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องบดชนิด 2 ลูกกลิ้ง ผลการทดลอง พบว่า ความเสถียรทางความร้อนของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเมตริกซ์เพิ่มขึ้นเมื่อเติม TiO<sub>2</sub> 10 phr แต่เมื่อปริมาณ TiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ทำให้เมตริกซ์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้ง่ายขึ้น การผสม TiO<sub>2</sub> ในปริมาณที่สูงทำให้ฟิล์มแข็งขึ้น การเพิ่มปริมาณ TiO<sub>2</sub> ลงไป ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยง (crosslinking density) ของเมตริกซ์ลดลงทำให้ยางบวมตัวขึ้น

### 2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อเลือกผ่านโดยกระบวนการแยกก๊าซ

Stephen และคณะ (2005) ได้ศึกษาการซึมผ่านของเยื่อเลือกผ่านนาโนคอมโพสิตและไมโครคอมโพสิตจากยางธรรมชาติ (NR), ยางคาร์บอซเลตสไตรีนบิวตาไดอิน (XSBR) และยางธรรมชาติผสมกับยางคาร์บอซเลตสไตรีนบิวตาไดอิน (NR/XSBR) ในอัตราส่วน 70:30 โดยใช้ก๊าซ O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> พบว่าในเยื่อเลือกผ่านนาโนคอมโพสิตเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติมเพิ่มขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านของก๊าซ O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ลดลง การผสมสารตัวเติมขนาดไมโครเมตรส่งผลให้การซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติมต่ำและสารตัวเติมมีแนวโน้มเกิดการรวมตัวกันเอง และพบว่าขนาดของโมเลกุลของก๊าซที่ใช้ทดสอบมีผลต่อการซึมผ่าน โดย N<sub>2</sub> มีรัศมีโควาเลนต์สูงกว่า O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ลดลง ส่วนการผสม



สารตัวเติมขนาดนาโนในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้เยื่อเลือกผ่านมีการซึมผ่านลดลง เนื่องจากเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ

อภิชาติ และคณะ (2005) Degussa P-25 เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่มีองค์ประกอบเป็น anatase และ rutile ผสมกันในอัตราส่วน 3:1 ซึ่งในปัจจุบันได้รับความนิยมมาก ในการนำมาใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงในกระบวนการย่อยสลายก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ที่มีปริมาณเริ่มต้นเท่ากับ 0.0001 กรัมออกจากอากาศ 3 วิธี คือ กระบวนการกำจัดโดยใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการกำจัดโดยใช้ก๊าซแอมโมเนียและกระบวนการกำจัดโดยใช้ยูเรียร่วมกับวานาเดียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ โดยใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นกระบวนการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศ ผ่านก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นกรอง และเกิดปฏิกิริยาภายใต้แสงอุลตราไวโอเลตในเครื่องปฏิกรณ์เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และกรดไนตริกโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สูงถึง 95%

Hu และคณะ (1997) เตรียมเยื่อเลือกผ่านนาโนคอมโพสิตจากพอลิเอไมด์-ไอไมด์ (poly(amide-imide)) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) การศึกษาการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  เทียบกับความดันและอุณหภูมิ พบว่าทุกก๊าซยกเว้น  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  มี activation energies สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานเยื่อเลือกผ่านจากพอลิเอไมด์-ไอไมด์ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายของเยื่อเลือกผ่านนาโนคอมโพสิตที่มีโครงสร้างแน่น เยื่อเลือกผ่านจากพอลิเอไมด์-ไอไมด์และข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติทางกล การลดลงของ activation energies เพื่อแก้ปัญหาการซึมผ่านของก๊าซ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  เป็นคุณลักษณะของปฏิกิริยาก๊าซเหล่านี้กับ  $\text{TiO}_2$  และติดตามการปรับปรุงการซึมผ่านของเยื่อเลือกผ่านจากพอลิเอไมด์-ไอไมด์เทียบกับปริมาตร  $\text{TiO}_2$  ที่สามารถเติมเข้าไปในพอลิเมอร์เมตริกซ์

Kong และคณะ (2002) เตรียมเยื่อเลือกผ่านนาโนคอมโพสิตจากพอลิเอไมด์ (polyimide, PI) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) ลงไปในเยื่อเลือกผ่านถึง 30% โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีการปรับปรุงการเตรียม  $\text{TiO}_2$  และวิธีการผสม  $\text{TiO}_2$  และพอลิเอไมด์ เกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟส  $\text{TiO}_2$  อย่างรุนแรง การผสม  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณมากๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อเลือกผ่านพอลิเอไมด์ ค่าการซึมผ่านของ  $\text{H}_2$  และ  $\text{O}_2$  ในเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตที่ผสม  $\text{TiO}_2$  ลงไป 25% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 14.1 และ 0.718 barrer ตามลำดับ ค่าการแยกของ  $\text{H}_2$  กับ  $\text{N}_2$  ( $\alpha_{\text{H}_2/\text{N}_2}$ ) และ  $\text{O}_2$  กับ  $\text{N}_2$  ( $\alpha_{\text{O}_2/\text{N}_2}$ ) เท่ากับ 187.5 และ 9.5 ตามลำดับ

### บทที่ 3

## สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

### 3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA-Latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ผลิตโดยบริษัท ฉลอง อุตสาหกรรมน้ำยางข้น
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$ ) ชนิด R-902 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง ผลิตโดยบริษัท Dupont Co., Ltd.
3. โพแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_{18}H_{33}KO_2$  มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองขุ่น ทำหน้าที่เป็นสารรักษาสภาพน้ำยาง เตรียมในรูปสารละลายอิมัลชัน 10% โดยปริมาตร ผลิตโดยบริษัท Lucky Four Co., Ltd.
4. กำมะถัน (Sulphur, S) มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีเหลือง ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เตรียมอยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% ผลิตโดยบริษัท Lucky Four Co., Ltd.
5. ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $[(C_2H_5)_2NCS_2]_2Zn$  ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งการเกิดการวัลคาไนซ์ เตรียมอยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาวขุ่น ผลิตโดยบริษัท Lucky Four Co., Ltd.
6. เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl Thiuram Disulfide, TMTD) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_6H_{12}N_2S_4$  ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งการเกิดการวัลคาไนซ์ เตรียมอยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาวขุ่น
7. ไนโคลเฮกซิลเบนโซไซโคลเฮกซิลฟีนาไมด์ (N-Cyclohexy-2-benzothizyl sulfonamide, CBS) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_{13}H_{16}S_4$  ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งการเกิดการวัลคาไนซ์ เตรียมอยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีน้ำตาลขุ่น
6. โลวิน็อก ซีพีแอล (Lowinox CPL) มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีเทา ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ อยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% ผลิตโดยบริษัท Lucky Four Co., Ltd.
7. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาว ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น เตรียมอยู่ในรูปสารละลายดิสเพิซชัน 50% ผลิตโดยบริษัท Lucky Four Co., Ltd.

8. วัลทามอล (Vultamol) เป็นเกลือของกรด อัลคิลเลท แนฟทาลีน ซัลโฟนิค (Alkylated naphthalene sulphonic acid) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน เป็นสารที่ช่วยให้สารที่กำลังบดเกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอในรูป dispersion

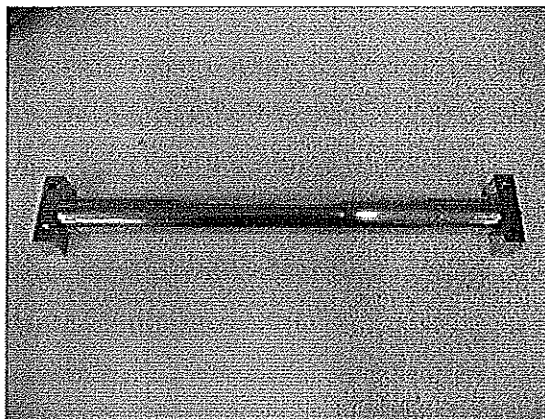
9. เบนโทไนต์ เคลย์ (Bentonite clay) ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเทาใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีเพื่อเตรียม dispersion

10. พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) น้ำหนักโมเลกุล 4000 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น ทำหน้าที่เป็นสารปรับผิวฟิล์มยาง ผลิตโดยบริษัท HONAM PETROCHEMICAL Co., Ltd.

11. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol, PVA) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_2H_4O$  มีน้ำหนักโมเลกุล 8000 กรัมต่อโมล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผลิตโดยบริษัท NAGOYA ประเทศสิงคโปร์

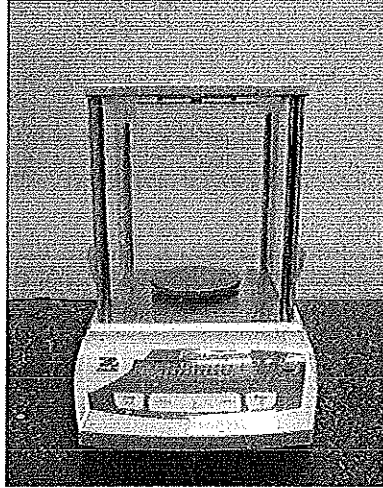
### 3.2 อุปกรณ์วิจัยและเครื่องมือวิจัย

1. กระจกใสใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์ม
2. มีดปาดฟิล์ม (Casting knife)



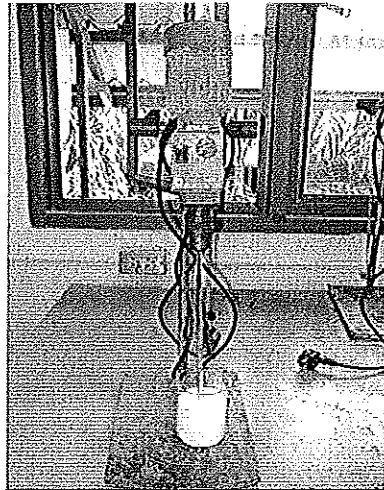
รูปที่ 3.1 มีดปาดฟิล์ม

3. เครื่องชั่งสาร เป็นเครื่องชั่งระบบดิจิทัล มี 2 แบบ คือ ทศนิยม 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler-Toledo AG จำกัด



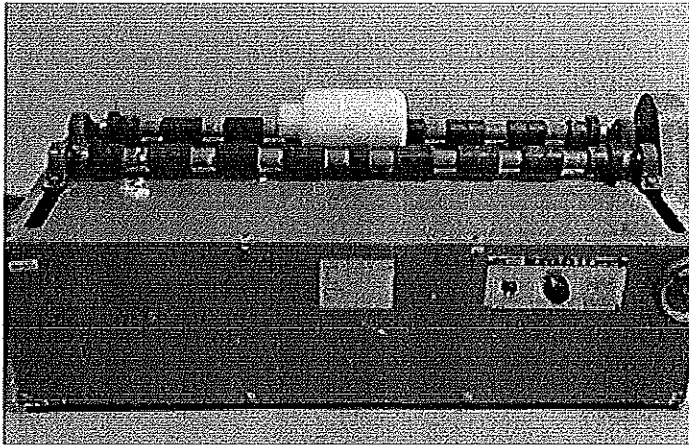
รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งสาร

4. ชุดกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง



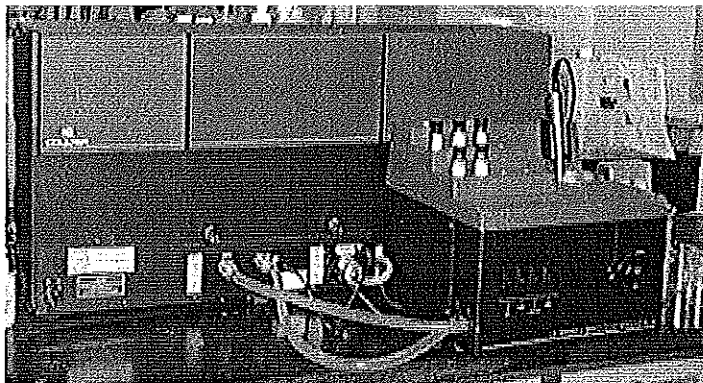
รูปที่ 3.3 ชุดกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง

5. เครื่องบดลดขนาดอนุภาคด้วยลูกบดในหม้อบดบนรางกลิ้ง (Roller ball mills) ประกอบด้วยหม้อสำหรับใส่ลูกบด (Ball charges) ที่มีหลายขนาด ดังแสดงตามรูปที่ 3.4 สำหรับบดวัตถุให้แตกย่อยจนขนาดเล็กลง



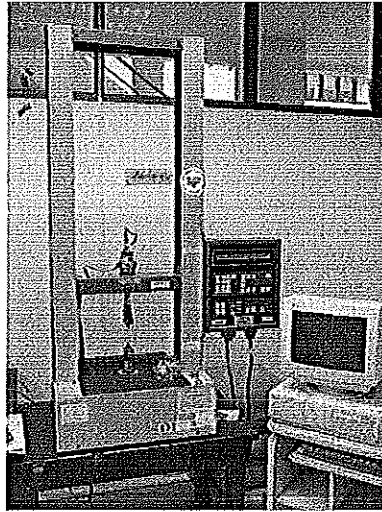
รูปที่ 3.4 เครื่องบดลดขนาดอนุภาคด้วยลูกบดในหม้อบดบนรางกลิ้ง

6. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer) รุ่น LS 230 สามารถวัดขนาดและการกระจายของอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.04-2,000 ไมครอน ผลิตโดยบริษัท Beckman Coulter ประเทศสหรัฐอเมริกา



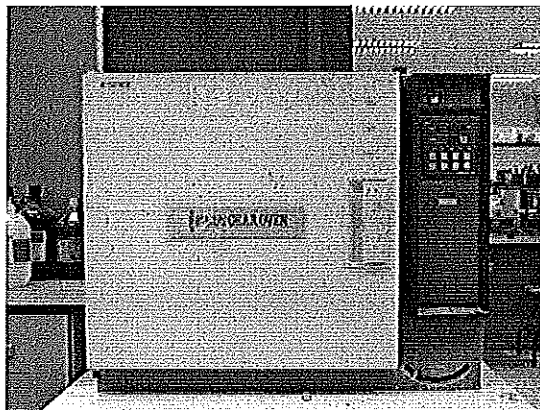
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดขนาดอนุภาค

7. เครื่องทดสอบหาความทนต่อแรงดึง (Tensometer) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K ใช้สำหรับ ทดสอบความทนต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ ตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัทอินโทรเอนเตอร์ไพร์ส จำกัด



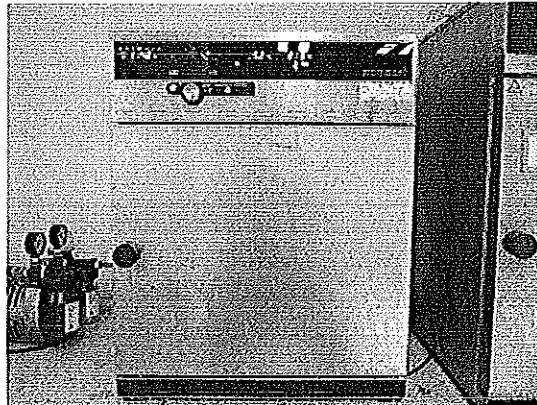
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบหาความทนต่อแรงดึง

8. ตู้อบปมเร่ง (Gear Oven) รุ่น GPHH-100 มีระบบให้อากาศไหลผ่านห้องปมเร่ง มีที่แขวนชิ้นทดสอบซึ่งหมุนอยู่ตลอดเวลาขณะเปิดเครื่องใช้ในการปมเร่งเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพ ผลิตโดยบริษัท Tabai Espec Corp. ประเทศญี่ปุ่น



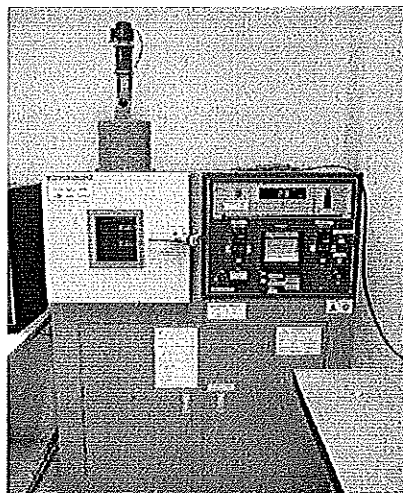
รูปที่ 3.7 ตู้อบปมเร่ง

9. ตู้อบอากาศร้อน (Hot Air Oven) รุ่น D06061 มีพัดลมเป่ากระจายความร้อนเพื่อควบคุมให้สม่ำเสมอ สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุด 250 °C ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมันนี



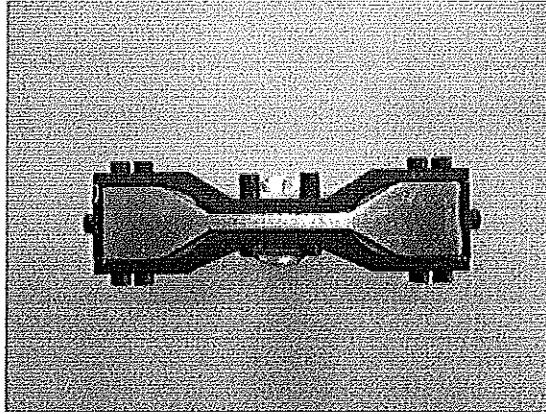
รูปที่ 3.8 ตู้อบอากาศร้อน

10. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone Aging Tester) รุ่น Toyoseiki PPHM-S ผลิตโดยบริษัท Toyoseiki ประเทศญี่ปุ่น เป็นเครื่องสำหรับใช้ทดสอบความต้านทานโอโซน



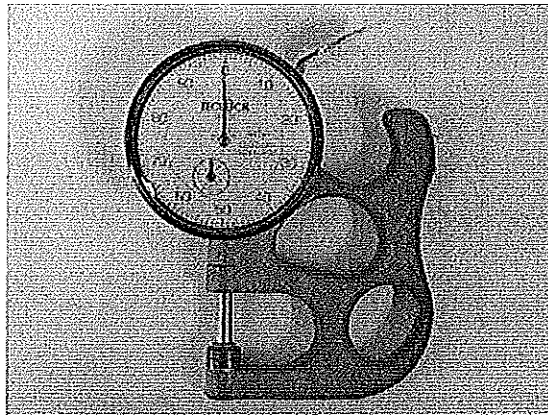
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

11. เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ C ใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์เพื่อทดสอบความทนต่อแรงดึง ค่ามอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างยางวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.10 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบล

12. เครื่องวัดความหนา (Thickness meter) ความละเอียด 0.01 mm. ใช้วัดความหนาของชั้นทดสอบยางวัลคาไนซ์ก่อนทำการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความหนา

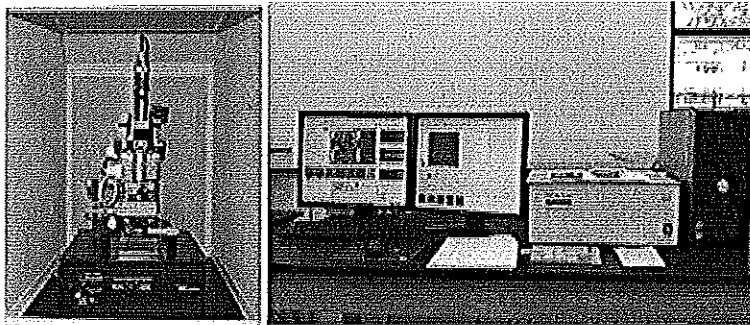


13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU-1500 ผลิตโดยบริษัท Hitachi High-Technologies Corp. ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

14. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (Atomic force microscope, AFM) รุ่น XE-70 ผลิตโดยบริษัท Park Systems Corp. ประเทศเกาหลี

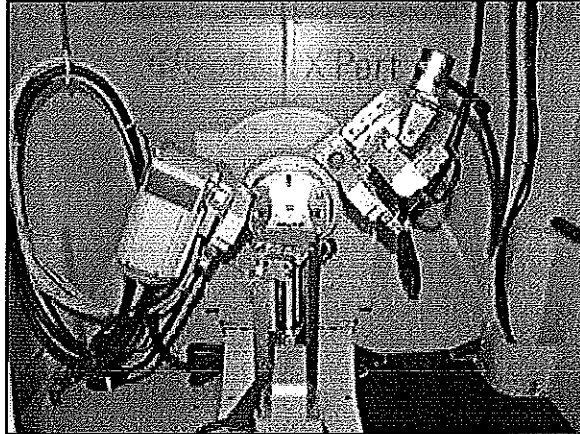


รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม

15. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) รุ่น EQUINOX 55 ผลิตโดย Bruker Cooperation ทดสอบด้วยเทคนิค ATR โดยทดสอบในช่วงเลขคลื่น  $4000-400\text{ cm}^{-1}$

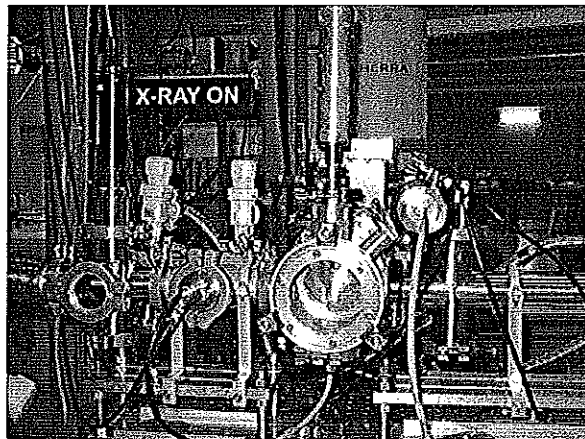
16. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่น TGA7 ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer

17. เครื่องวิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุ (X-ray diffraction analysis, XRD) รุ่น Philip X'Pert MPD ผลิตโดยบริษัท Philip Corp.



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุ

18. เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray absorption spectroscopy, XAS) beamline 8 ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์

19. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability tester) ASTM D1434 ผลิตโดยบริษัท Labthink Corp. ประเทศจีน

### 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์

กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ถูกเตรียมโดยผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กับน้ำกลั่น มีการแปรชนิดและปริมาณของตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค (dispersing agent) ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และวิลทามอล ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการบดด้วยเครื่อง roller ball mill เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวางทิ้งไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะการแขวนลอย ศึกษาขนาดและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$

ตารางที่ 3.1 สูตรการเตรียมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$

| Code.       | Compositions           |                      |
|-------------|------------------------|----------------------|
|             | Polymer                | $\text{TiO}_2$ (phr) |
| T1Bentonite | Bentonite and Vultamol | 10                   |
| T2Bentonite |                        | 20                   |
| T3Bentonite |                        | 30                   |
| T4Bentonite |                        | 40                   |
| T5Bentonite |                        | 50                   |
| T1PEG2      | PEG 0.04% by wt.       | 10                   |
| T2PEG2      |                        | 20                   |
| T3PEG2      |                        | 30                   |
| T4PEG2      |                        | 40                   |
| T5PEG2      |                        | 50                   |
| T1PEG5      | PEG 0.10% by wt.       | 10                   |
| T2PEG5      |                        | 20                   |
| T3PEG5      |                        | 30                   |
| T4PEG5      |                        | 40                   |
| T5PEG5      |                        | 50                   |

ตารางที่ 3.1 สูตรการเตรียมสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> (ต่อ)

| Code.   | Compositions     |                        |
|---------|------------------|------------------------|
|         | Polymer          | TiO <sub>2</sub> (phr) |
| T1PEG10 | PEG 0.20% by wt. | 10                     |
| T2PEG10 |                  | 20                     |
| T3PEG10 |                  | 30                     |
| T4PEG10 |                  | 40                     |
| T5PEG10 |                  | 50                     |
| T1PVA2  | PVA 0.04% by wt. | 10                     |
| T2PVA2  |                  | 20                     |
| T3PVA2  |                  | 30                     |
| T4PVA2  |                  | 40                     |
| T5PVA2  |                  | 50                     |
| T1PVA5  | PVA 0.10% by wt. | 10                     |
| T2PVA5  |                  | 20                     |
| T3PVA5  |                  | 30                     |
| T4PVA5  |                  | 40                     |
| T5PVA5  |                  | 50                     |
| T1PVA10 | PVA 0.20% by wt. | 10                     |
| T2PVA10 |                  | 20                     |
| T3PVA10 |                  | 30                     |
| T4PVA10 |                  | 40                     |
| T5PVA10 |                  | 50                     |

### 3.3.2 ศึกษาสมบัติของสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$

#### 3.3.2.1 การหาขนาดของอนุภาคสารแขวนลอย

ขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยสามารถหาได้โดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer รุ่น LS 230 โดยเครื่องจะทำการยิงแสงเลเซอร์ไปยังตัวอย่างที่ทำการทดสอบ แล้วศึกษาการกระเจิงของแสงที่มุมต่างๆ ด้วยชุด Detector ซึ่งสามารถวัดขนาดของอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.04 ถึง 2000 ไมครอน

#### 3.3.2.2 การวิเคราะห์หาสารประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์

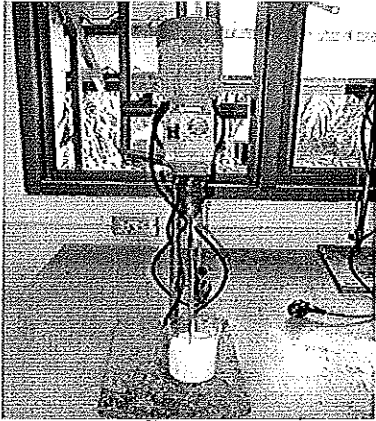
การศึกษาหาสารประกอบของ  $\text{TiO}_2$  (Unit cell size) โดยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น Phillips X'Pert MPD ที่ใช้  $\text{CuK}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดแสง ด้วยวิธี standard addition ในการวิเคราะห์

### 3.3.3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ

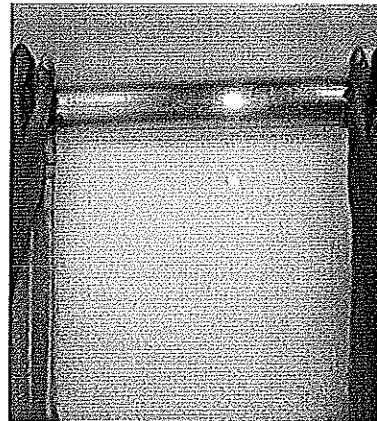
#### 3.3.3.1 ศึกษาผลของชนิดสารแขวนลอยต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

1. เตรียมน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มีตัวช่วยการกระจายตัวชนิดต่างๆ ตามสูตรในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 กวนอย่างสม่ำเสมอให้เข้ากัน ด้วยชุดเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที

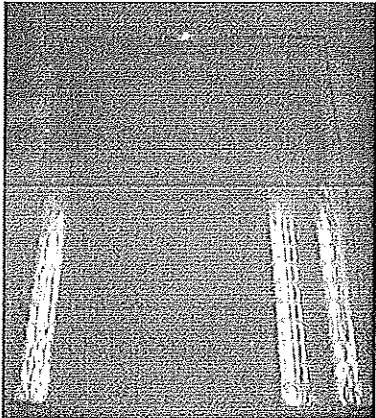
2. ทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง โดยเทน้ำยางที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ลงบนแผ่นกระจก ทำการปาดด้วยมีดปาด (Casting knife) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแผ่นฟิล์มแห้ง จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นกระจก นำแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา



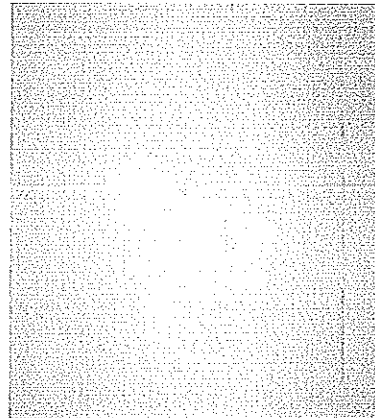
(a) ชุดกวนน้ำยางผสมสารเคมี



(b) การปาดน้ำยางด้วย casting knife



(c) ฟิล์มยางที่ผ่านการระเหยน้ำจนแห้ง



(d) แผ่นฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ

รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการ casting

ตารางที่ 3.2 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  โดยมี PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค

| Code          | Composition (part per hundred rubber, phr) |                |       |
|---------------|--------------------------------------------|----------------|-------|
|               | 60% HA latex                               | $\text{TiO}_2$ | PEG   |
| NR-T5PEG02-10 | 100                                        | 10             | 0.017 |
| NR-T5PEG05-10 | 100                                        | 10             | 0.040 |
| NR-T5PEG10-10 | 100                                        | 10             | 0.080 |
| NR-T5PEG02-30 | 100                                        | 30             | 0.054 |
| NR-T5PEG05-30 | 100                                        | 30             | 0.120 |
| NR-T5PEG10-30 | 100                                        | 30             | 0.240 |
| NR-T5PEG02-50 | 100                                        | 50             | 0.085 |
| NR-T5PEG05-50 | 100                                        | 50             | 0.200 |
| NR-T5PEG10-50 | 100                                        | 50             | 0.400 |
| NR-T5PEG02-70 | 100                                        | 70             | 0.119 |
| NR-T5PEG05-70 | 100                                        | 70             | 0.280 |
| NR-T5PEG10-70 | 100                                        | 70             | 0.560 |

ตารางที่ 3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  โดยมี PVA เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค

| Code          | Composition (part per hundred rubber, phr) |                |       |
|---------------|--------------------------------------------|----------------|-------|
|               | 60% HA latex                               | $\text{TiO}_2$ | PVA   |
| NR-T5PVA02-10 | 100                                        | 10             | 0.017 |
| NR-T5PVA05-10 | 100                                        | 10             | 0.040 |
| NR-T5PVA10-10 | 100                                        | 10             | 0.080 |
| NR-T5PVA02-30 | 100                                        | 30             | 0.054 |
| NR-T5PVA05-30 | 100                                        | 30             | 0.120 |
| NR-T5PVA10-30 | 100                                        | 30             | 0.240 |
| NR-T5PVA02-50 | 100                                        | 50             | 0.085 |
| NR-T5PVA05-50 | 100                                        | 50             | 0.200 |
| NR-T5PVA10-50 | 100                                        | 50             | 0.400 |
| NR-T5PVA02-70 | 100                                        | 70             | 0.119 |
| NR-T5PVA05-70 | 100                                        | 70             | 0.280 |
| NR-T5PVA10-70 | 100                                        | 70             | 0.560 |

### 3.3.3.2 ศึกษาผลของปริมาณ $\text{TiO}_2$ ต่อสมบัติของฟิล์มบาง

1. เตรียมน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยทำการแปรปริมาณสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค ทำการกวนให้เข้ากันด้วยชุดเครื่องกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชี้นำรูปแผ่นฟิล์มบาง โดยเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีลงบนแผ่นกระจก ทำการปาดตัวมีดปาดฟิล์ม (Casting knife) แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแผ่นฟิล์มแห้ง แล้วทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาสมบัติเชิงกล



### ตารางที่ 3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี

| Composition          | Part per hundred rubber, phr |
|----------------------|------------------------------|
| 60% HA-Latex         | 100                          |
| 10% KOH              | 0.25                         |
| 10% Potassium Oleate | 0.20                         |
| 50% Sulphur          | 1.00                         |
| 50% Lowinox CPL      | 0.75                         |
| 50% ZnO              | 0.50                         |
| 50% ZDEC             | 0.50                         |
| 50% TiO <sub>2</sub> | 5, 10, 20, 30, 40, 50        |

#### 3.3.3.3 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเร่ง และสัดส่วนระหว่างสารตัวเร่งกับกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มบาง

1. เตรียมน้ำยางธรรมชาติผสมกับสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> ที่มี PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาค และสารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยทำการแปรชนิดและปริมาณสารตัวเร่ง ได้แก่ CBS, ZDEC และ TMTD และสัดส่วนระหว่างสารตัวเร่งแต่ละชนิดกับกำมะถัน ทำการกวนให้เข้ากันด้วยชุดเครื่องกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง โดยเทน้ำยางที่ผสมสารเคมีลงบนแผ่นกระจก ทำการปาดด้วยมีดปาดฟิล์ม (Casting knife) แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแผ่นฟิล์มแห้ง แล้วทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี

| Code.           | Composition (Part per hundred rubber, phr) |                                   |        |                              |      |      |                         |                        |                     |                             |                   |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------|------------------------------|------|------|-------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
|                 | HA latex (60%DR)                           | TiO <sub>2</sub> (50% dispersion) |        | Accelerator (50% dispersion) |      |      | Sulphur (50%dispersion) | K-Oleate (10%solution) | ZnO (50%dispersion) | Lowinox CPL (50%dispersion) | KOH (10%solution) |
|                 |                                            | T5PEG2                            | T5PEG5 | CBS                          | ZDEC | TMTD |                         |                        |                     |                             |                   |
| NRT5PG2_S05_C05 | 100                                        | 50                                | -      | 0.5                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_C10 | 100                                        | 50                                | -      | 1.0                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_C20 | 100                                        | 50                                | -      | 2.0                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 1.0  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S05_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 2.0  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S10_C05 | 100                                        | 50                                | -      | 0.5                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S10_C10 | 100                                        | 50                                | -      | 1.0                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S10_C20 | 100                                        | 50                                | -      | 2.0                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S10_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG2_S10_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |

ตารางที่ 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี (ต่อ)

| Code            | Composition (Part per hundred rubber, phr) |                                   |        |                              |      |      |                         |                        |                     |                             |                   |        |        |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------|------------------------------|------|------|-------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|--------|--------|
|                 | HA latex (60%DRC)                          | TiO <sub>2</sub> (50% dispersion) |        | Accelerator (50% dispersion) |      |      | Sulphur (50%dispersion) | K-Oleate (10%solution) | ZnO (50%dispersion) | Lowinox CPL (50%dispersion) | KOH (10%solution) |        |        |
|                 |                                            | T5PEG2                            | T5PEG5 | CBS                          | ZDEC | TMTD |                         |                        |                     |                             |                   |        |        |
|                 |                                            |                                   |        |                              |      |      |                         |                        |                     |                             |                   | T5PEG2 | T5PEG5 |
| NRT5PG2_S10_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S10_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S10_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S10_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_C05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_C10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_C20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 1.0  | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 2.0  | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |
| NRT5PG2_S20_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 2.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |        |        |

ตารางที่ 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี (ต่อ)

| Code.           | Composition (Part per hundred rubber, phr) |                                   |        |                              |      |      |                         |                        |                     |                             |                   |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------|------------------------------|------|------|-------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
|                 | HA latex (60%DRC)                          | TiO <sub>2</sub> (50% dispersion) |        | Accelerator (50% dispersion) |      |      | Sulphur (50%dispersion) | K-Oleate (10%solution) | ZnO (50%dispersion) | Lowinox CPL (50%dispersion) | KOH (10%solution) |
|                 |                                            | T5PEG2                            | T5PEG5 | CBS                          | ZDEC | TMTD |                         |                        |                     |                             |                   |
| NRT5PG5_S05_C05 | 100                                        | 50                                | -      | 0.5                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_C10 | 100                                        | 50                                | -      | 1.0                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_C20 | 100                                        | 50                                | -      | 2.0                          | -    | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 1.0  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S05_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 2.0  | 0.5                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S10_C05 | 100                                        | 50                                | -      | 0.5                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S10_C10 | 100                                        | 50                                | -      | 1.0                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S10_C20 | 100                                        | 50                                | -      | 2.0                          | -    | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S10_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |
| NRT5PG5_S10_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 1.0                     | 0.20                   | 0.5                 | 0.75                        | 0.25              |

ตารางที่ 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี (ต่อ)

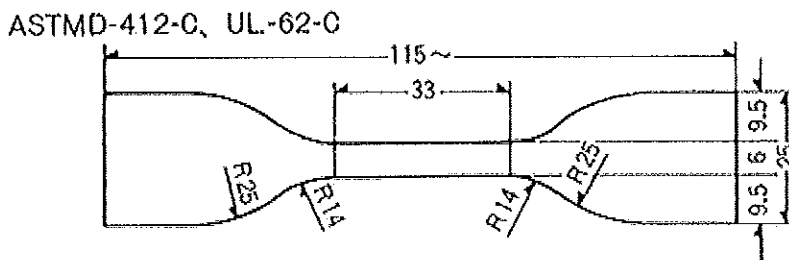
| Code            | Composition (Part per hundred rubber, phr) |                                   |        |                              |      |      |                          |                         |                      |                              |                    |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------|------------------------------|------|------|--------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
|                 | HA latex (60%DRC)                          | TiO <sub>2</sub> (50% dispersion) |        | Accelerator (50% dispersion) |      |      | Sulphur (50% dispersion) | K-Oleate (10% solution) | ZnO (50% dispersion) | Lowinox CPL (50% dispersion) | KOH (10% solution) |
|                 |                                            | T5PEG2                            | T5PEG5 | CBS                          | ZDEC | TMTD |                          |                         |                      |                              |                    |
| NRT5PG5_S10_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 1.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S10_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 1.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S10_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 1.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S10_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 1.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_C05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 0.5  | -    | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_C10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 1.0  | -    | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_C20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | 2.0  | -    | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_Z05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_Z10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 1.0  | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_Z20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 2.0  | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_T05 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | 0.5  | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_T10 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |
| NRT5PG5_S20_T20 | 100                                        | 50                                | -      | -                            | -    | -    | 2.0                      | 0.20                    | 0.5                  | 0.75                         | 0.25               |

### 3.3.4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติคอมโพสิต (NR-TiO<sub>2</sub>)

#### 3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ตัดตัวอย่างชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบ die C ดังแสดงในรูปที่ 3.17 วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยของความหนาที่วัดได้ แล้วนำไปทดสอบสมบัติการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% elongation at break)

การทดสอบการทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่ง มีวิธีการเช่นเดียวกับก่อนการบ่มเร่ง เพียงแต่นำฟิล์มยางที่ตัดเป็นรูปดัมเบลล์ ไปทดสอบด้วยเครื่องบ่มเร่งยางแบบเกียร์ (gear-aging oven) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องบ่มเร่ง และนำไปทดสอบแรงดึง เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าของฟิล์มยางที่ไม่ได้ผ่านการบ่มเร่ง



รูปที่ 3.17 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C

#### การคำนวณ

ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (หน่วยที่บันทึกได้จากเครื่อง คือ นิวตัน, N) เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm<sup>2</sup>) ดังสมการที่ 3.1 จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น N/mm<sup>2</sup> หรือ เมกกะพาสคาล (MPa) ในหน่วย SI (1 N/m<sup>2</sup> = 1 Pa)

$$\text{tensile strength} = \frac{\text{maximum load}}{A} \quad (3.1)$$

โดย

maximum load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)  
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

ค่าโมดูลัสที่การยืด 100 และ 300% (100 and 300% modulus) คือ แรงที่บันทึกได้จากเครื่อง ณ ตำแหน่งที่มีการยืดของชิ้นทดสอบเป็น 100 หรือ 300% จากช่วงการยืดที่กำหนดไว้ โดยหน่วยของแรงที่บันทึกได้จากเครื่อง คือ นิวตัน เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร) ดังสมการที่ 3.2

$$100 \text{ or } 300\% \text{ modulus} = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

โดย

- F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืด 100 หรือ 300% (นิวตัน)  
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) คือ ความสามารถของชิ้นทดสอบที่จะยืดออกได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย จะแสดงค่าเป็นร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการขาดของชิ้นทดสอบ การคำนวณแสดงดังสมการที่ 3.3

$$\text{Elongation at break} = 100 \times \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (3.3)$$

โดย

- L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (มิลลิเมตร)  
L<sub>0</sub> คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (มิลลิเมตร)

#### 3.3.4.2 การศึกษาลักษณะของพันธะการเชื่อมโยงในฟิล์มบาง

เตรียมชิ้นตัวอย่างขนาด 15 mm x 26 mm ตามสูตรต่างๆที่ต้องการศึกษาด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (XAS) โดยที่ขนาดของตัวอย่างนั้น ควรจะเป็นฟิล์มบางที่มีความหนายู่ในช่วง 0.15 mm ถึง 0.20 mm โดยที่สภาวะในการทดลองนั้นจะอยู่ในช่วงพลังงานใกล้ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES) ของ S-K edge absorption โดยใช้ Transmission-mode ที่ช่วงพลังงาน 2450, 2465, 2485 และ 2520 eV Step 0.2, 0.1 และ 0.2 eV

### 3.3.4.3 การศึกษาการกระจายตัวของ $\text{TiO}_2$ ในฟิล์มบาง

การศึกษาการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ในฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การเตรียมชิ้นตัวอย่างในการทดสอบเตรียมบนแผ่นอลูมิเนียมขนาด  $10 \times 10$  mm ชิ้นตัวอย่างเตรียม 2 แบบ คือ เตรียมในรูปของเหลวและเตรียมในรูปแผ่นฟิล์มบาง ในการเตรียมในรูปของเหลวจะทำการปาดชิ้นตัวอย่างลงบนแผ่นอลูมิเนียม แล้วรอกจนกว่าชิ้นตัวอย่างแห้ง แล้วทำการทดสอบ ส่วนการเตรียมในรูปแผ่นฟิล์มบางจะตัดชิ้นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ ตัดลงบนแผ่นอลูมิเนียม แล้วถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU-1500

### 3.3.4.4 การศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์มบาง

การศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์มบาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (Atomic force microscope, AFM) การเตรียมชิ้นตัวอย่างในการทดสอบ เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยเตรียม 2 แบบ คือ เตรียมในรูปของเหลวและเตรียมในรูปแผ่นฟิล์มบาง ในการเตรียมในรูปของเหลวจะทำการปาดชิ้นตัวอย่างลงบนแผ่นกระจกสไลด์แล้วรอกจนกว่าชิ้นตัวอย่างแห้ง แล้วทำการทดสอบ ส่วนการเตรียมในรูปแผ่นฟิล์มบางจะตัดชิ้นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ ลงบนแผ่นที่ใช้ทดสอบซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นอลูมิเนียมทรงกลม แล้วถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (AFM) รุ่น XE-70



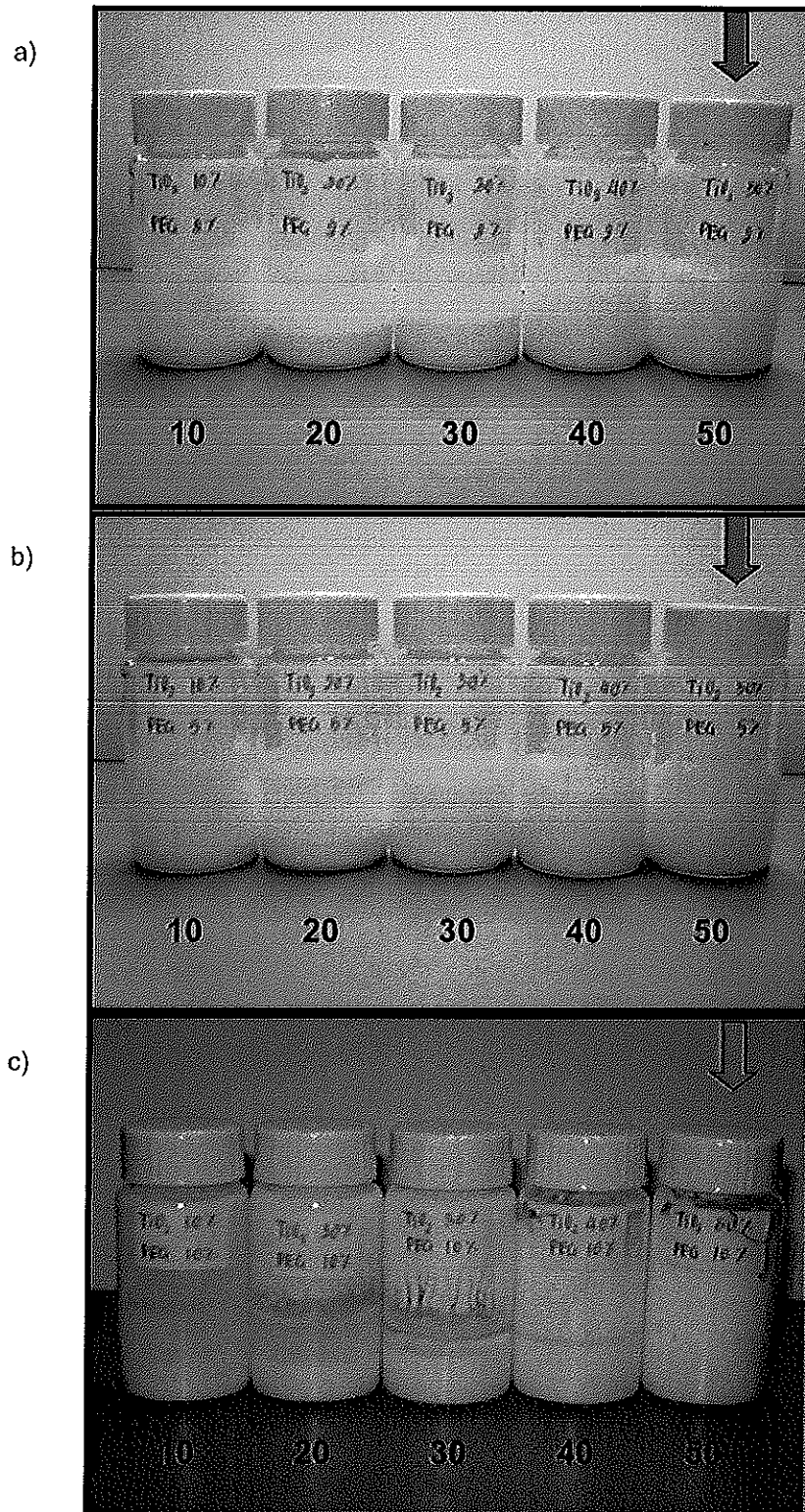
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

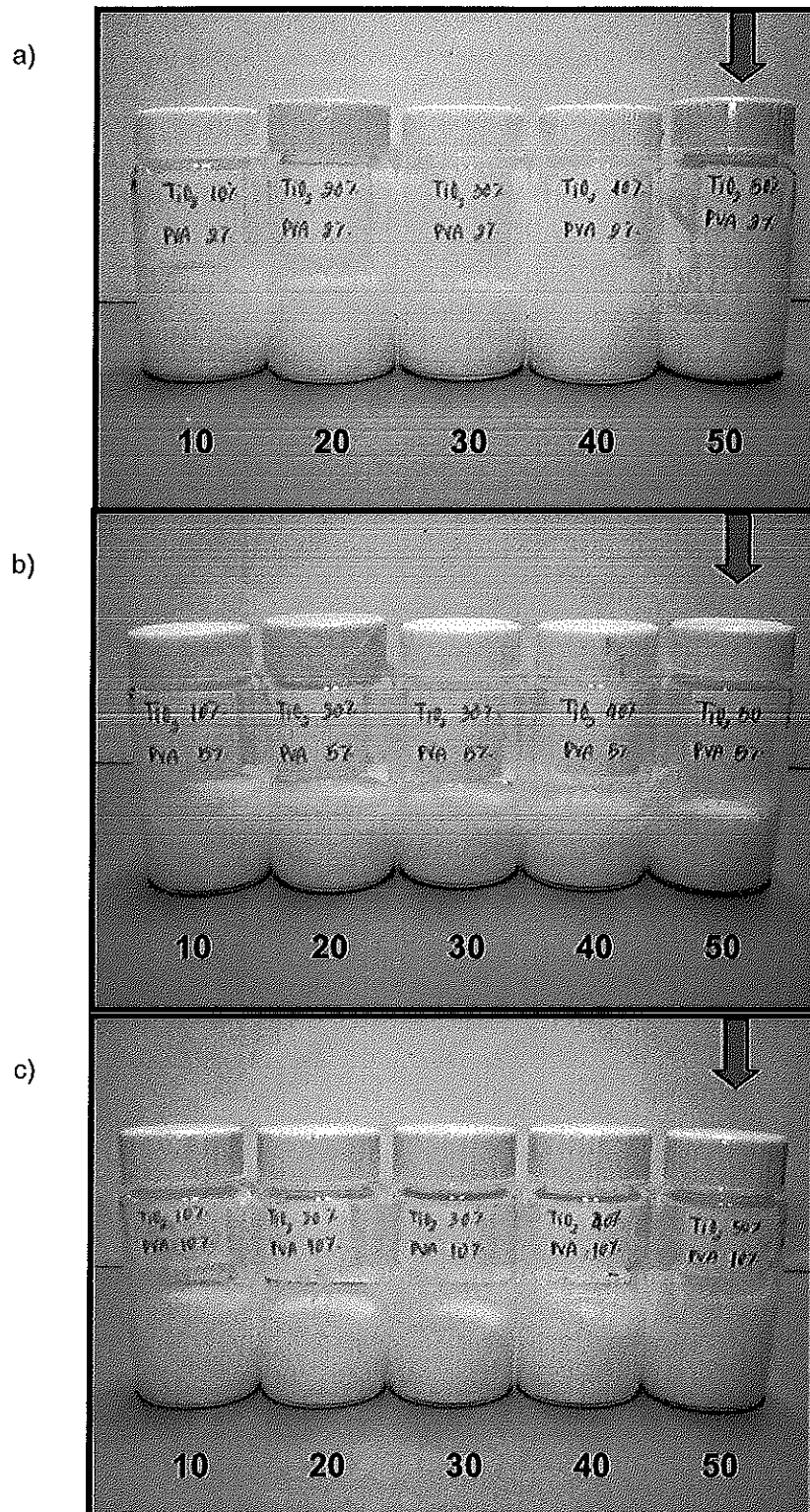
การพัฒนาฟิล์มบางจากยางธรรมชาติคอมโพสิตไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการปรับปรุงสูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมีด้วยการผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) ซึ่งอยู่ในรูปสารแขวนลอย แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางด้วยกระบวนการ casting ศึกษาสมบัติของสาร  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียม ศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์มบางในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile properties) ลักษณะเชื่อมโยงพันธะโมเลกุลยาง (crosslinking) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) เป็นต้น

#### 4.1 ผลของการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ทำหน้าที่เป็นตัว dispersing agent เปรียบเทียบกับการใช้วัลทามอลร่วมกับเบนโทไนด์ เคลย์ โดยวิธีการบดย่อยด้วยเครื่อง roller ball mill เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยทำการแปรปริมาณของ dispersing agent ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสารแขวนลอย  $TiO_2$  ที่เตรียมโดยใช้ PEG ร่วมกับ  $TiO_2$  a) PEG 0.04%  
 b) PEG 0.10% และ c) PEG 0.20% โดยน้ำหนัก



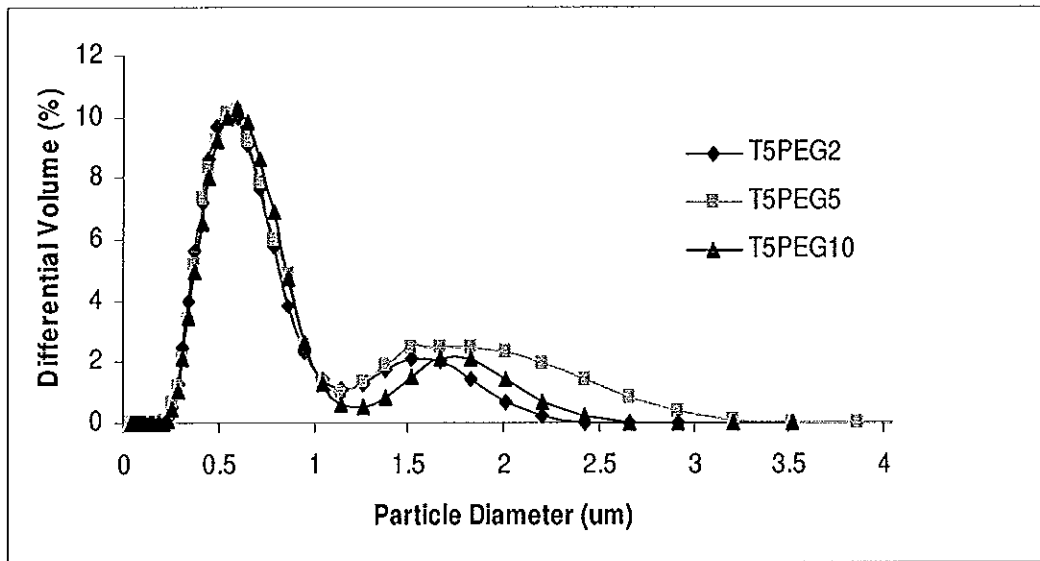
รูปที่ 4.2 ลักษณะของสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยใช้ PVA ร่วมกับ TiO<sub>2</sub> a) PVA 0.04%  
b) PVA 0.10% และ c) PVA 0.20% โดยน้ำหนัก

เมื่อนำ PEG และ PVA มาทำหน้าที่แทนวัลทามอล ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้อนุภาค  $\text{TiO}_2$  เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเบนโทไนด์ เคลย์ ซึ่งเป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมในรูปแบบ dispersion โดยทำการแปรปริมาณความเข้มข้นที่ 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก และแปรปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง พบว่า  $\text{TiO}_2$  สามารถแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้เป็นอย่างดีเมื่อใช้ PVA เป็น dispersing agent ทุกความเข้มข้นของพอลิเมอร์ และสารแขวนลอยเนื่องจาก PVA เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำเกิดการบวมตัวหลังการดูดซับน้ำเป็นผลให้สารแขวนลอยมีความหนืดเพิ่มขึ้น และช่วยป้องกันการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  ขณะที่ PEG จะไม่ช่วยป้องกันการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  ในสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  50% โดยน้ำหนัก จะได้สารแขวนลอยที่มีสีขาวขุ่น ไม่เกิดการตกตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ โดยปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อความเสถียรของสารแขวนลอย อย่างไรก็ตามสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ระดับความเข้มข้น 50% โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการใช้ PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ทำให้ได้สารแขวนลอยที่มีสมบัติและความหนืดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ PVA

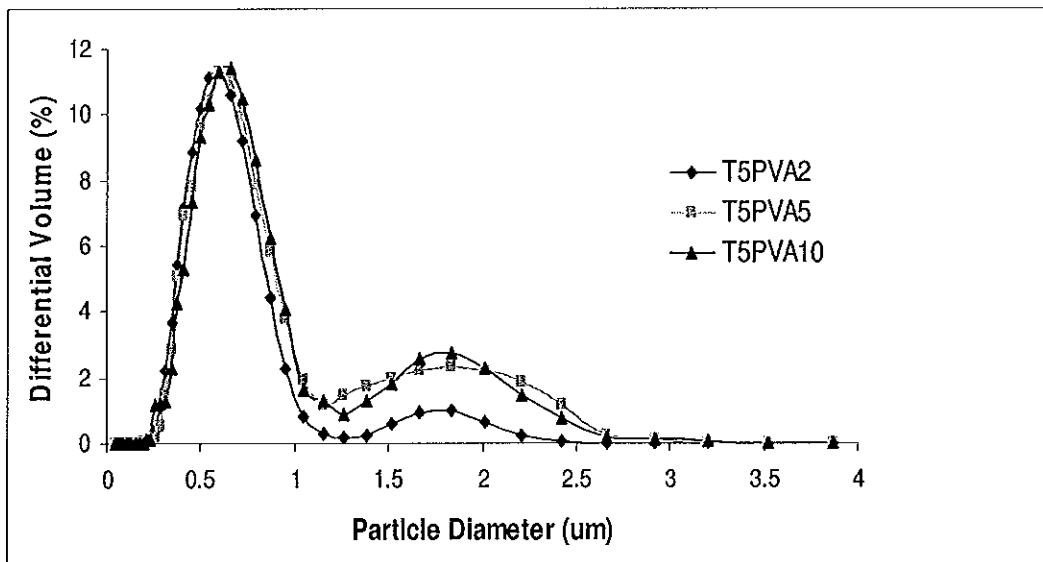
#### 4.1.1 ขนาดอนุภาค $\text{TiO}_2$ ในสารแขวนลอย

จากการศึกษาขนาดอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมโดยใช้ PEG กับ PVA ทำหน้าที่เป็นตัว dispersing agent และทำการแปรปริมาณความเข้มข้นของ dispersing agent เป็น 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก โดยใช้เทคนิค Laser Particle Size Analysis ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยมีค่าโดยเฉลี่ย 0.7 ไมครอน

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเลือกใช้สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  50% dispersion ที่มี PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ที่ความเข้มข้น 0.04 และ 0.10% โดยน้ำหนัก ในการเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิต เนื่องจากสารแขวนลอยมีความหนืดที่ต่ำ สามารถผสมเข้ากับน้ำยางได้เป็นอย่างดี ประกอบกับ PEG สามารถที่จะถูกกำจัดออกจากฟิล์มบางได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ PVA โดยสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคที่ไม่แตกต่างกัน



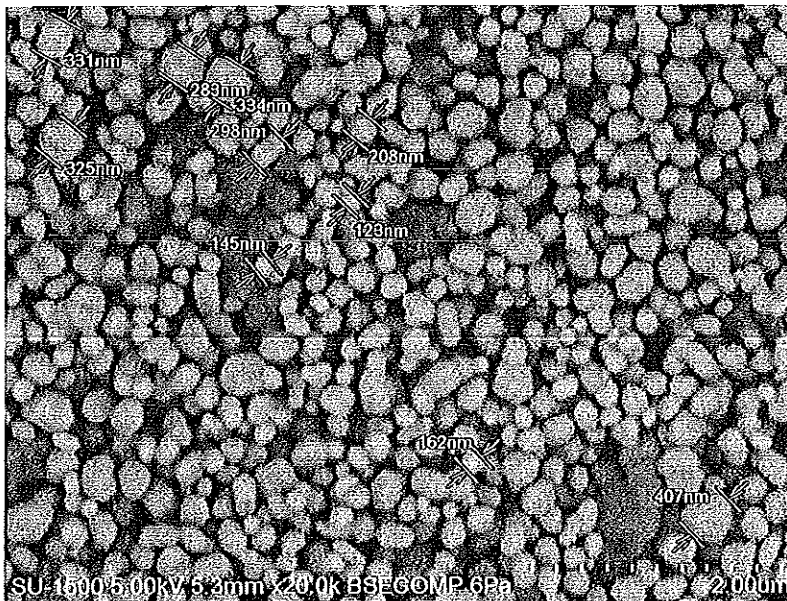
รูปที่ 4.3 ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมโดยใช้  $\text{TiO}_2$  50 phr ร่วมกับ PEG ที่ความเข้มข้น 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมโดยใช้  $\text{TiO}_2$  50 phr ร่วมกับ PVA ที่ความเข้มข้น 0.04, 0.10 และ 0.20% โดยน้ำหนัก

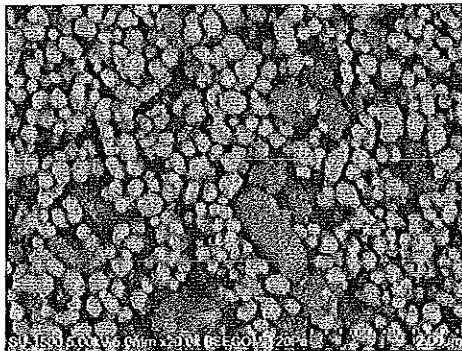
#### 4.1.2 การกระจายตัวและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารแขวนลอย

ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ได้จากรูปที่ 4.5 จากภาพถ่าย SEM สามารถอธิบายการกระจายตัวของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ซึ่งใช้ PEG เป็น dispersing agent พบว่า ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  มีขนาดเล็กกว่าผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค PLS เนื่องมาจากการรวมตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จากภาพถ่าย SEM จะเห็นอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 150-250 nm.

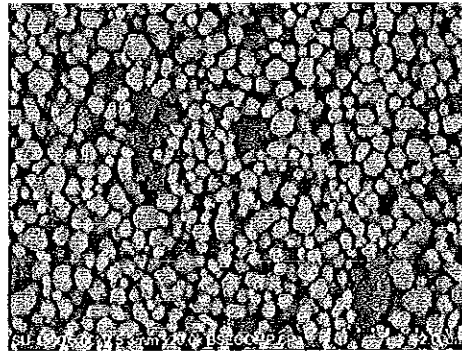


รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมโดยใช้  $\text{TiO}_2$  50 phr ร่วมกับ PEG 0.04% โดยน้ำหนัก

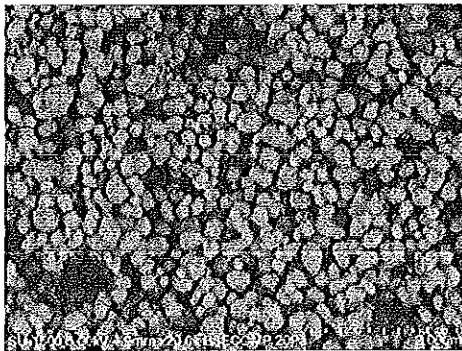
จากการพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของการกระจายตัวของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ในรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบใช้ PEG และ PVA ทำหน้าที่เป็นตัว dispersing agent แทนเบนโทไนต์ เคลย์และวัลทามอล การกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีลักษณะอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรงกลมมีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งอนุภาคที่เตรียมได้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในชั้น  $\text{TiO}_2$  ซึ่งเหมาะสมสำหรับการดูดซับสาร



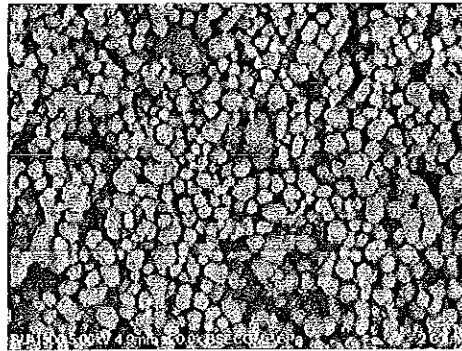
(a) Dispersion T5Bentonite



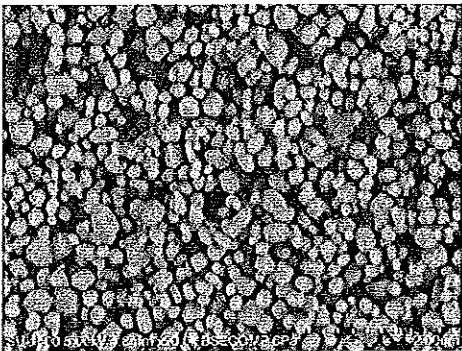
(b) Dispersion T5PEG2



(c) Dispersion T5PEG5



(d) Dispersion T5PVA2

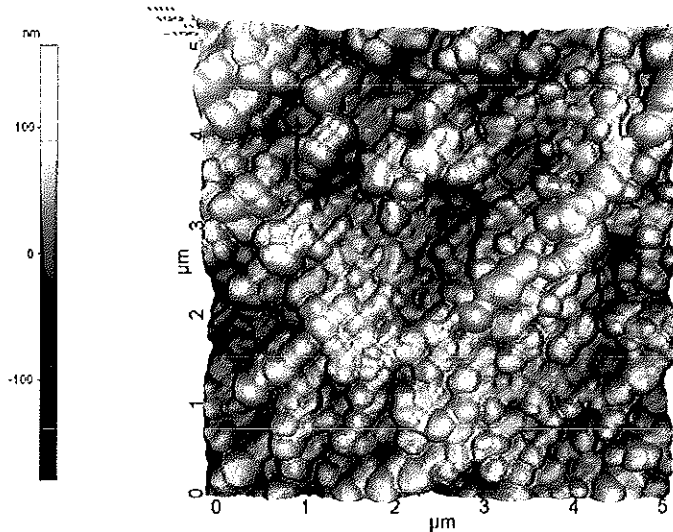


(e) Dispersion T5PVA5

#### รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของสารแขวนลอย $\text{TiO}_2$

รูปที่ 4.7 แสดงภาพ AFM ของพื้นผิวที่ถูกหยดด้วยสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  เปรียบเทียบระหว่างชนิดและปริมาณของสาร dispersing agent จะพบการเกาะรวมกลุ่มกันของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เมื่อใช้สารพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ในขณะที่สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้เบนโทไนต์

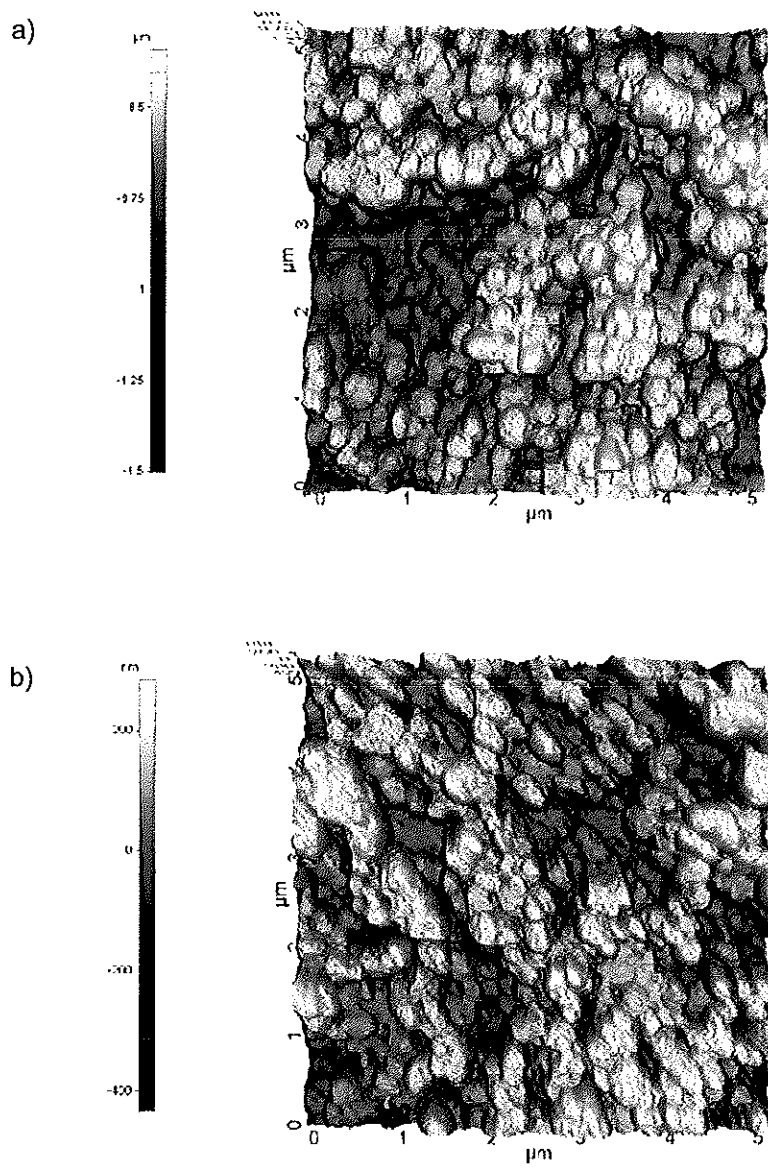
เคลย์ร่วมกับวัลทามอล พบการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  โดยมีการเกาะรวมกลุ่มกันน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็น dispersing agent



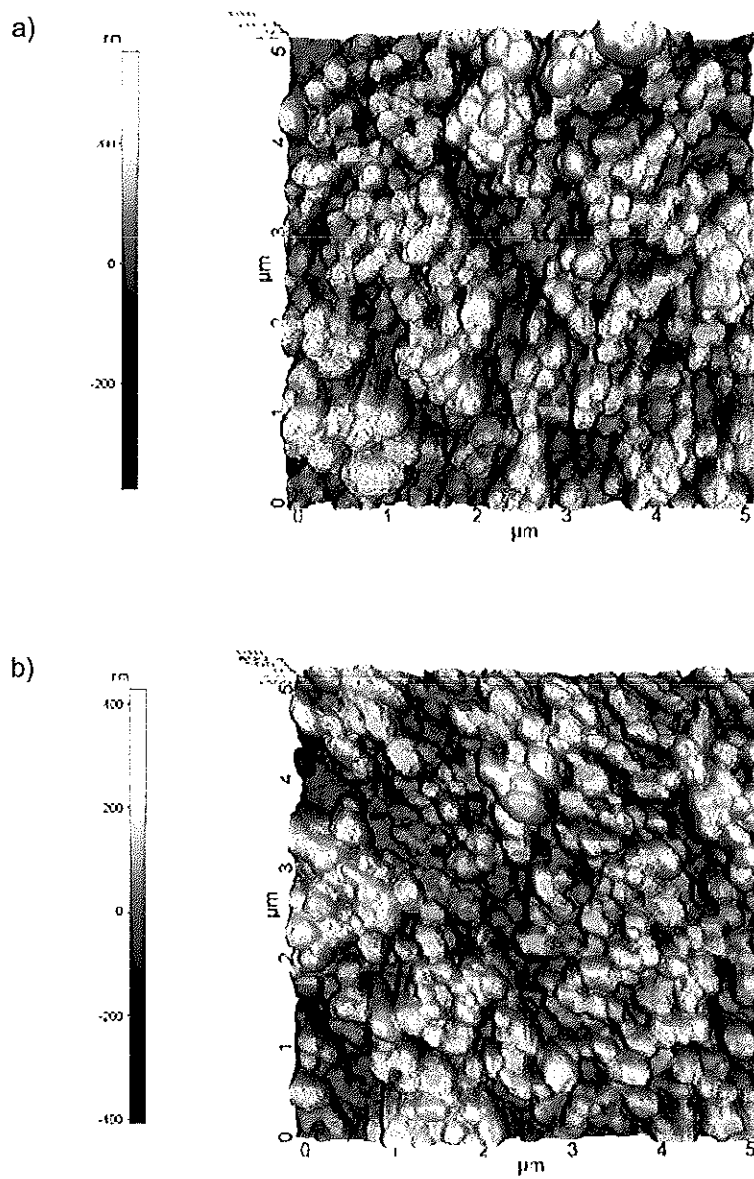
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ผสมเบนโทไนต์เคลย์ร่วมกับวัลทามอล

สารแขวนลอยที่ผสม PEG ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะพบการเกาะรวมกลุ่มกันของ  $\text{TiO}_2$  ลดน้อยลง เมื่อผสม PEG ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่การผสม PVA ในสารแขวนลอย จะพบการเกาะรวมกลุ่มกันของ  $\text{TiO}_2$  มากขึ้นเมื่อผสม PVA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยอนุภาคของสารแขวนลอยจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการผสม PVA ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ PVA ในการช่วยการกระจายตัวของสารแขวนลอยลดน้อยลง





รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ผสม PEG เป็นปริมาณ  
a) 0.04 และ b) 0.10% โดยน้ำหนัก

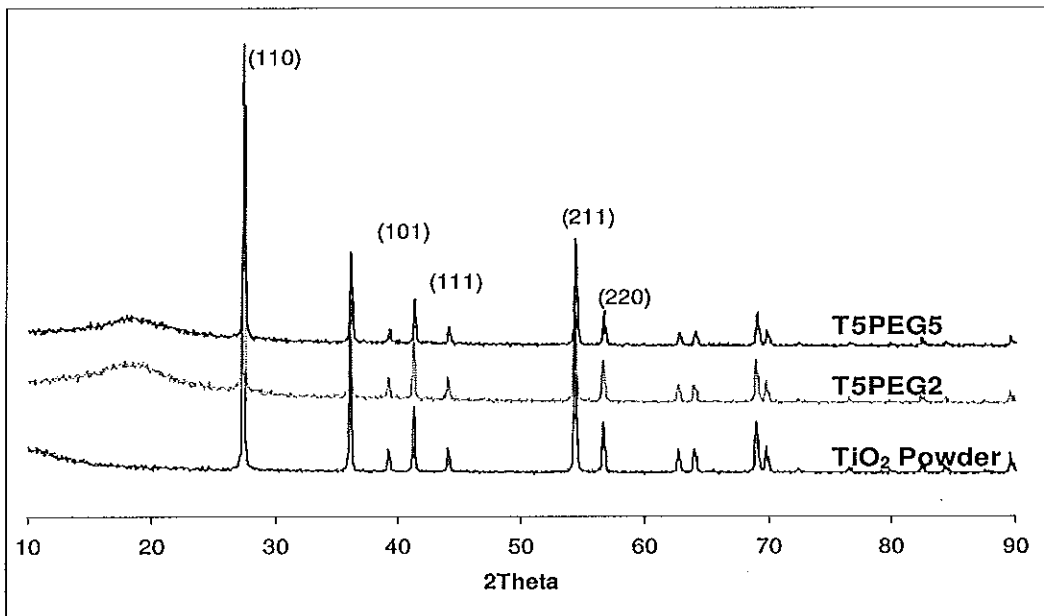


รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย AFM ของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ผสม PVA เป็นปริมาณ  
a) 0.04 และ b) 0.10% โดยน้ำหนัก

#### 4.1.3 โครงสร้างของ $\text{TiO}_2$ ในสารแขวนลอย

เมื่อนำ  $\text{TiO}_2$  ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า ผง  $\text{TiO}_2$  มีพีคที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 27.5, 36, 41 และ 56.6 ซึ่งเป็นพีคที่แสดงตำแหน่ง 110, 101, 111 และ 220 reflection ตามลำดับของ  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (Swope, et. al., 1995)

เมื่อนำสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ของสารผสม T5PEG2 และ T5PEG5 ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า มีพีคที่ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 27.5, 36, 41 และ 56.6 ซึ่งเป็นพีคที่แสดงตำแหน่ง 110, 101, 111 และ 220 reflection ตามลำดับของ  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของ  $\text{TiO}_2$

## 4.2 ผลของการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ

### 4.2.1 ผลของชนิดสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติฟิล์มบาง

#### 4.2.1.1 สมบัติเชิงกล

การทนต่อแรงดึงของฟิล์มบางจากยางธรรมชาติผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ได้แก่ ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

การผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PEG เป็นตัว dispersing agent ดังตารางที่ 3.2 เมื่อผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการคอมโพสิต  $\text{TiO}_2$  ในสูตรน้ำยาง อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  จะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติ จึงทำให้น้ำยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด ลดต่ำลง เช่นเดียวกันกับการใช้ PVA ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ค่ามอดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่ามากกว่าการใช้ PEG เล็กน้อย เพราะ PVA สามารถช่วยให้  $\text{TiO}_2$  เกิดการกระจายตัวได้ดีกว่า PEG แต่การผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PVA เป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก จะทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดน้อยลง เช่นเดียวกันกับค่าระยะยืด ณ จุดขาด ซึ่งตรงกันข้ามกับการผสมสารแขวนลอยที่มี PEG เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มีปริมาณ PVA เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การผสมสารแขวนลอยเข้ากับน้ำยางทำได้ยาก จึงเกิดการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  เป็นผลให้ค่าความแข็งแรง และระยะยืด ณ จุดขาด ลดน้อยลง

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> โดยมี PEG เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค

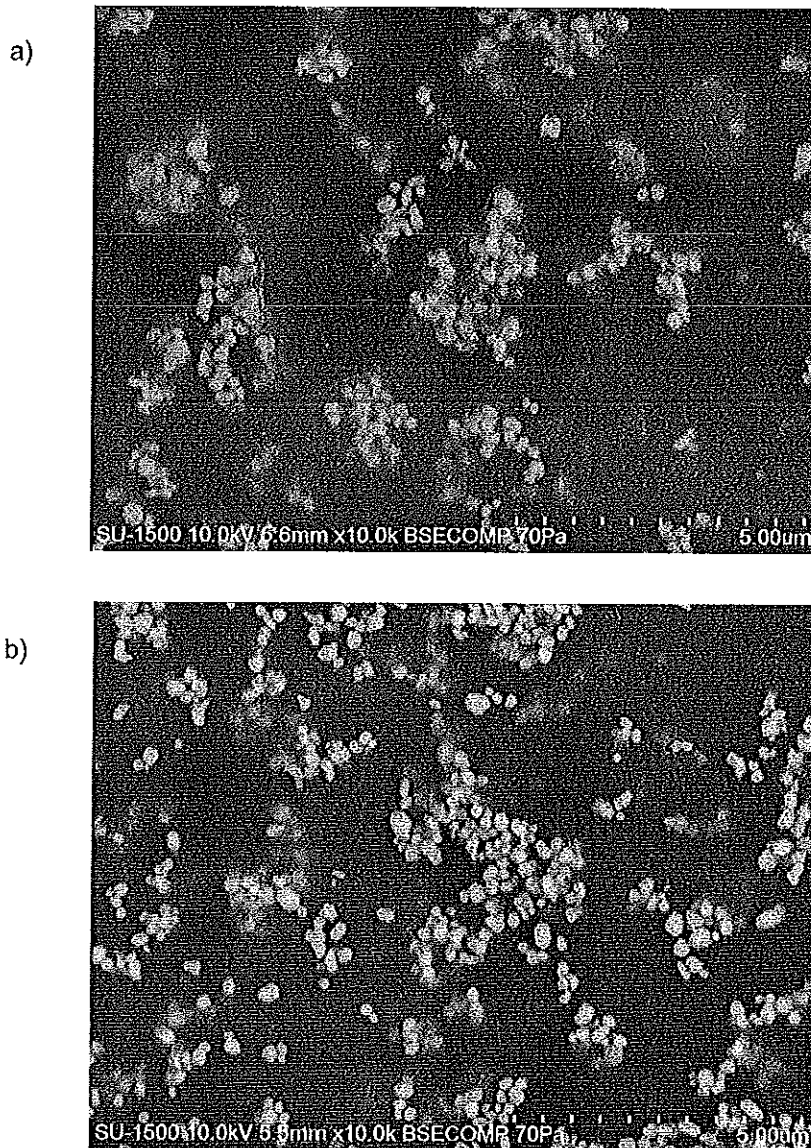
| Composition              |                                          | 300% Modulus (MPa) |           |           | Tensile strength (MPa) |           |           | %Elongation at break |            |            |
|--------------------------|------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|------------|------------|
| HA-latex<br>60%DRC (phr) | TiO <sub>2</sub> 50%<br>dispersion (phr) | T5PEG2             | T5PEG5    | T5PEG10   | T5PEG2                 | T5PEG5    | T5PEG10   | T5PEG2               | T5PEG5     | T5PEG10    |
| 100                      | 10                                       | 0.37±0.03          | 0.39±0.01 | 0.43±0.03 | 2.42±0.18              | 3.15±0.24 | 4.44±0.10 | 1217±31.56           | 1210±26.96 | 1253±12.72 |
| 100                      | 30                                       | 0.42±0.02          | 0.43±0.03 | 0.45±0.01 | 3.40±0.22              | 3.58±0.21 | 4.58±0.16 | 1078±27.86           | 1140±19.32 | 1116±42.13 |
| 100                      | 50                                       | 0.47±0.02          | 0.50±0.02 | 0.51±0.03 | 4.01±0.23              | 4.81±0.26 | 5.03±0.21 | 1111±39.51           | 1061±38.70 | 1058±53.51 |
| 100                      | 70                                       | 0.43±0.03          | 0.60±0.03 | 0.52±0.03 | 5.14±0.27              | 6.77±0.18 | 6.12±0.14 | 1030±25.12           | 983±26.49  | 976±56.80  |

ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> โดยมี PVA เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค

| Composition              |                                          | 300% Modulus (MPa) |           |           | Tensile strength (MPa) |           |           | %Elongation at break |            |            |
|--------------------------|------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|------------|------------|
| HA-latex<br>60%DRC (phr) | TiO <sub>2</sub> 50%<br>dispersion (phr) | T5PVA2             | T5PVA5    | T5PVA10   | T5PVA2                 | T5PVA5    | T5PVA10   | T5PVA2               | T5PVA5     | T5PVA10    |
| 100                      | 10                                       | 0.43±0.03          | 0.40±0.03 | 0.37±0.02 | 2.99±0.22              | 4.76±0.21 | 3.58±0.21 | 1234±49.79           | 1218±38.33 | 1253±58.80 |
| 100                      | 30                                       | 0.53±0.03          | 0.39±0.03 | 0.41±0.02 | 5.14±0.33              | 5.68±0.30 | 4.05±0.30 | 989±58.83            | 1118±53.69 | 1090±69.88 |
| 100                      | 50                                       | 0.53±0.04          | 0.43±0.02 | 0.44±0.03 | 6.12±0.22              | 5.83±0.31 | 4.49±0.34 | 930±34.73            | 989±58.11  | 1033±47.09 |
| 100                      | 70                                       | 0.65±0.03          | 0.54±0.03 | 0.43±0.03 | 6.36±0.51              | 6.11±0.28 | 4.87±0.35 | 851±22.55            | 949±54.66  | 990±28.28  |

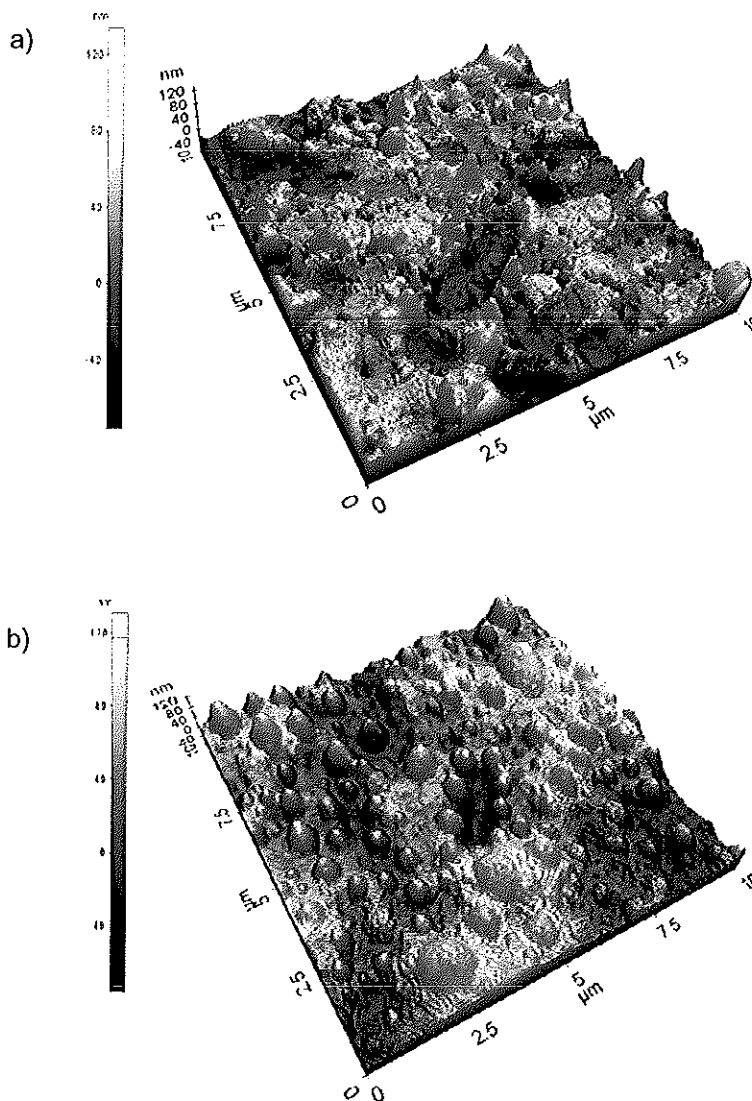
#### 4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาภาพถ่าย SEM และ AFM ของฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติคอมโพสิตด้วยสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  พบว่า การกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ที่ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศเปรียบเทียบกับผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจกมีลักษณะที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร dispersing agent



รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้วัลทามอล เป็น dispersing agent (a) ด้านผิวที่สัมผัสกับอากาศ (b) ด้านผิวที่สัมผัสกับแผ่นกระจก

จากรูปที่ 4.11 พิล์มบางที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้วัลทามอล ทำหน้าที่เป็น dispersing agent จะพบการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  พิล์มด้านที่สัมผัสกับกระจกในปริมาณที่มากกว่าฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศ โดยอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  จะแทรกตัวและถูกปิดทับด้วยฟิล์มบางๆ ของชั้นยาง เช่นเดียวกันกับภาพที่ได้จาก AFM จะเห็นการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนข้างสม่ำเสมอ โดยฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศจะมีค่าความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มด้านที่สัมผัสกับแผ่นกระจก

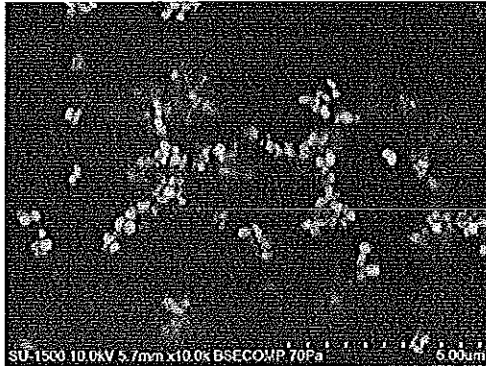


รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มยางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้วัลทามอล เป็น dispersing agent a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

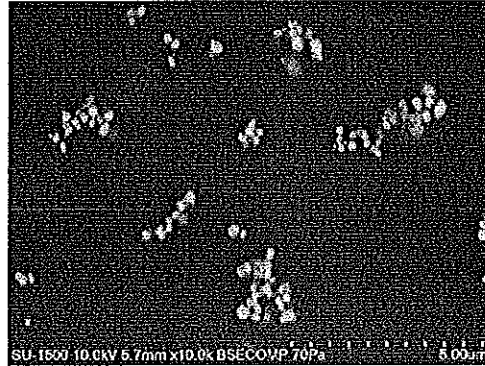
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะพบการจับตัวรวมกลุ่มกันของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  กระจายตัวอยู่บนแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศมากกว่าแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับกระจก เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ได้ไม่ดีเท่ากับการใช้ซิลทามอล ประกอบกับ PEG จะเกิดการแพร่ซึมผ่านไปที่ผิวด้านหน้าของแผ่นฟิล์ม พร้อมทั้งกับการนำพาอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ให้ไปเกาะรวมกลุ่มกันที่ผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ ทำให้พื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับแผ่นกระจกมีความขรุขระน้อยกว่าแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศ จากภาพ AFM ดังแสดงในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวทั้งสองด้าน การแพร่ซึมผ่านของ PEG บางส่วนจากแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับแผ่นกระจก ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กบนแผ่นฟิล์ม หากทำการผสม PEG ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะไม่พบการพ่นตัวบนแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับกระจก เนื่องจากสารละลาย PEG ที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการแยกตัวเมื่อผสมเข้ากับน้ำยางเพราะเข้าผสมกับน้ำยางได้ยาก



a) NR-T5PEG02-50

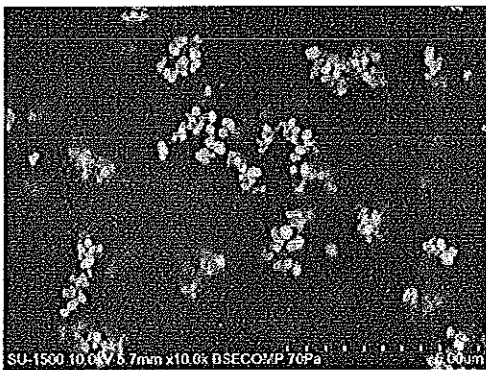


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

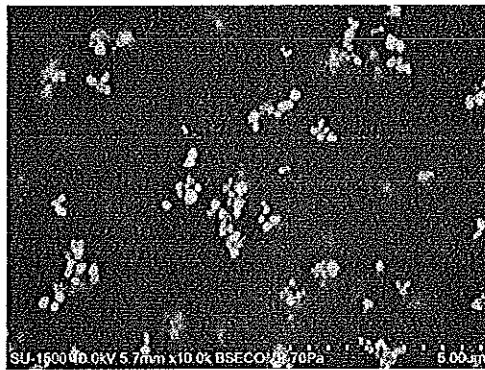


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

b) NR-T5PEG05-50

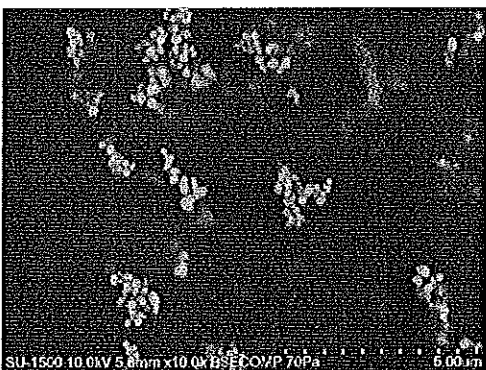


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

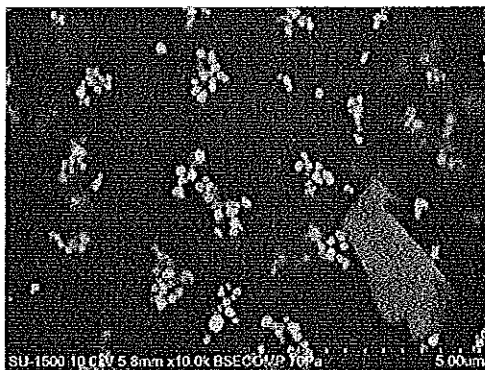


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

c) NR-T5PEG10-50



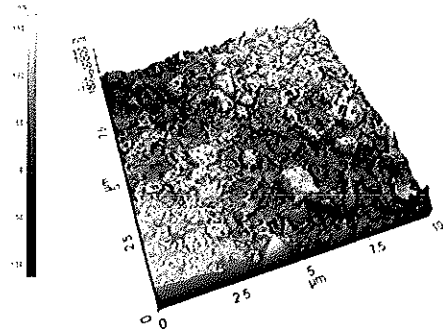
ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



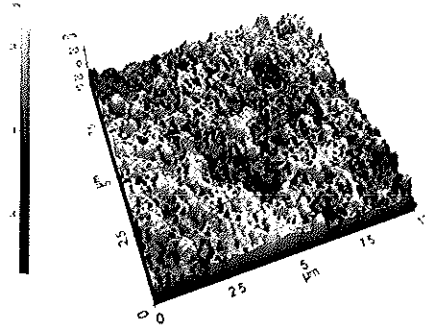
ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PEG เป็น dispersing agent เป็นปริมาณ a) 0.09, b) 0.20 และ c) 0.40% โดยน้ำหนัก

a) NR-T5PEG02-50

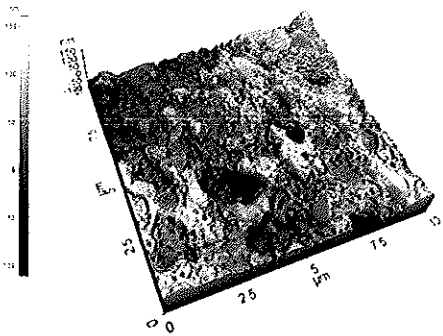


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

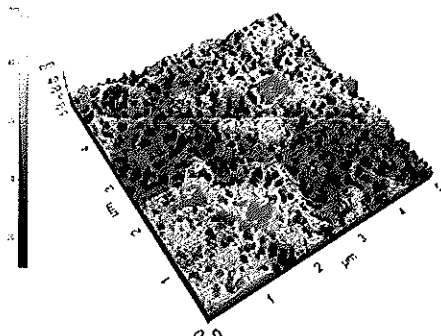


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

b) NR-T5PEG05-50

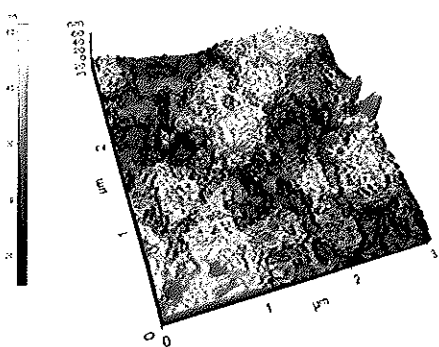


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

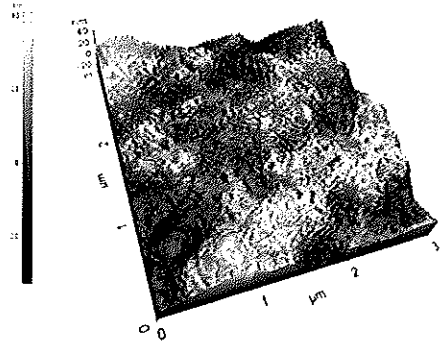


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

c) NR-T5PEG10-50



ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

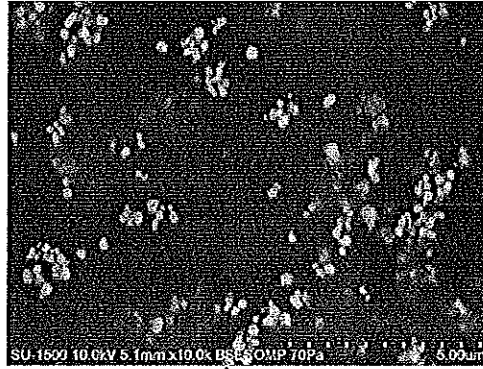
รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มยางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PEG เป็น dispersing agent เป็นปริมาณ a) 0.09, b) 0.20 และ c) 0.40% โดยน้ำหนัก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PVA ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะพบการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่เกาะรวมกลุ่มกัน กระจายอยู่บนแผ่นฟิล์มทั้งสองด้าน และมีปริมาณลดน้อยลงเมื่อผสม PVA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  ในน้ำยาคอมปาวด์ทำให้ปริมาณ  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นฟิล์มที่ได้ลดน้อยลง เช่นเดียวกันกับภาพพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่ได้จาก AFM ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มทั้งสองด้านมีลักษณะที่คล้ายกัน มีค่าความขรุขระที่ต่ำกว่าการผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent

a) NR-T5PVA02-50

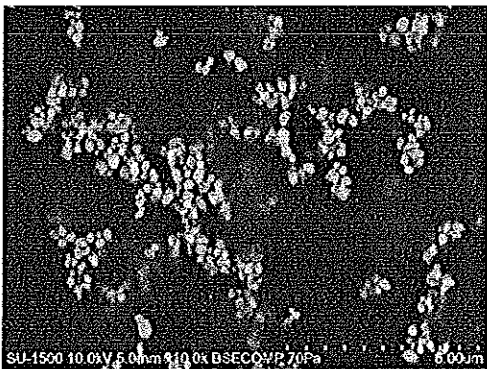


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

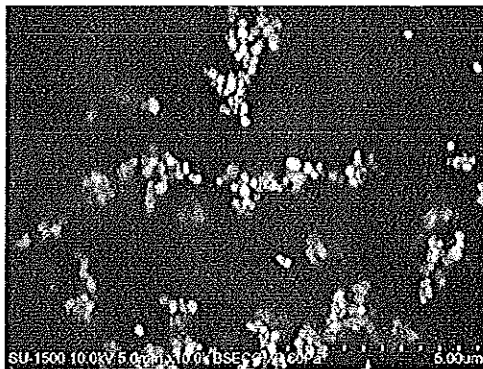


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

b) NR-T5PVA05-50



ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

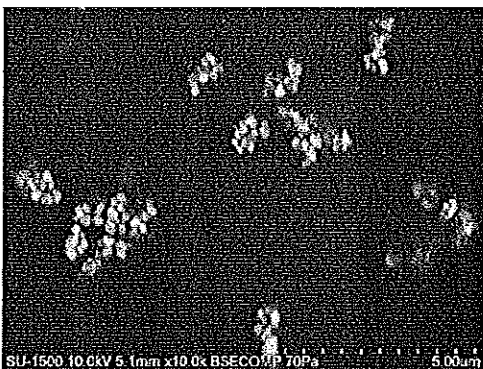


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

c) NR-T5PVA10-50



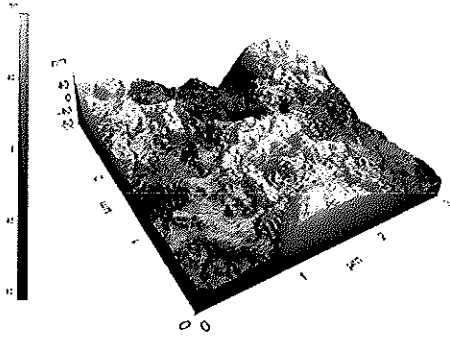
ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



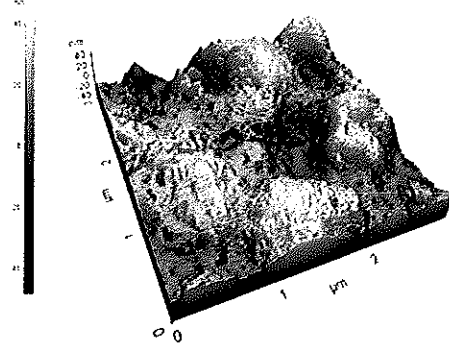
ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PVA เป็น dispersing agent เป็นปริมาณ a) 0.09, b) 0.20 และ c) 0.40% โดยน้ำหนัก

a) NR-T5PVA02-50

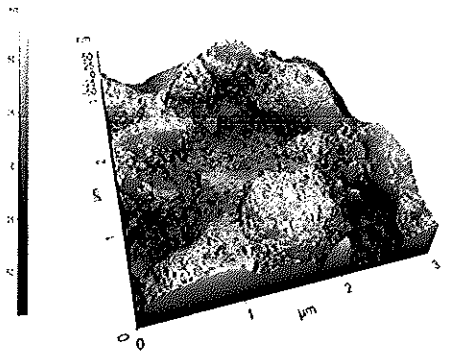


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

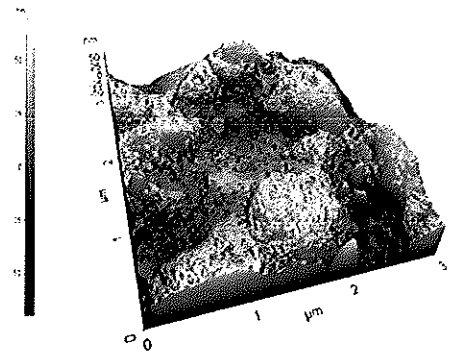


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

b) NR-T5PVA05-50

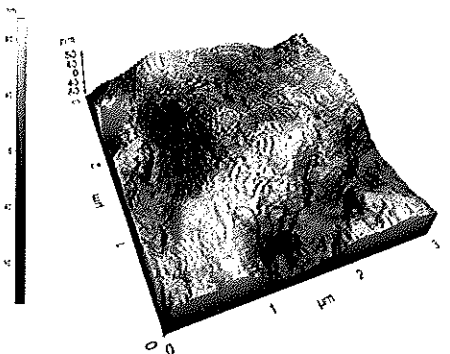


ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

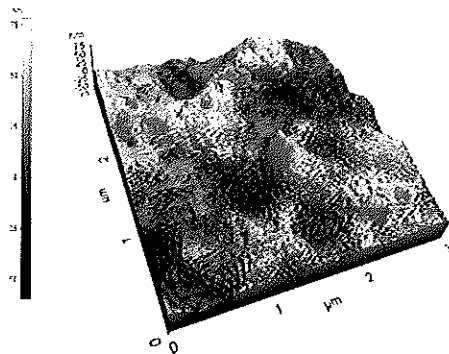


ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

c) NR-T5PVA10-50



ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



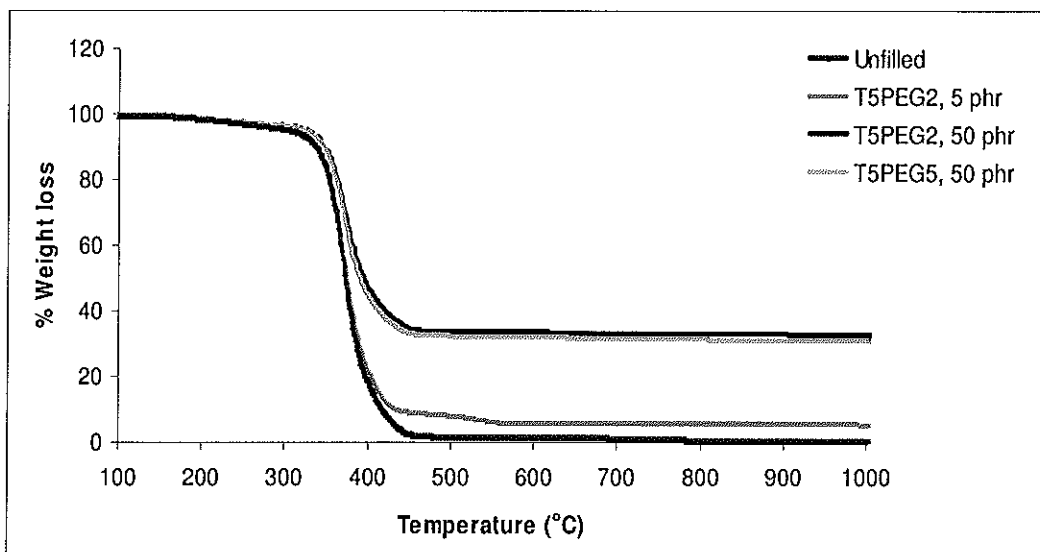
ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มยางผสมกับสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ใช้ PVA เป็น dispersing agent เป็นปริมาณ a) 0.09, b) 0.20 และ c) 0.40% โดยน้ำหนัก

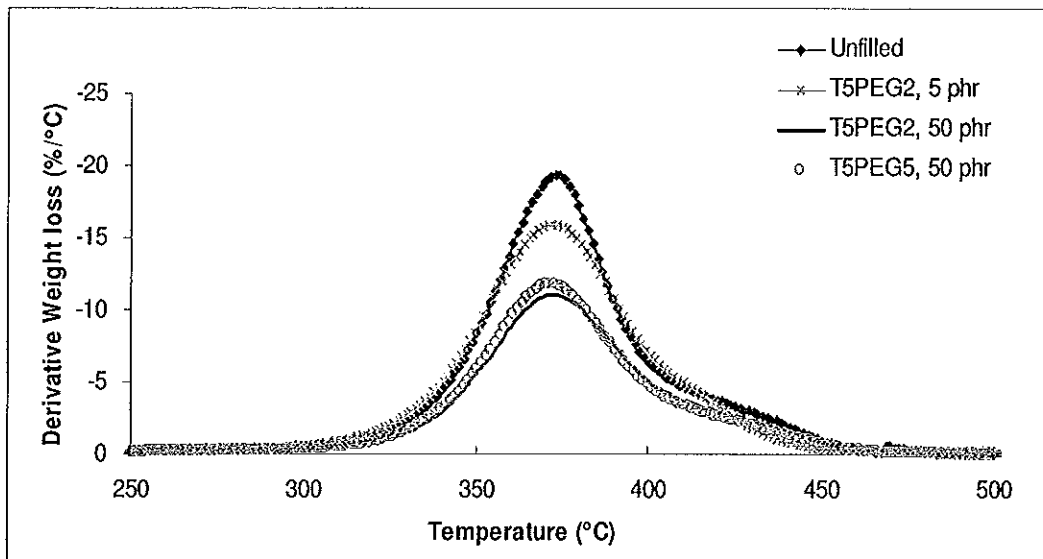
ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ความเข้มข้น 0.09 และ 0.20% โดยน้ำหนัก ผสมเข้ากับสูตรน้ำยางในปริมาณ 50 phr เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะตามที่ต้องการสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านเทคโนโลยี เมมเบรน

#### 4.2.1.3 องค์ประกอบของแผ่นฟิล์มบางคอมโพสิตด้วย $\text{TiO}_2$

จากการศึกษาปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ในแผ่นฟิล์มบางคอมโพสิต โดยเทคนิค TGA ได้เทอร์โมแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงการหายไปขององค์ประกอบจากการที่ถูกเผาทำให้เกิดการแตกออกของส่วนต่างๆ (decomposition) ที่อุณหภูมิ 350-400 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าองค์ประกอบที่เหลืออยู่คือ ปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ที่ผสมเข้ากับสูตรน้ำยางธรรมชาติ เมื่อทำการผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  เข้ากับน้ำยางธรรมชาติปริมาณ 50 phr เกิดการหายไปของปริมาณ  $\text{TiO}_2$  บางส่วน เนื่องจากความไม่เสถียรของสารแขวนลอย หรือเกิดการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  ที่เกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มในน้ำยางคอมพาวด์ ปริมาณสูงสุดของ  $\text{TiO}_2$  ที่สามารถผสมเข้ากับน้ำยางธรรมชาติได้ ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.17 TGA thermogram ของ NR- $\text{TiO}_2$



รูปที่ 4.18 DTG thermogram ของ NR-TiO<sub>2</sub>

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการหายไปขององค์ประกอบต่างๆ ใน NR-TiO<sub>2</sub>

| ปริมาณ TiO <sub>2</sub> | % Weight loss   |                  | % Residue |
|-------------------------|-----------------|------------------|-----------|
|                         | T <sub>d1</sub> | T <sub>d10</sub> |           |
| Unfilled                | 176.77          | 337.12           | 0.13      |
| T5PEG2, 5 phr           | 183.29          | 337.52           | 5.09      |
| T5PEG2, 50 phr          | 183.39          | 346.99           | 32.65     |
| T5PEG5, 50 phr          | 195.09          | 345.20           | 30.94     |

T<sub>d1</sub> = 1%wt ของยางคอมปาวด์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

T<sub>d10</sub> = 10%wt ของยางคอมปาวด์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

#### 4.3 ผลของการปรับปรุงสมบัติของ NR-TiO<sub>2</sub>

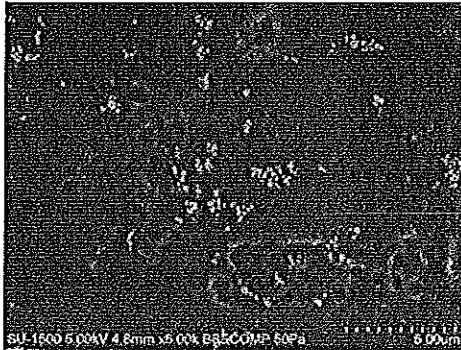
##### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เตรียมน้ำยางคอมปาวด์ โดยใช้สารแขวนลอย T5PEG2, T5PEG5, T5PVA2 และ T5PVA5 ที่กัมมันต์ 1 phr และตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5 phr ซึ่งทำการเตรียมบนแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อทำการวัดด้วย SEM แล้วทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60, 100 และ 150 °C

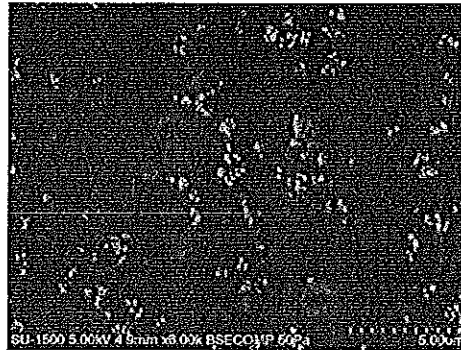
จากการพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °C การกระจายตัวของสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> จะมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์และขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 100 °C และ 150 °C ตามลำดับ



a) อบที่อุณหภูมิ 60 °C

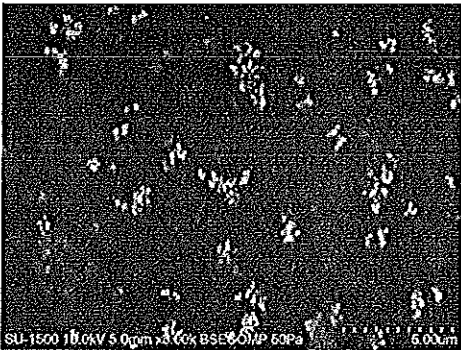


NRT5PG2\_S10\_Z05

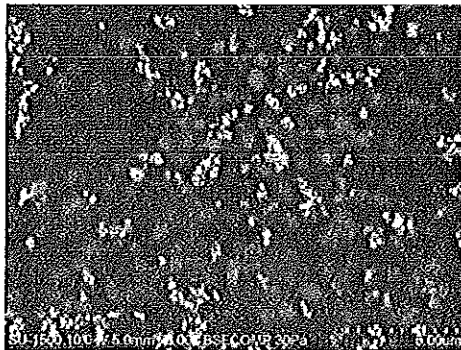


NRT5PG5\_S10\_Z05

b) อบที่อุณหภูมิ 100 °C

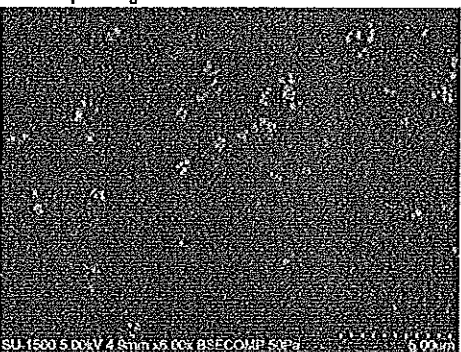


NRT5PG2\_S10\_Z05

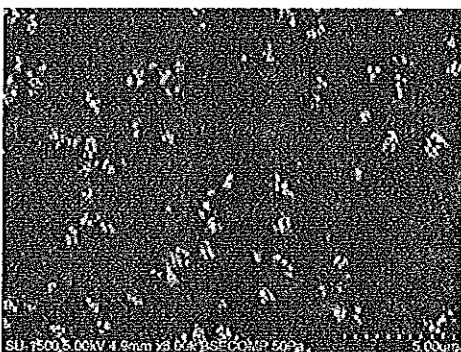


NRT5PG5\_S10\_Z05

c) อบที่อุณหภูมิ 150 °C

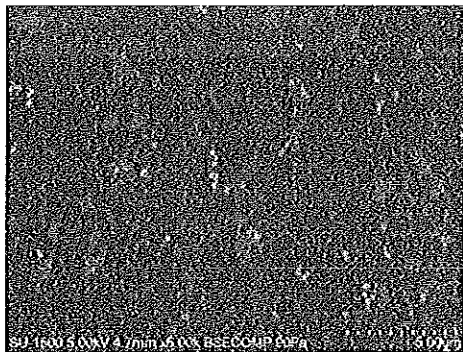


NRT5PG2\_S10\_Z05



NRT5PG5\_S10\_Z05

รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางคอมปาวด์ที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PEG เป็น dispersing agent ผ่านการอบที่อุณหภูมิ a) 60 °C, b) 100 °C และ c) 150 °C



NRT5PA2\_S10\_Z05



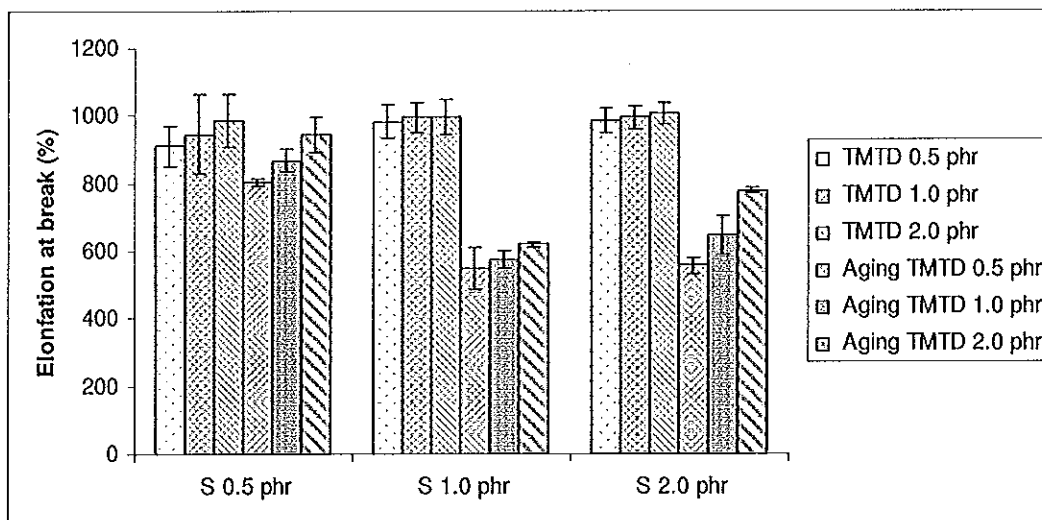
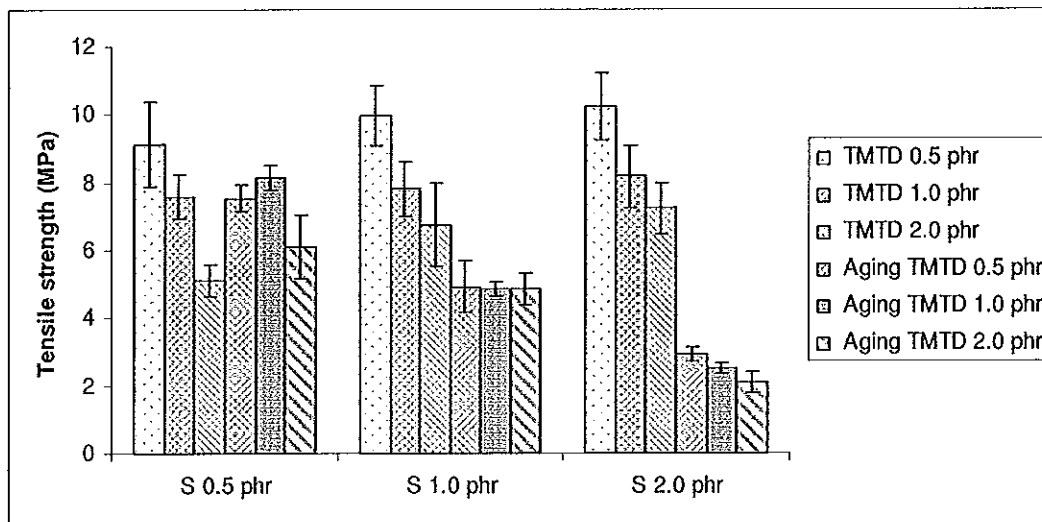
NRT5PA5\_S10\_Z05

รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มยางคอมปาวด์ที่ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PVA เป็น dispersing agent ผ่านการอบที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^\circ\text{C}$

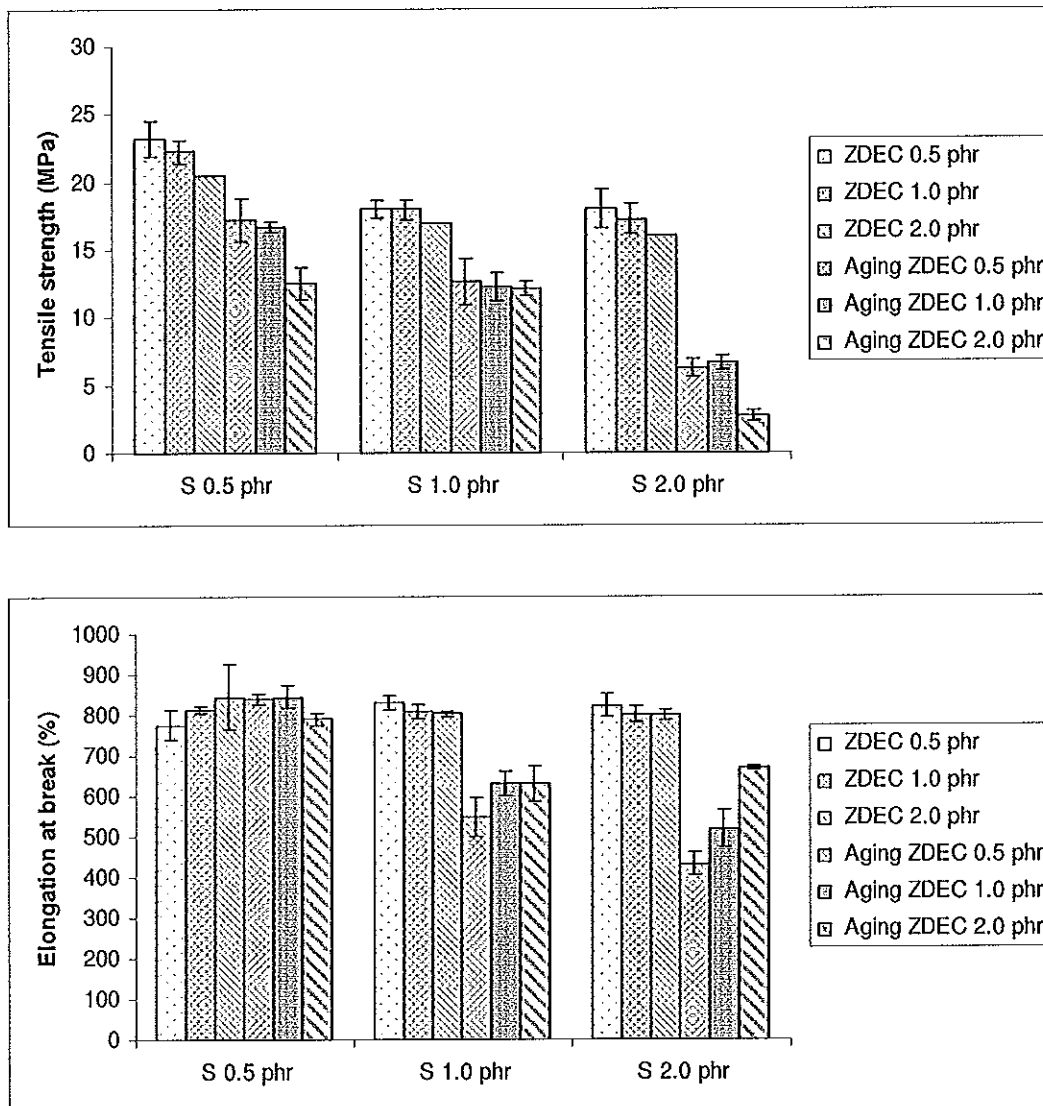
#### 4.3.2 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเร่ง และกำมะถัน

##### 4.3.2.1 สมบัติเชิงกล

สมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break ของน้ำยางธรรมชาติ ที่ T5PEG2 ผสมกับกำมะถันและสารตัวเร่ง TMTD แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่า การผสมกำมะถัน ต่างๆ กัน ไม่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break แต่พบว่า การเติมสารตัวเร่ง TMTD ในน้ำยางคอมปาวด์ในปริมาณที่มาก ส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อ Elongation at break โดยภายหลังการบ่มเร่งที่  $100\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม. พบว่า สมบัติความทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณกำมะถันมากขึ้น อาจเนื่องจากเมื่อปริมาณกำมะถันมากขึ้น เกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบ polysulphide ซึ่งมีพลังงานพันธะน้อย จึงเสื่อมสภาพเมื่อบ่มเร่งด้วยความร้อน

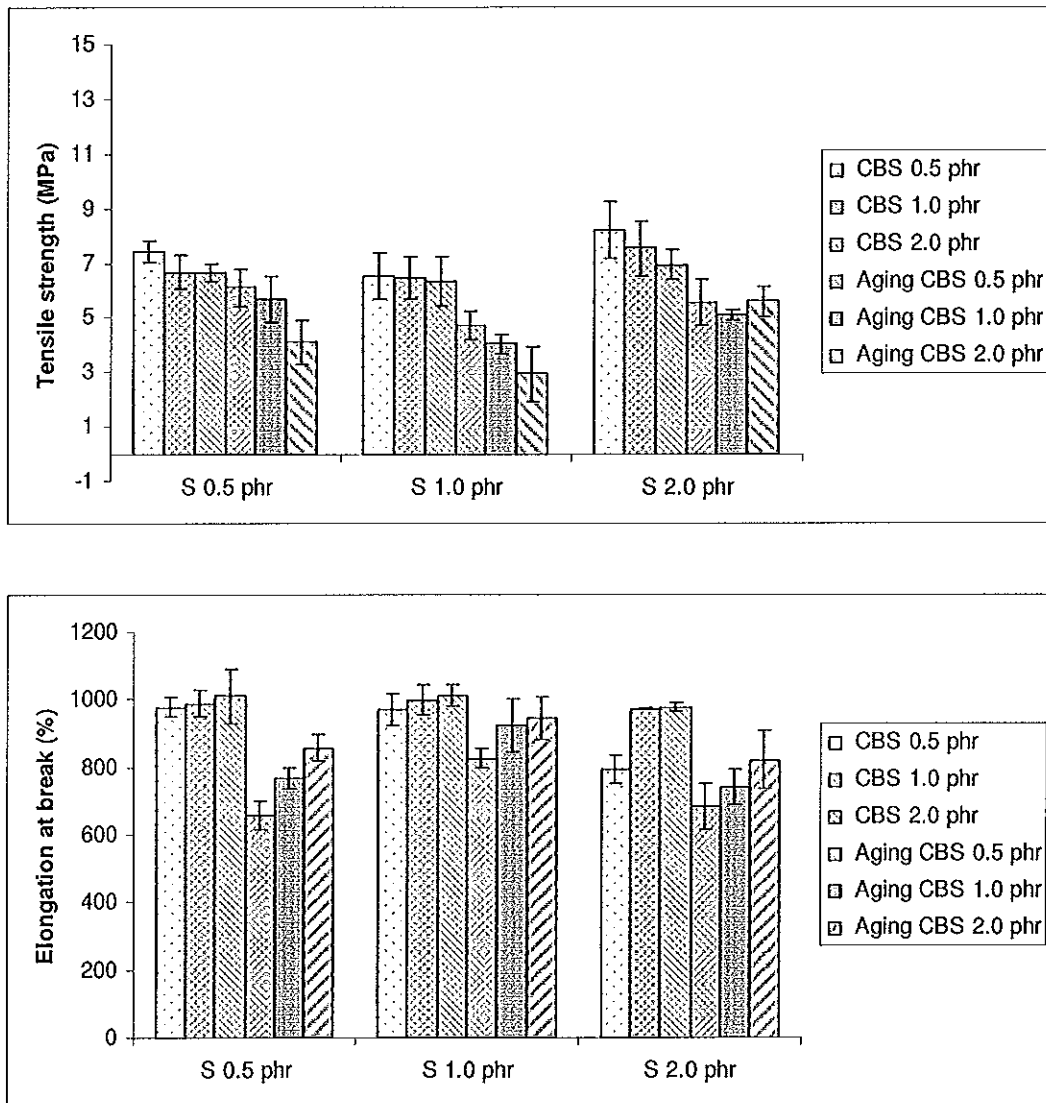


รูปที่ 4.21 ผลปริมาณสารตัวเร่ง TMTD และกำหนดต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ผสมสาร  
แขนอลอย T5PEG2



รูปที่ 4.22 ผลปริมาณสารตัวเร่ง ZDEC และกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ผสมสาร  
แขนอลอย T5PEG2

อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง ZDEC แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า สารตัวเร่ง ZDEC ที่เติมลงไปมีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break ก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนภายหลังการบ่มเร่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการบ่มเร่ง TMTD

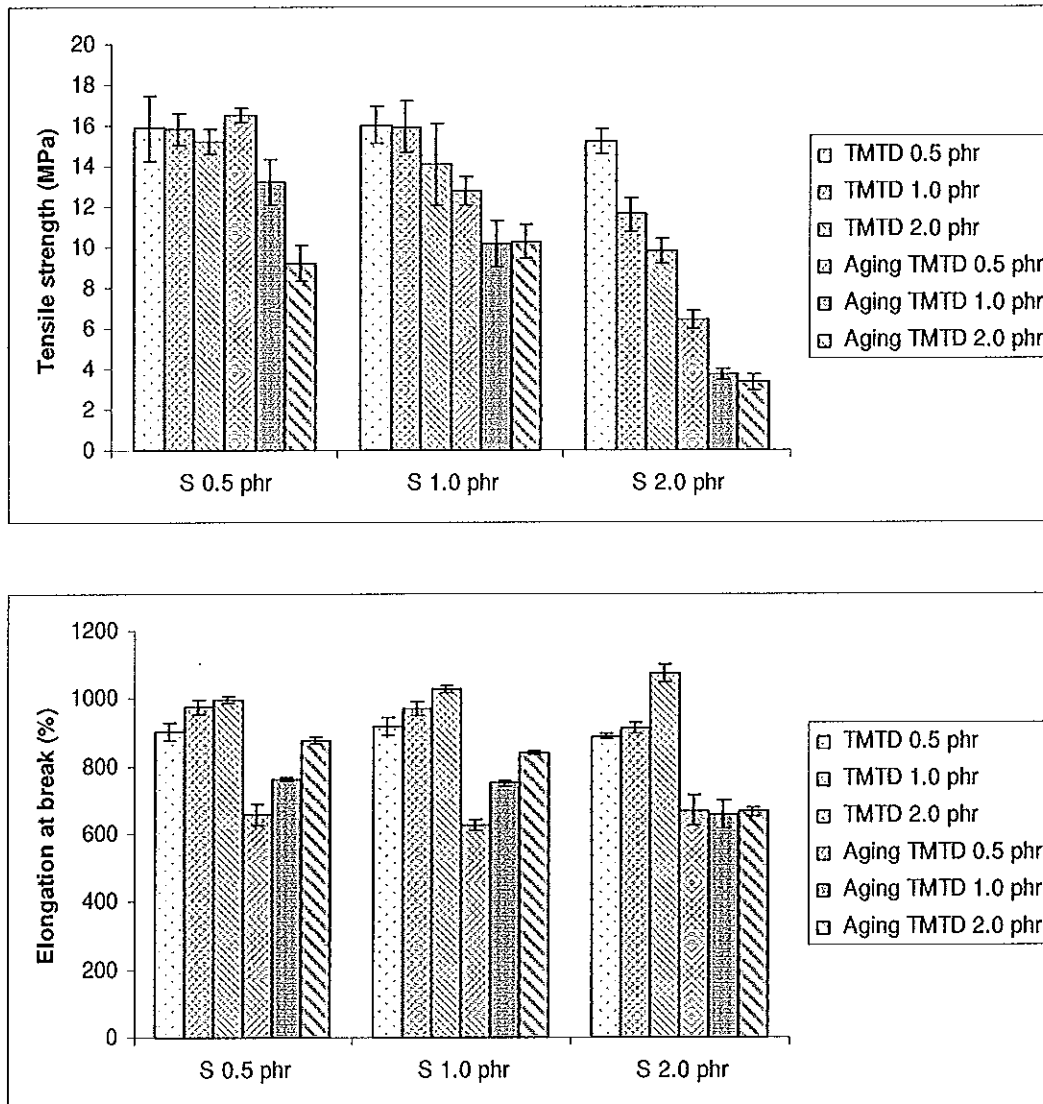


รูปที่ 4.23 ผลปริมาณสารตัวเร่ง CBS และกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG2

อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง CBS แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่ง CBS มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break เล็กน้อยเช่นเดียวกับภายหลังการบ่มเร่ง

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของกำมะถันและชนิดสารตัวเร่งที่เติมลงไปใ้ในน้ำยางคอมปาวด์ พบว่า ชนิดของสารตัวเร่งมีอิทธิพลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงอย่างมาก โดยการเติมสารตัวเร่ง ZDEC ลงในน้ำยางส่งผลให้ฟิล์มยางมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด เนื่องจาก ZDEC เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไดโทไอคาร์บาเมท ซึ่งช่วยเร่งให้ยาง cure ได้เร็วมาก รองลงมา

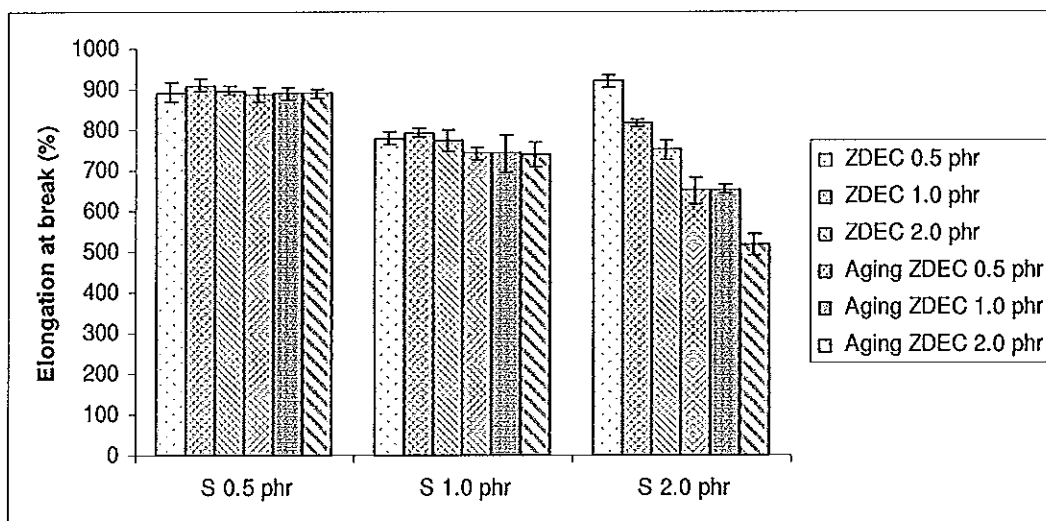
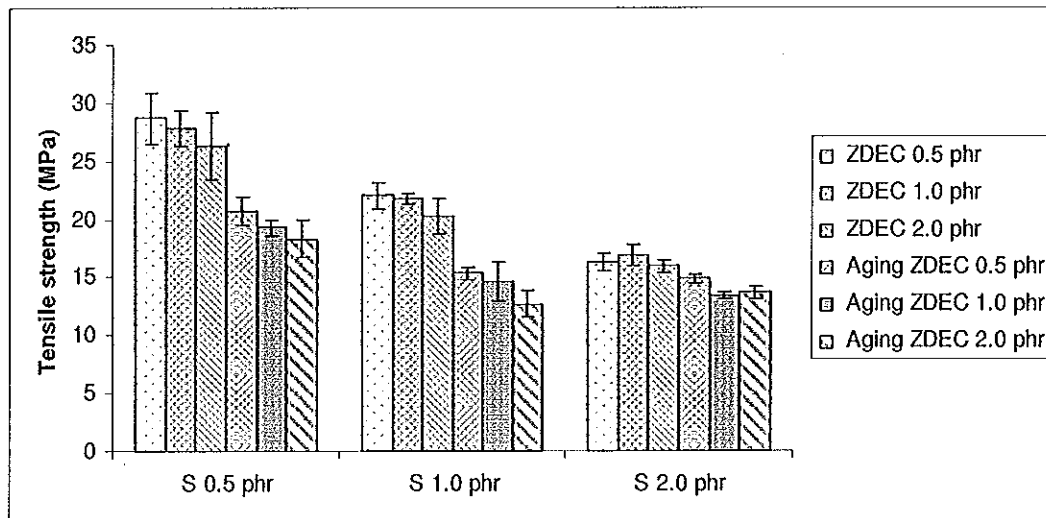
TMTD ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่่มไทูแรม ซึ่ง cure ช้ากว่าสารตัวเร่งในกลุ่่มไดโทโอคาร์บาเมท เล็กน้อยและ CBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่่มซัลฟิโนไซด์ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่กระตุ้นให้ ปฏิกิริยาของรูปเกิด จึงส่งผลให้ฟิล์มยางมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำสุด แต่ปริมาณกำมะถันที่เติม ลงไปแทบจะไม่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break



รูปที่ 4.24 ผลปริมาณสารตัวเร่ง TMTD และกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มยางที่ผสมสาร แวนลอย T5PEG5

สมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break ของน้ำยางธรรมชาติที่ T5PEG5 ผสมกำมะถันและสารตัวเร่ง TMTD แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ฟิล์มยางที่ผสม

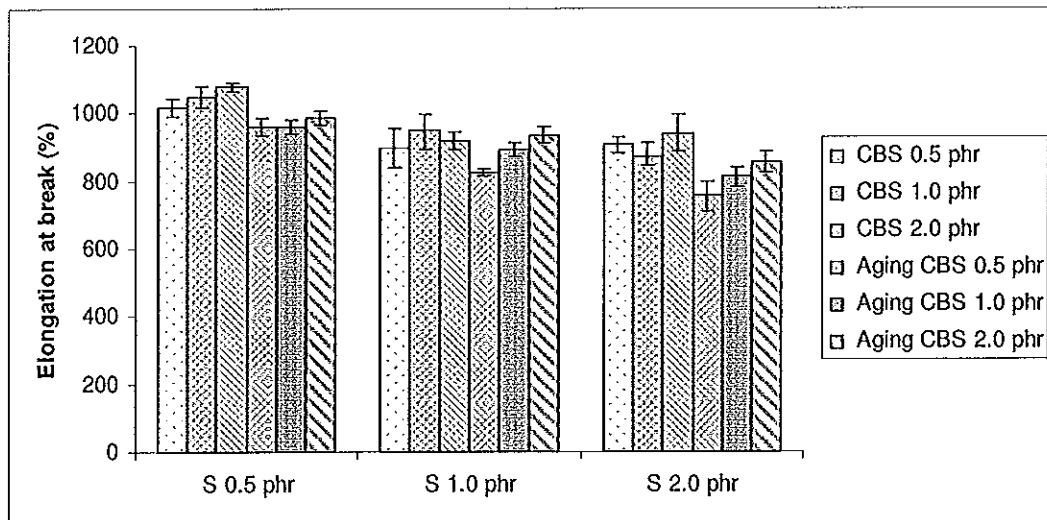
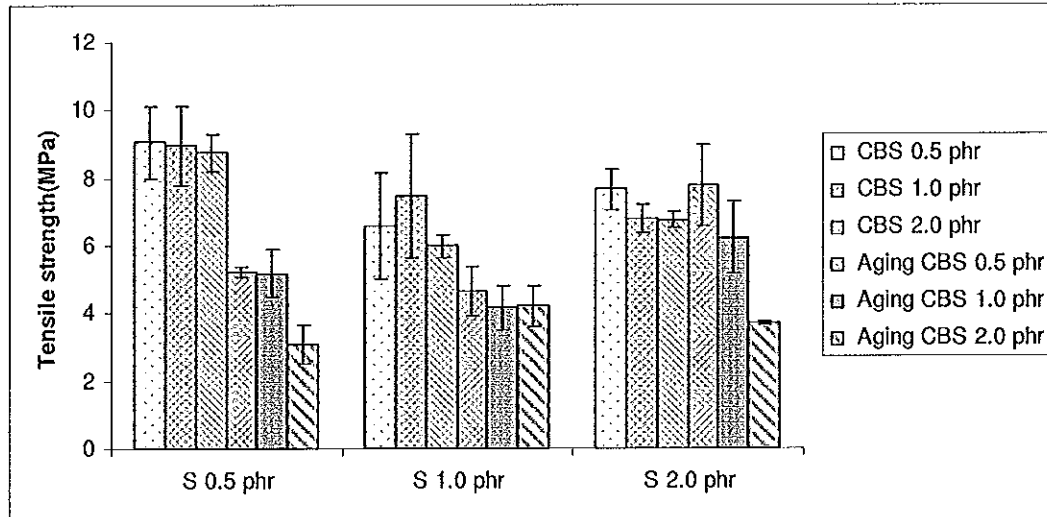
กำมะถันและ TMTD ปริมาณ 0.5 และ 1.0 phr มีค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่หลังจากเพิ่มกำมะถันเป็น 2 phr พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง เมื่อปริมาณ TMTD มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองทั้งก่อนและหลังการปมเร่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ส่วน Elongation at break มีค่าใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังการปมเร่ง



รูปที่ 4.25 ผลปริมาณสารตัวเร่ง ZDEC และกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ผสมสาร  
แขวนลอย T5PEG5

อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง ZDEC แสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า สมบัติความทนต่อแรงดึงขึ้นกับปริมาณกำมะถัน โดยที่ปริมาณกำมะถันมากขึ้นทำให้ค่าความทนต่อ

แรงดึงลดลง ส่วนปริมาณกำมะถันที่เติมลงไป มีผลต่อสมบัตินี้น้อย ส่วน Elongation at break มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน



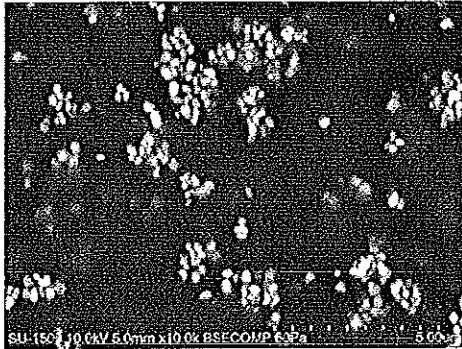
รูปที่ 4.26 ผลปริมาณสารตัวเร่ง CBS และกำมะถันต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ผสมสารแว่นลอย T5PEG5

อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง CBS แสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า ฟิล์มบางที่ผสมกำมะถัน และ CBS ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของกำมะถันและชนิดของสารตัวเร่งที่เติมลงไปใ้ในน้ำยางคอมปาวด์ พบว่า ชนิดสารตัวเร่งมีอิทธิพลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงอย่างมาก โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ T5PEG2

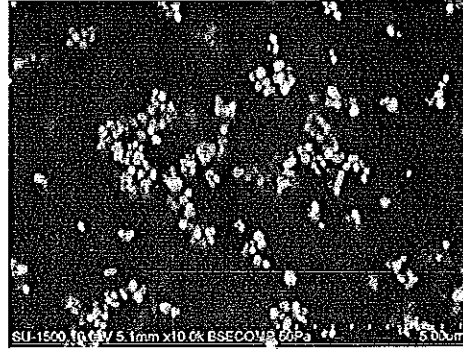


#### 4.3.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

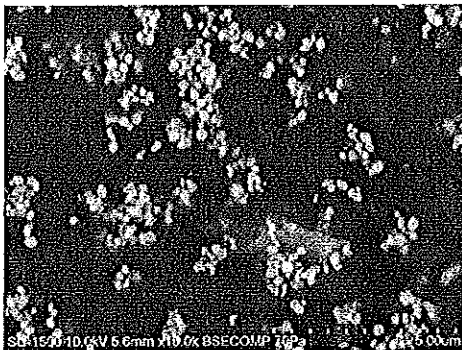
เตรียมน้ำยางคอมปาวด์ โดยทำการเปรียบเทียบสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่กัมมันต์ 1 phr และตัวเร่ง ZDEC, TMTD และ CBS ที่ 0.5 phr แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางและทำการศึกษาด้วยเครื่อง SEM ในรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



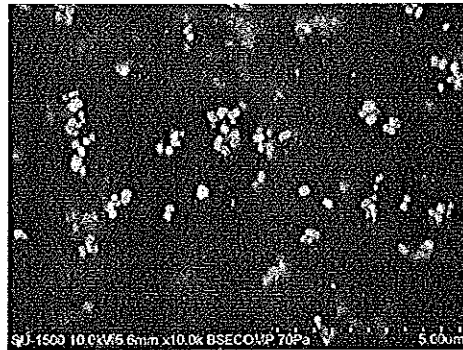
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระຈก



T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

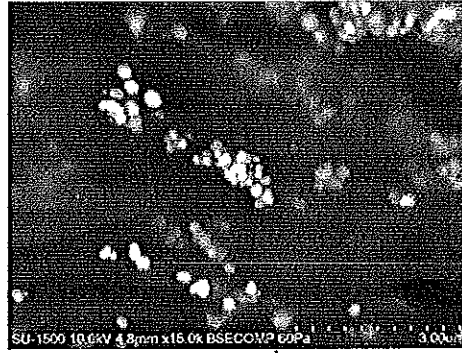


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระຈก

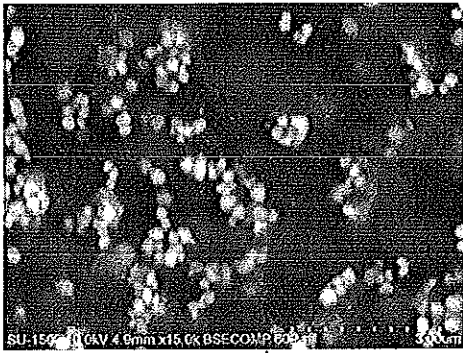
รูปที่ 4.27 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr



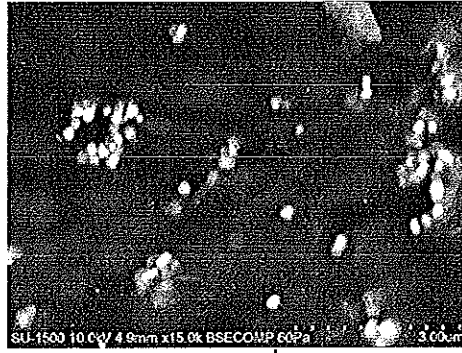
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก



T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

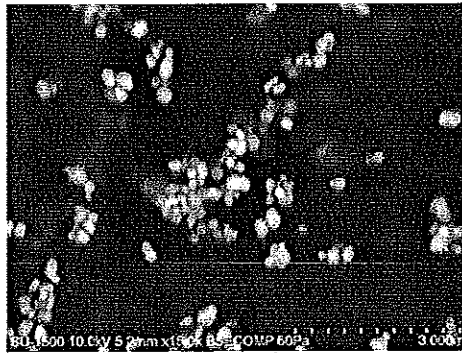


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

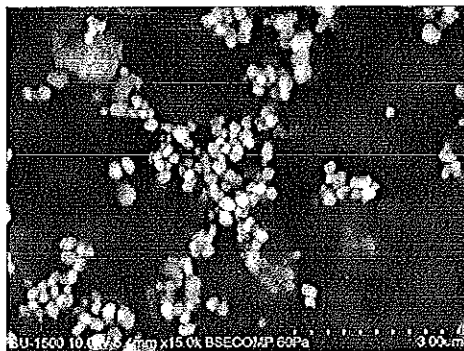
รูปที่ 4.28 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง TMTD 0.5 phr



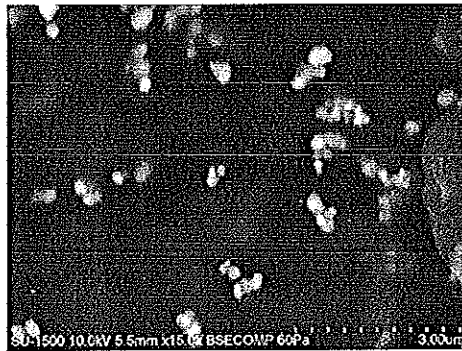
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก



T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

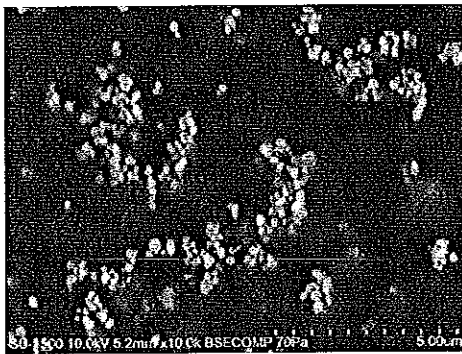


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง CBS 0.5 phr

เตรียมหน้ายางคอมปาวด์ดังตารางที่ 3.5 โดยทำการเปรียบเทียบสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ก่มาถัน 1 phr และตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางและทำการศึกษาด้วยเครื่อง AFM และ SEM

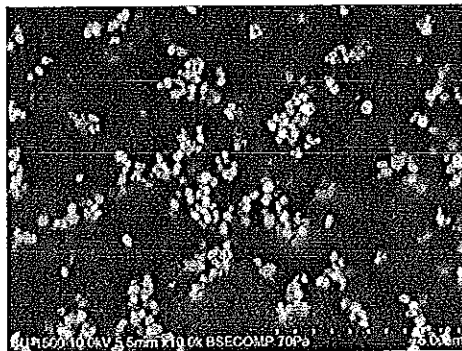
จากการพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> ยังมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนซึ่งผิวด้านบนที่สัมผัสกับกระจกจะมีการกระจายตัว และเห็นได้ชัดเจนมากกว่าผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (AFM) ในรูปที่ 4.32, 4.33 และ 4.34 จะเห็นว่าอนุภาคสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> ที่ด้านผิวหน้าที่สัมผัสกับกระจกจะเห็นได้ชัดเจนกว่าอีกด้าน ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM แต่จะเห็นผิวหน้าของฟิล์มบางมีลักษณะขรุขระและเกิดช่องว่างของผิวแผ่นฟิล์มบาง โดยผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจกจะเกิดรูพรุนมากกว่าผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



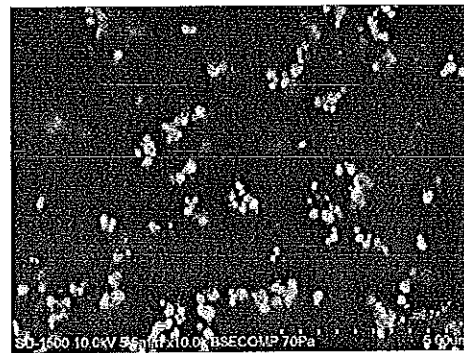
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

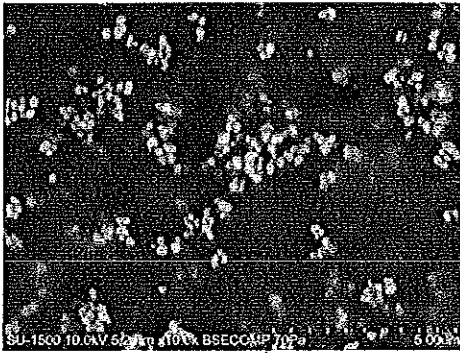


T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

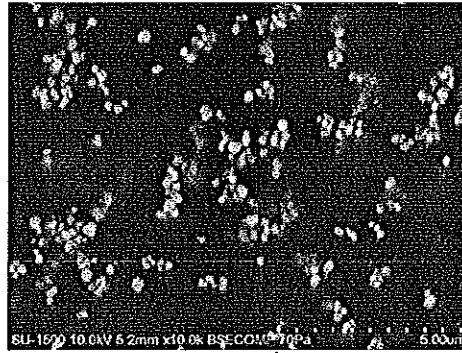


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

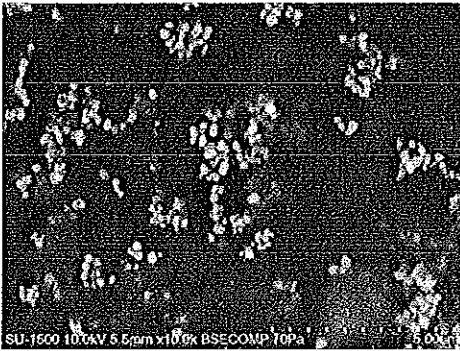
รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr



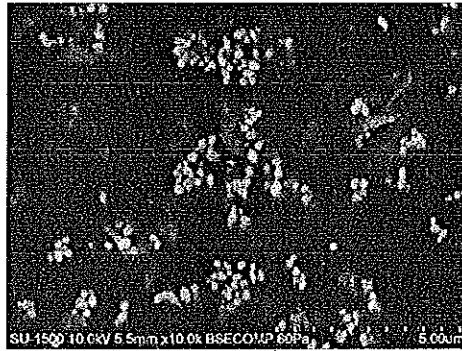
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

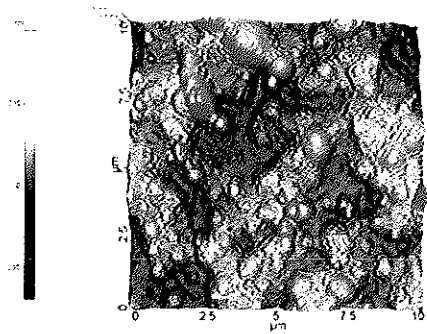


T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

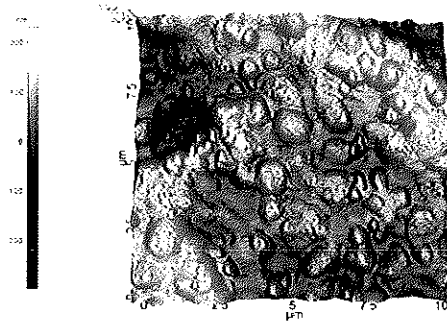


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

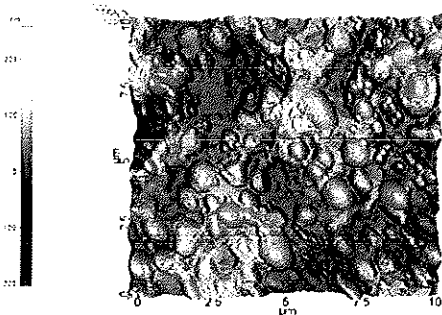
รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr



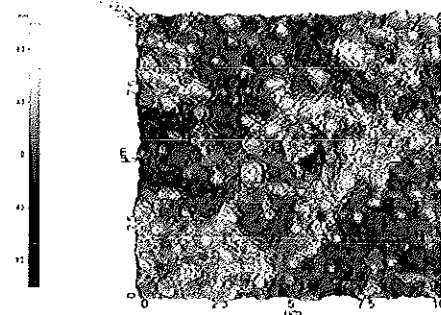
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

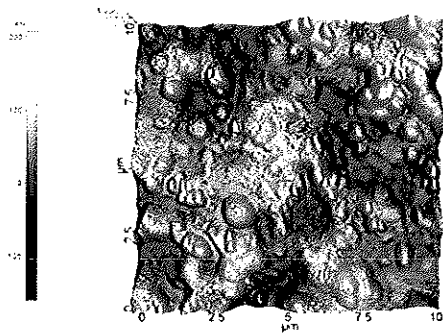


T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

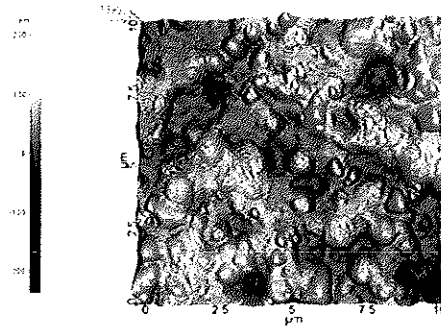


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

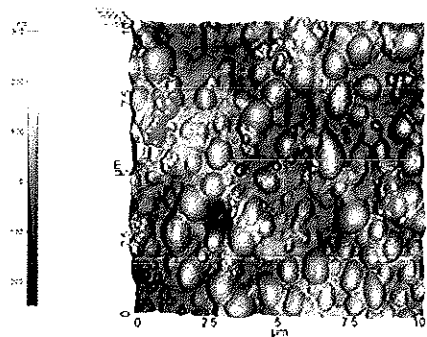
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr



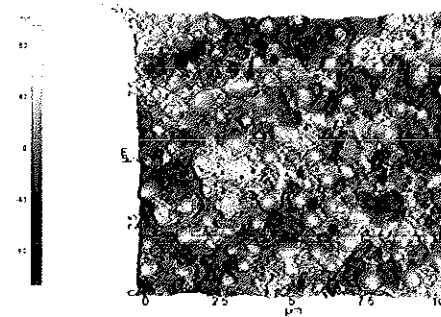
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

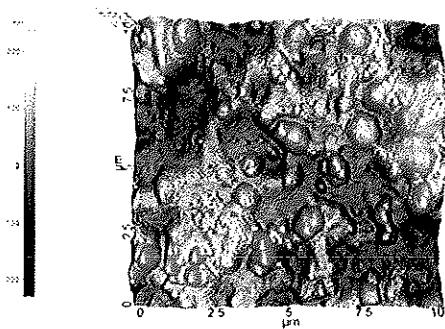


T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ

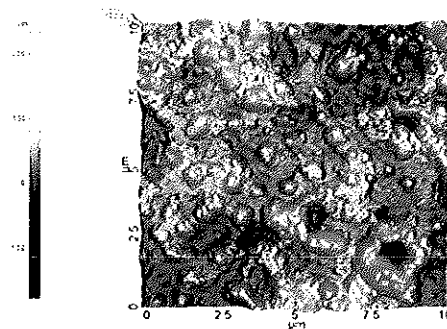


T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

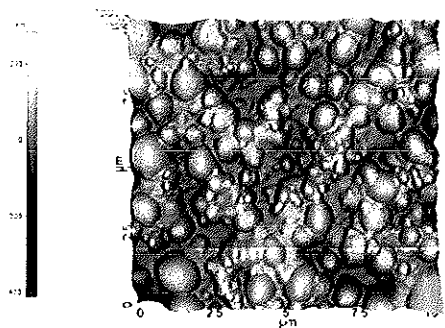
รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr



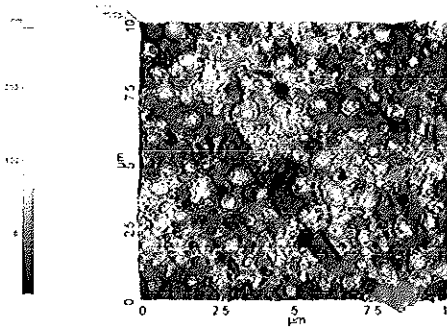
T5PEG2, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



T5PEG2, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก



T5PEG5, ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ



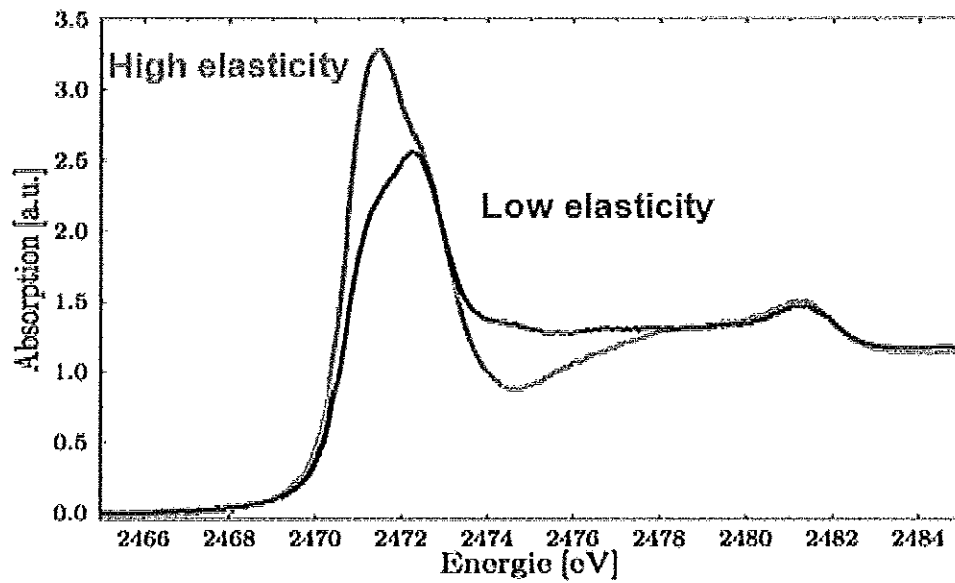
T5PEG5, ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

รูปที่ 4.34 ภาพถ่าย AFM ของฟิล์มบาง NR-TiO<sub>2</sub> ที่ผสมสารตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr

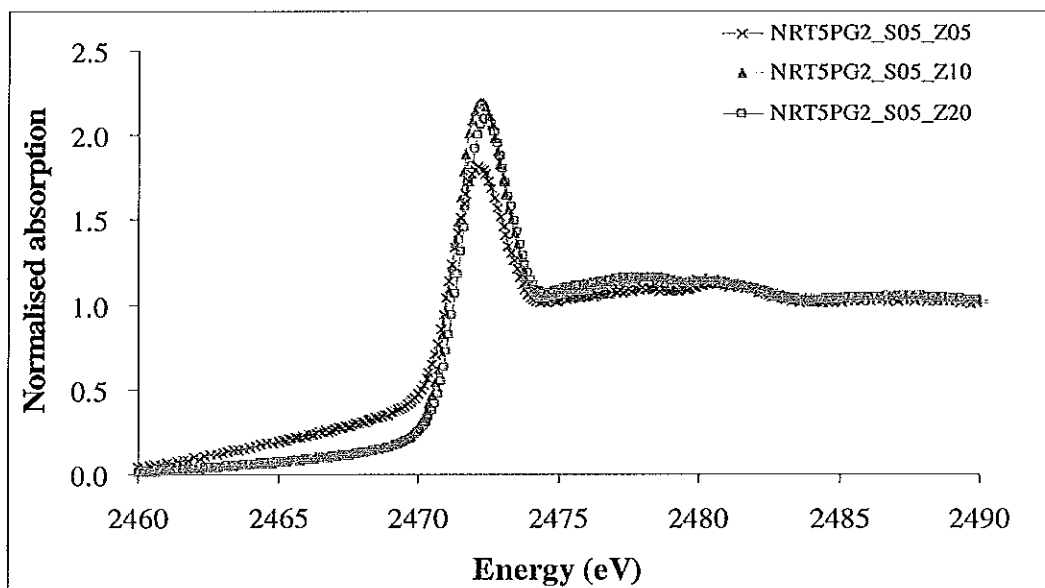
#### 4.3.2.3 ลักษณะของพันธะเชื่อมโยง

จากการศึกษาถึงผลของปริมาณของสารตัวเร่ง ZDEC ต่อลักษณะการเกิดพันธะเชื่อมโยงโดยที่ปริมาณก่ามะถันคงที่ที่ 0.5 phr ซึ่งจากการสังเกตกราฟ XANES ดังแสดงในรูปที่ 4.36 นั้นพบว่าปรากฏให้ที่ตำแหน่งพลังงาน 2472.4 eV และมีแนวโน้ม shift ไปทางด้านระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง ZDEC แสดงถึงการเกิดพันธะการเชื่อมเพิ่มขึ้นในส่วนของพันธะ disulfidic crosslink (Modrow et al., 1996) เป็นผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรูปที่ 4.35 หากกราฟมีการ shift ไปทางด้านระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าค่า Elongation at break ลดลงทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่วิเคราะห์ได้เช่นเดียวกัน





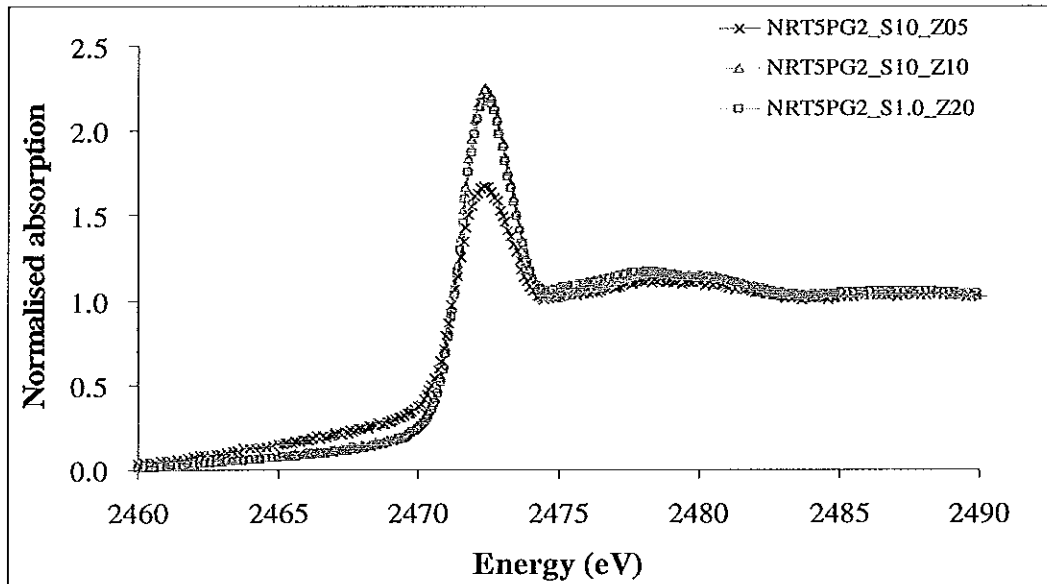
รูปที่ 4.35 การศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันโดยเทคนิคซินโครตรอน



รูปที่ 4.36 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr

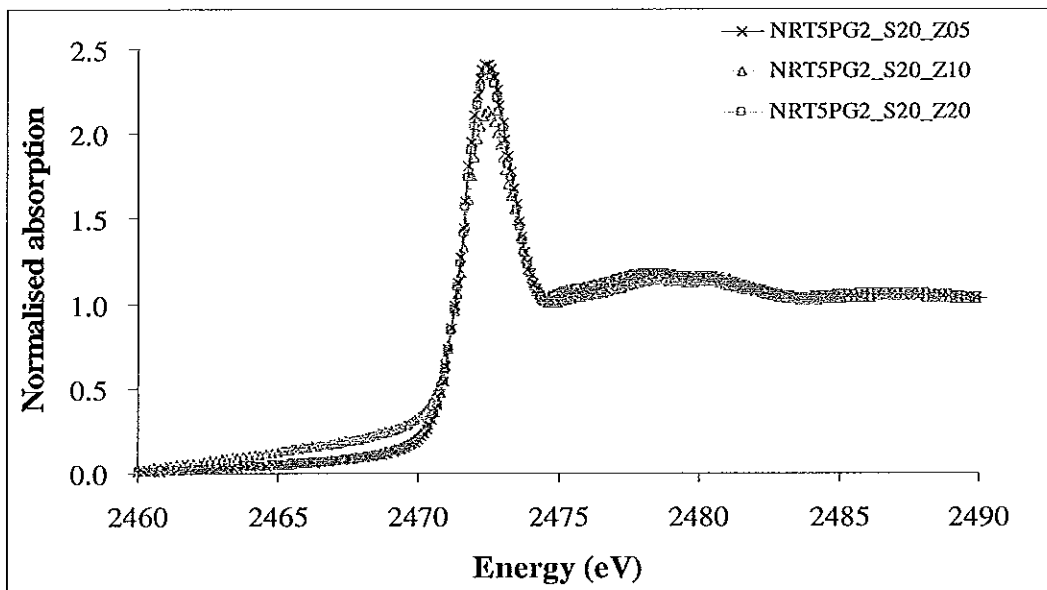
จากการศึกษาถึงผลของปริมาณของสารตัวเร่ง ZDEC ต่อลักษณะการเกิดพันธะเชื่อมโยงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันให้คงที่ที่ 1.0 phr ซึ่งจากการสังเกตกราฟ XANES

ดังแสดงในรูปที่ 4.37 นั้นพบว่าปรากฏให้ที่ตำแหน่งพลังงาน 2472.4 eV และมีแนวโน้ม shift ไปทางด้านระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง ZDEC เช่นเดียวกัน



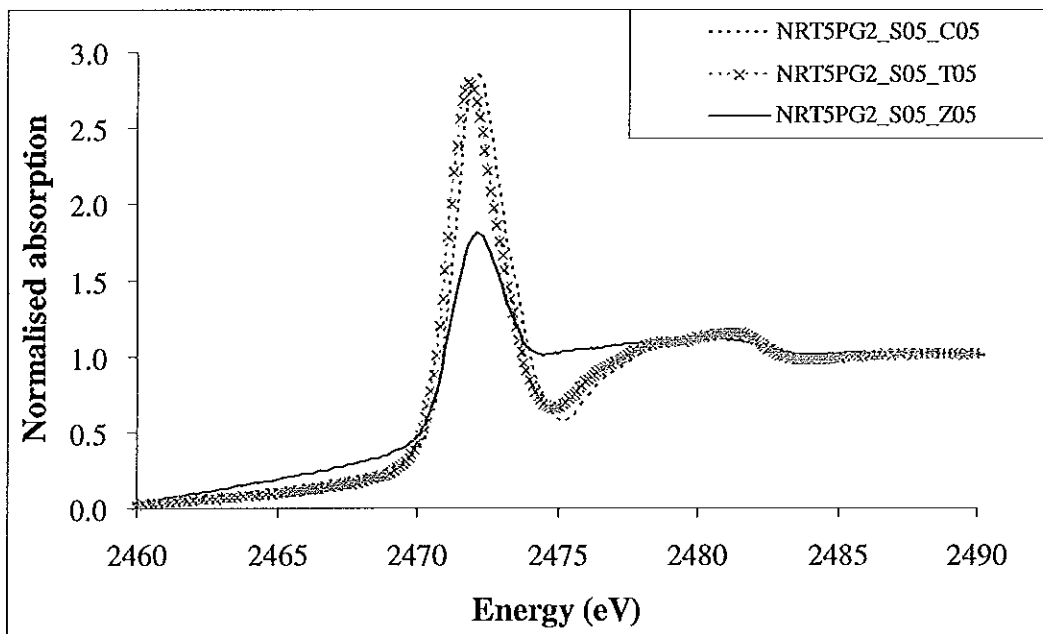
รูปที่ 4.37 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr

แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกัมมะถันให้คงที่ที่ 2.0 phr จากการสังเกตกราฟ XANES ดังแสดงในรูปที่ 4.38 นั้นพบว่าปรากฏให้ที่ตำแหน่งพลังงาน 2472.6 eV เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง ZDEC จะให้พีคที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน

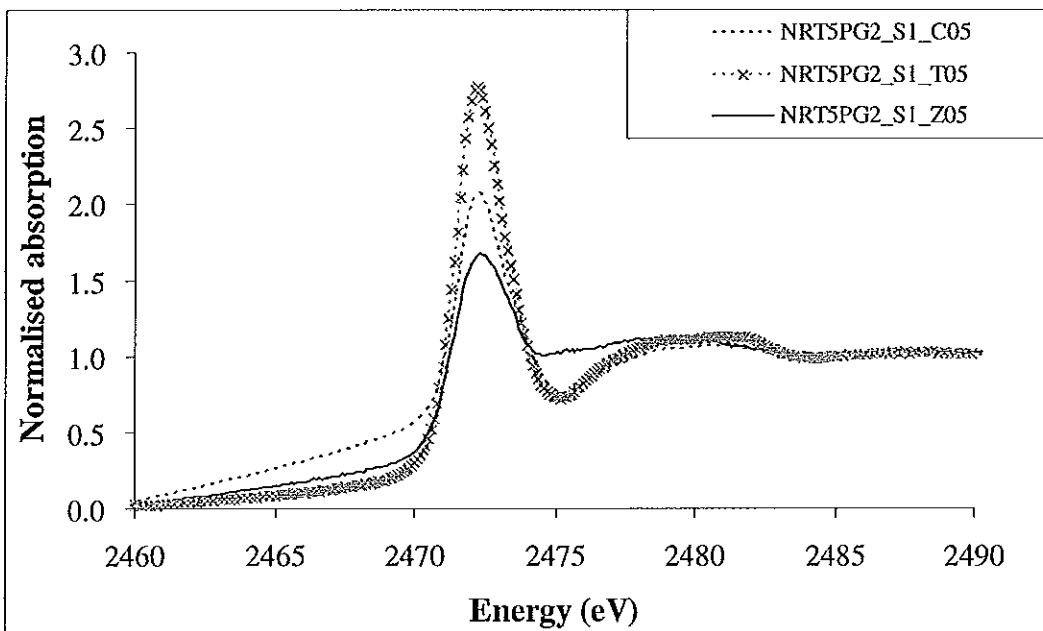


รูปที่ 4.38 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ปริมาณตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr

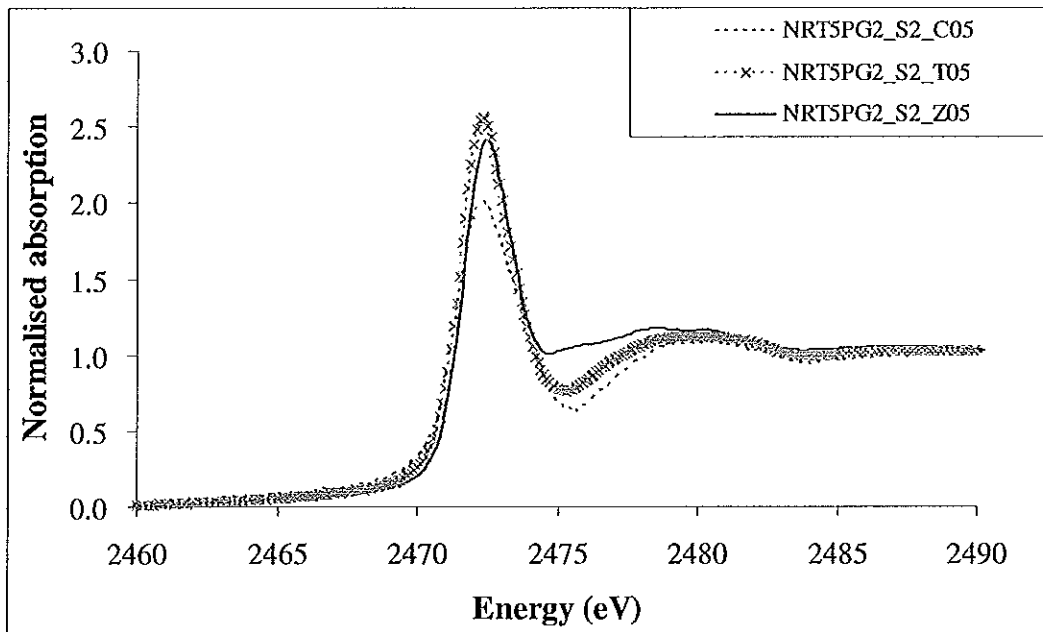
จากการศึกษาถึงผลของชนิดสารตัวเร่งคือ CBS TMTD และ ZDEC ต่อลักษณะการเกิดพันธะเชื่อมโยงเมื่อให้ปริมาณกำมะถันให้คงที่ที่ 0.5 phr ซึ่งจากการสังเกตกราฟ XANES ดังแสดงในรูปที่ 4.39 นั้นพบว่าสารตัวเร่ง TMTD ปรากฏพีคให้ที่ตำแหน่งพลังงาน 2471.9 eV CBS ที่ตำแหน่ง 2472.2 eV และ ZDEC ที่ตำแหน่ง 2472.4 eV โดยพีคที่ปรากฏตำแหน่งระดับพลังงานที่สูงจะให้พันธะกำมะถันที่สั้น และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติเชิงกล ที่พบว่าฟิล์มบางที่ใช้สารตัวเร่งชนิด ZDEC มีความแข็งแรงมากที่สุด เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณกำมะถัน พีคที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 สำหรับปริมาณกำมะถัน 1.0 phr และ 2.0 phr ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับพีคของปริมาณกำมะถัน 0.5 phr



รูปที่ 4.39 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแก๊มะถัน 0.5 phr



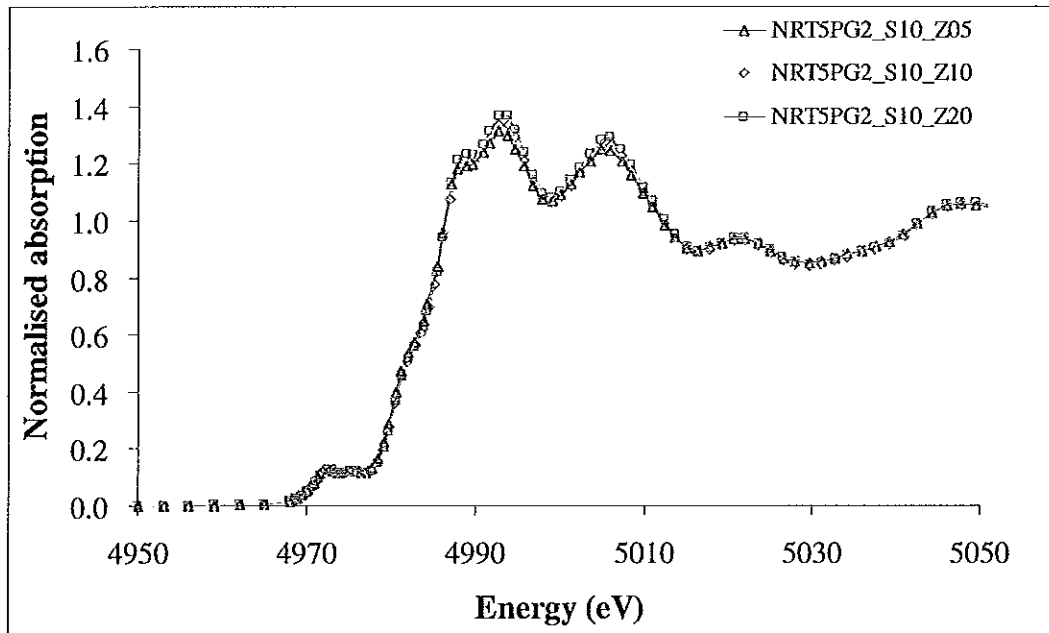
รูปที่ 4.40 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแก๊มะถัน 1.0 phr



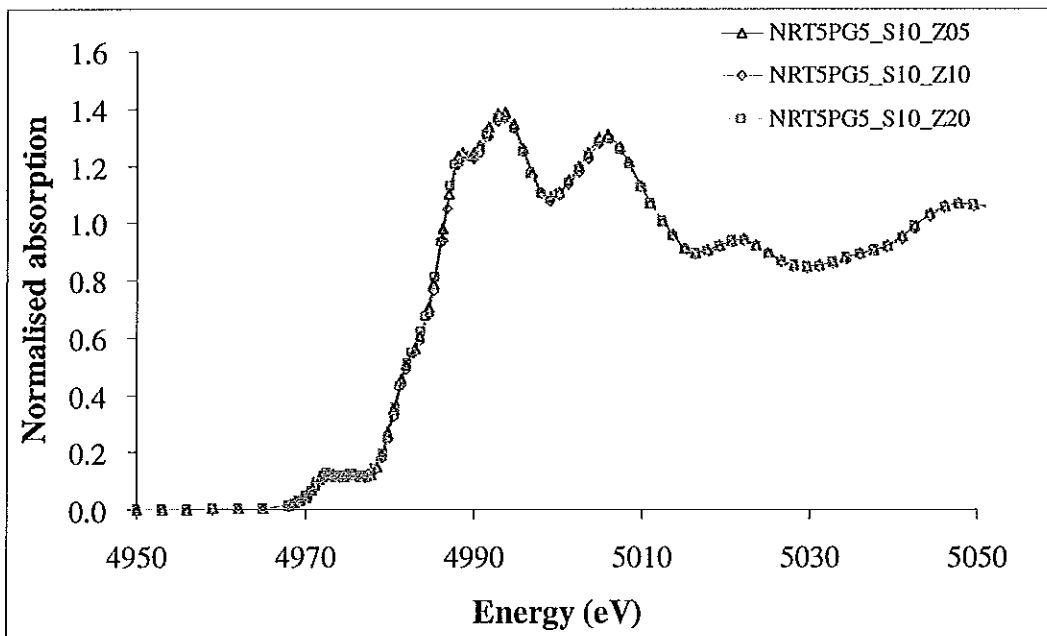
รูปที่ 4.41 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางที่ใช้ตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr

#### 4.3.2.4 โครงสร้างของ $\text{TiO}_2$ ในฟิล์มบาง NR- $\text{TiO}_2$

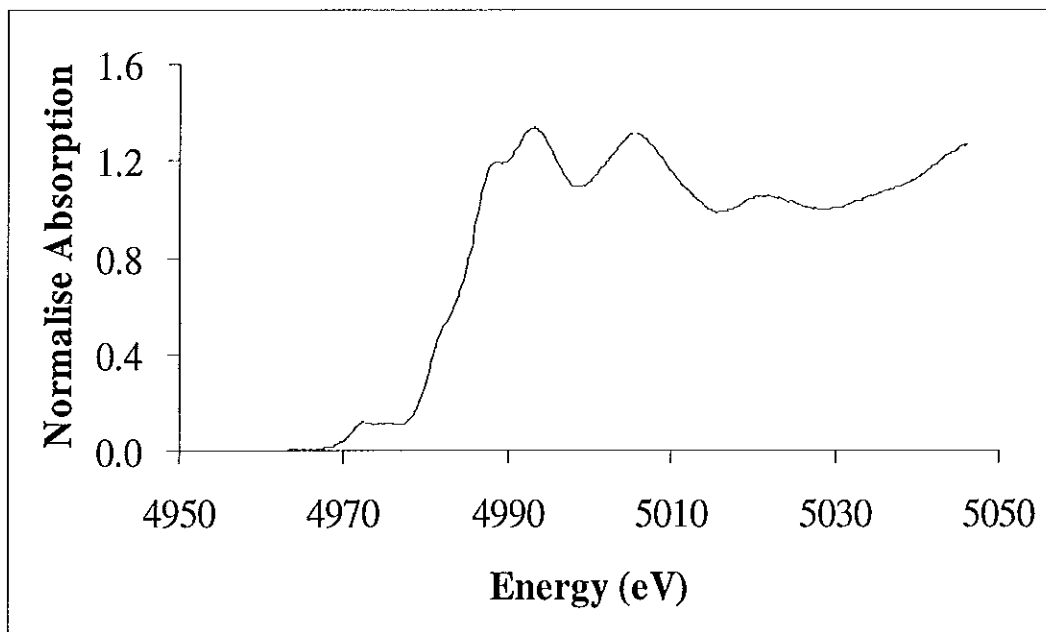
จากการศึกษาถึงผลของปริมาณของสารตัวเร่ง ZDEC ต่อลักษณะการดูดกลืนพลังงานของพันธะไทเทเนียม ในช่วงพลังงาน EXAFS ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ตำแหน่งต่างๆ โดยพีคที่ได้แสดงถึงพันธะไทเทเนียมใน  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างแบบ Rutile แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งที่มี Zinc เป็นองค์ประกอบ จะไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่าง Ti-Zn แต่สารตัวเร่งชนิดนี้จะช่วยเร่งให้เกิดพันธะกำมะถันที่มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถัน หรือสัดส่วนระหว่างสารตัวเร่งกับกำมะถันและพีคที่ได้มีตำแหน่งเช่นเดียวกับ Nomura (Nomura et. al., 2007) ที่ศึกษาโครงสร้างของ  $\text{TiO}_2$  ชนิดโครงสร้าง Rutile ดังแสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.42 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของสารแขวนลอย T5PEG2 ของตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr



รูปที่ 4.43 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของสารแขวนลอย T5PEG5 ของตัวเร่ง ZDEC ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr



รูปที่ 4.44 การดูดกลืนพลังงานของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EXAFS ของ TiO<sub>2</sub> ชนิดโครงสร้าง Rutile (Nomura et. al., 2007)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้สนใจเลือกใช้สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  50% dispersion ที่มี PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ที่ระดับความเข้มข้น 0.04 และ 0.10% โดยน้ำหนัก ในการเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิต เนื่องจากสารแขวนลอยมีความหนืดที่ต่ำ สามารถผสมเข้ากับน้ำยางได้เป็นอย่างดี ประกอบกับ PEG สามารถที่จะถูกกำจัดออกจากฟิล์มบางได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ PVA โดยสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคที่ไม่แตกต่างกัน โดยจากภาพถ่าย SEM จะเห็นอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 150-250 nm.

#### 5.2 การเตรียมฟิล์มบางจากน้ำยางธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มี PEG ทำหน้าที่เป็น dispersing agent ความเข้มข้น 0.09 และ 0.20% โดยน้ำหนัก (NR-T5PEG02-50 และ NR-T5PEG05-50 ตามลำดับ) ผสมเข้ากับสูตรน้ำยางในปริมาณ 50 phr โดยแผ่นฟิล์มที่ได้จากการผสมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นตัวช่วยการกระจายตัวของอนุภาคที่ความเข้มข้น 0.20% โดยน้ำหนัก พบว่า แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอทางด้านที่สัมผัสกับแผ่นกระจก ทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะตามที่ต้องการสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านเทคโนโลยีเมมเบรนและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากที่สุดที่คอมโพสิตอยู่ในฟิล์มยางคือ 30% โดยน้ำหนัก เกิดการหายไปของปริมาณ  $\text{TiO}_2$  บางส่วนเนื่องจากความไม่เสถียรของสารแขวนลอย หรือเกิดการตกตะกอนของ  $\text{TiO}_2$  ที่เกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มในน้ำยางคอมพาวด์

#### 5.3 การปรับปรุงสมบัติของ NR- $\text{TiO}_2$

ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบาง โดยจากภาพถ่าย SEM พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °C การกระจายตัวของสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  จะมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์ และขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 100 °C และ 150 °C ตามลำดับ



สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นเมื่อเลือกใช้สารตัวเร่งชนิด ZDEC เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเร่ง CBS และ TMTD นอกจากนี้สมบัติหลังการป่นเร้งของแผ่นฟิล์มบางที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการใช้สารตัวเร่งชนิด CBS และ TMTD จากการศึกษาลักษณะของพันธะเชื่อมโยงโดยใช้เทคนิค XANES พบว่าฟิล์มบางที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC ให้พันธะเชื่อมโยงที่สั้นที่สุด เป็นผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาการเพิ่มปริมาณ PEG ที่ทำหน้าที่เป็น dispersing agent และชนิดของ PEG ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ เพิ่มเติม
2. ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างแบบ Anatase เพื่อมาศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านเทคโนโลยีเมมเบรน เพิ่มเติม
3. ศึกษาการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซชนิดต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมเพิ่มเติม

### บรรณานุกรม

- ชั้นทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน Membrane Separation Technology. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- คู่มืออนุรักษ์พลังงานโรงงานอุตสาหกรรม. ประเภทผลิตภัณฑ์ยาง. หน้า 10-11.
- ชัยวัฒน์ เจนวนิช. 2528. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน (Basic Polymer Chemistry). สำนักพิมพ์-โอเดียนส์ไตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ชนิดพร นาคกุล. 2552. ศึกษาความเป็นไปได้ของคุณสมบัติเยื่อเลือกผ่านจากน้ำยางธรรมชาติ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นวัล บินหะยีนิย และพิกุล วณิชากิชาติ. 2003. การเตรียมเมมเบรนชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี-เมมเบรน. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 203-204.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พรนภา สุจริตวรกุล. 2548. ไทเทเนียมไดออกไซด์โพโตคะตะลิสต์กับชีวิตประจำวัน. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 76-79.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). ปทุมธานี.
- พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และสุตารัตน์ จิรภัทรสกุล. 2548. ผลกระทบของไดเอทานอลามีนที่มีต่อฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม (VI). วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. ปีที่ 20. ฉบับที่ 1: หน้า 101-110.

- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- เล็ก สีตง. โทเทเนียมไดออกไซด์. เข้าถึงได้จาก [http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek\\_files/ceramic/u10.html](http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u10.html). (วันที่สืบค้น 21 พฤษภาคม 2552).
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. หน้า 14-15.
- วันทนา คล้ายสุบรรณ์. 2550. เทคนิคการทดลอง X-ray Absorption Spectroscopy ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ. สมบูรณ์การพิมพ์. กรุงเทพมหานคร.
- ศิโรรัตน์ ตั้งเสถียรพร. 2550. การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสำหรับกรองน้ำผลไม้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุภลักษณ์ เอกแก้ว, ศิริลักษณ์ พงษ์เกียรติชัย และเบญจพล พิสุทโทโกมล. Preparation of Titanium Dioxide Nanoparticles by Sol-gel Process. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, วิทยาศาสตร์เพื่อเยาวชน. ศูนย์นิทรรศการและการประชุม บางนา, 14-15 มีนาคม 2549. หน้า 73.
- สถาบันวิจัยยาง. 2538. คู่มือมาตรฐานการยางแห่งประเทศไทย. กรมวิชาการเกษตร. หน้า 34.
- สุพิน แสงสุข. 2550. โทเทเนียมไดออกไซด์. เข้าถึงได้จาก <http://www.material.chula.ac.th/articles/ti.html>. (วันที่สืบค้น 21 พฤษภาคม 2552).
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. 2546. การผลิตยางธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 151-153.
- สุพิน แสงสุข. 2550. โทเทเนียมไดออกไซด์. เข้าถึงได้จาก <http://www.material.chula.ac.th/articles/ti.html>. (วันที่สืบค้น 21 พฤษภาคม 2552).

อภิชาติ ไชยชนตรดี, ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และสุรเทพ เขียวหอม. 2005. การวิเคราะห์ผลกระทบต้อสิ่งแวดล้อมจากการใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์. บทความคัดย่อจากการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 1-6.

ASTM D 412-80. 1982. Test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomer-tension, Annual book of ASTM standards. Easton. part 37, pp 140-153.

Blackley, D.C. 1997. In Polymer Lactices Science and Technology Second edition Vol 2: Type of lactices. Chapman & Hall: London., pp. 44-55.

Chen, X.D., Wang, Z., Liao, Z.F., Mai, Y.U. and Zhang, M.Q. 2007. Roles of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> nanoparticles in photooxidation of polyurethane., Polymer Testing., Vol. 26., pp 202-208.

Diary Processing Handbook. Published By Tetra Pak Processing Systems AB, S-211 86 Lund, Sweden. pp 124.

Guan, C., Lu, C.L., Liu, Y.F. and Yang, B. 2006. Preparation and characterization of high refractive index thin films of TiO<sub>2</sub>/epoxy resin nanocomposites., Journal of Applied Polymer Science., Vol. 102 Issue 2., pp 1631-1636.

Hamamoto, A., Tanaka, T. and Kinoshita, M., 2004. Mechanical properties and dispersion behavior of composite materials compounded with surface treated titanium dioxide., Journal of Vinyl and Additive Techonology., Vol. 6 Issue 1., pp. 20-25.

Hashimoto, M., Takadama, H., Mizuno, M. and Kokubo, T. 2005. Enhancement of mechanical strength of TiO<sub>2</sub>/high-density polyethylene composites for bone repair with silane-coupling treatment., Material Research Bulletin, Vol. 41., pp 515-524.

Hayashi, T. 1995. Gas separation performance of hollow-filament type polyimide membrane module for a tritium removal system., *Fusion Technol.*, Vol. 28., pp 1503.

Huang, K.S., Nien, Y.H., Chen, J.S., Shieh T.R. and Chen, J.W. 2006. Synthesis and properties of epoxy/TiO<sub>2</sub> composite materials., *Polymer composites.*, Vol. 27 Issue 2., pp 195-200.

Hu, Q., Marand, E., Dhingra, S., Fritsch, D., Wen, J. and Wilkes, G. 1997. Poly(amide-imide)/TiO<sub>2</sub> nano-composite gas separation membranes: Fabrication and characterization., *Journal of Membrane Science.*, Vol. 135. pp 65-79.

IGS Innovative gas systems. 2000. Nitrogen generator membrane technology.  
<http://www.generon.com/products/prod-rentals-tech-NMS.html/> (accessed 1/5/09).

Kirt, R.E. and Othmer, D.F. 1985. *Kirt-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology.*, New York: John Wiley & Sons.

Kong, Y., Du, H., Yang, J., Shi, D., Wang, Y., Zhang Y. and Xin, W. 2002. Study on polyimide/TiO<sub>2</sub> nanocomposite membranes for gas separation., *Desalination.*, Vol 146., pp49-55.

Leland Vane. 2008. U. S. Environmental protection agency : Clean processes.  
<http://www.epa.gov/nrmrl/std/cppb/pervaporationwhatis.htm/> (accessed 3/5/09).

Meera, A.P., Said, A., Grohens, Y., Luyt, A.S. and Thomas, S. 2009. Tensile stress studies of TiO<sub>2</sub> and nanosilics filled natural rubber composites., *Ind. Eng. Chem.* Vol. 2., pp. 3410-3416.

Modrow, H., Zimmer, R., Visel, F. and Hormes, J. 2000. Monitoring thermal oxidation of sulfur crosslinks in SBR-Elastomers using sulfur K-edge XANES: A feasibility study. *Kauts. Gum. Kunst.*, Vol. 53., pp 328-337.

- Nomura, K., Eba, H., Sakurai, K., Rykov, A. and Hasegawa, T. 2007. XAFS and CEMS study of dilute magneto-optical semiconductor Fe doped TiO<sub>2</sub> films., *Thin Solid Films.*, Vol. 515., pp 8649-8652.
- Ponken, T., Chityuttakan, C. and Chatraphorn, S. 2009. Preparation of TiO<sub>2</sub> thin films using spray coating technique., *Proceeding of the 12<sup>th</sup> National Graduate Research Conference.* Khon Kaen University. February 12-13, 2009. pp 118.
- Selvin P. Thomas, Sabu Thomas and Sri Bandyopadhyay. 2008. Mechanical, atomic force microscopy and focussed ion beam studies of isotactic polystyrene/titanium dioxide composites., *Composites: Part A.*, pp 36-44.
- Stephen, R., Ranganathaiah, C., Varghese, S., Joseph, K. and Thomas, S. 2005. Gas transport through nano and micro composites of natural rubber (NR) and their blends with carboxylated styrene butadiene rubber (XSBR) latex membranes., *Polymer composites.*, Vol. 47., pp 858-870.
- Swope, R.J., Smyth, J.R. and Larson, A.C. 1995. *Am. Mineralogist Crystal Structure Database.*, Vol. 80., pp 448.
- Silva, V.P., Paschoalino, M.P., Goncalves, M.C., Felisberti, M.I., Jardim, W.F. and Yoshida, I.V.P. 2008. Silicone rubbers filled with TiO<sub>2</sub>: Characterization and photocatalytic activity., *Material Chemistry and Physics.*, Vol. 113., pp 395-400.
- Tatiane M.A., Katyuscya V.L., Ines B.T.M., Antonio G.F., Elson, L. and Emerson, R.C. 2009. NMR study of styrene-butadiene rubber (SBR) and TiO<sub>2</sub> nanocomposites., *Polymer Testing.*, pp 1-5.
- Wang, H. and Adesina, A.A. 1997. Photocatalytic causticization of sodium oxalate using commercial TiO<sub>2</sub> particles., *Appl. Catal. B.*, Vol. 14., pp 241-247.

Wang, Z., Xie, G., Wang, X. and Zhang, Z. 2006. Rheology and dispersion behavior of high-impact polystyrene/ethylene-vinyl acetate copolymer/TiO<sub>2</sub> nanocomposites., *Journal of Applied Polymer Science.*, Vol. 100 Issue 6., pp 4434-4438.

Young, R.J. and Lovell, P.A. 1991. *Introduction to Polymers* Second edition., Vol. 2. Chapman and Hall: London., pp 88-89.

**ภาคผนวก**



ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของฟิล์มบางจากน้ำยาคอมโพสิต

จากการเปรียบเทียบผลของปริมาณ PEG ที่ผสมในสารแขวนลอย TiO<sub>2</sub> ต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มบาง พบว่า การผสม PEG ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (เปรียบเทียบกับการใช้สารตัวเร่งชนิดเดียวกัน) อาจเนื่องจาก PEG ซึ่งทำหน้าที่เป็น dispersing agent ทำให้การกระจายตัวของ TiO<sub>2</sub> ใน suspension ดีขึ้น สารแขวนลอยจึงมีความเสถียรเพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มบาง จึงส่งผลให้ฟิล์มบาง ชุด T5PEG5 มีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่า T5PEG2

ตาราง ก 1 เปรียบเทียบอภิทธิผลของ T5PEG2 และ T5PEG5 ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

| สารตัวเร่ง   | กัมมะถัน | Tensile strength, MPa (before aging) |            | Tensile strength, MPa (after aging) |            | % Elongation at break (before aging) |           | % Elongation at break (after aging) |           |
|--------------|----------|--------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
|              |          | T5PEG2                               | T5PEG5     | T5PEG2                              | T5PEG5     | T5PEG2                               | T5PEG5    | T5PEG2                              | T5PEG5    |
| TMTD 0.5 phr | 0.5 phr  | 9.14±1.25                            | 15.89±1.61 | 7.53±0.37                           | 16.54±0.34 | 910±59.62                            | 903±27.22 | 803±8.59                            | 658±29.75 |
|              | 1.0 phr  | 9.96±0.89                            | 16.02±0.90 | 4.92±0.77                           | 12.76±0.68 | 982±48.86                            | 918±48.86 | 548±64.07                           | 625±16.08 |
|              | 2.0 phr  | 10.23±0.99                           | 15.24±0.60 | 2.90±0.21                           | 6.43±0.44  | 987±37.21                            | 888±8.68  | 556±24.71                           | 669±44.66 |
| TMTD 1.0 phr | 0.5 phr  | 7.58±0.65                            | 15.82±0.79 | 8.13±0.35                           | 13.23±1.15 | 946±117.37                           | 977±20.30 | 867±33.77                           | 762±7.20  |
|              | 1.0 phr  | 7.80±0.80                            | 15.94±1.24 | 4.86±0.22                           | 10.18±1.13 | 994±46.12                            | 971±18.99 | 574±26.35                           | 748±6.67  |
|              | 2.0 phr  | 8.19±0.91                            | 11.62±0.83 | 2.49±0.91                           | 3.75±10.24 | 995±33.81                            | 913±13.93 | 646±58.41                           | 657±40.87 |

ตาราง ก 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ T5PEG2 และ T5PEG5 ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break (ต่อ)

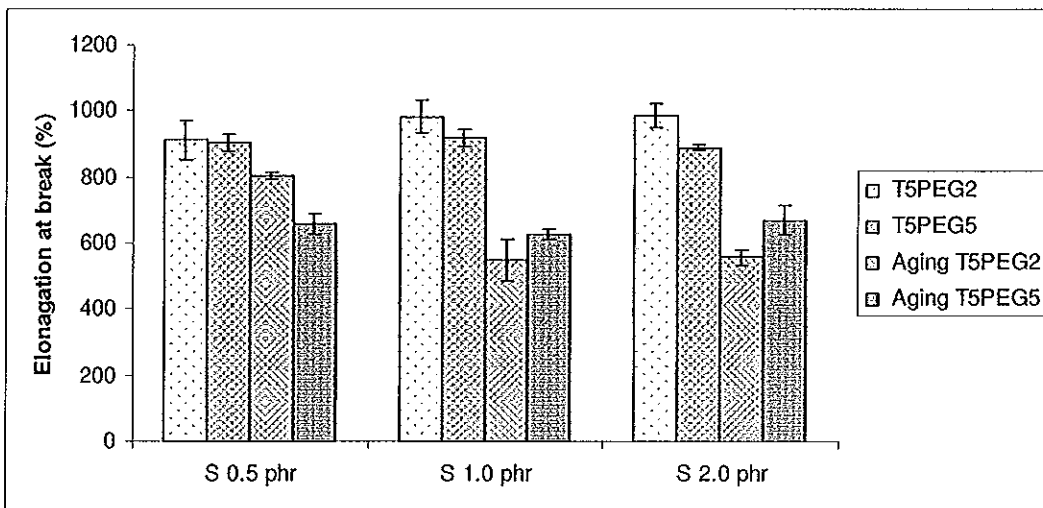
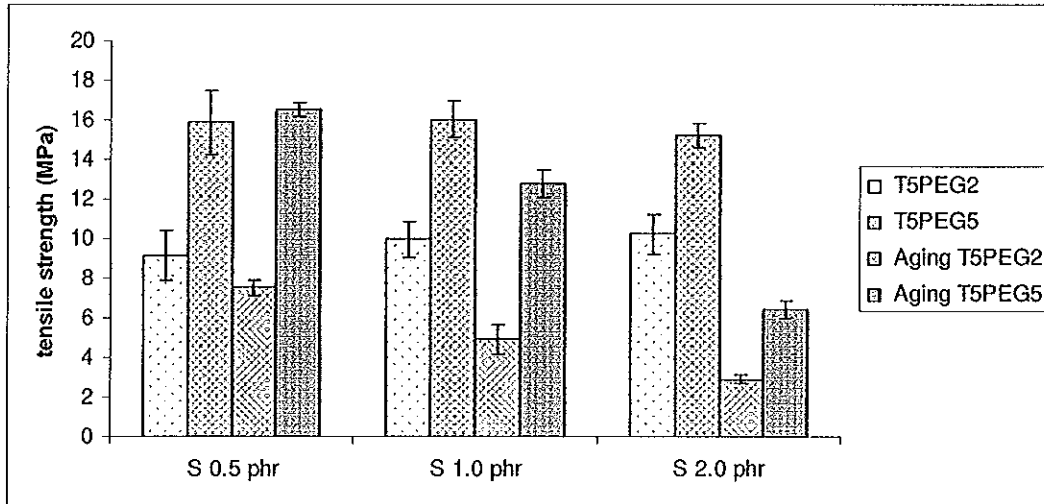
| สารตัวเร่ง   | กัมมะถัน | Tensile strength, MPa<br>(before aging) |            | Tensile strength, MPa<br>(after aging) |            | % Elongation at break<br>(before aging) |            | % Elongation at break<br>(after aging) |           |
|--------------|----------|-----------------------------------------|------------|----------------------------------------|------------|-----------------------------------------|------------|----------------------------------------|-----------|
|              |          | T5PEG2                                  | T5PEG5     | T5PEG2                                 | T5PEG5     | T5PEG2                                  | T5PEG5     | T5PEG2                                 | T5PEG5    |
| TMTD 2.0 phr | 0.5 phr  | 5.10±0.48                               | 15.22±0.63 | 6.08±0.94                              | 9.24±0.87  | 985±78.39                               | 983±11.26  | 942±52.61                              | 877±10.57 |
|              | 1.0 phr  | 6.74±1.22                               | 14.08±1.98 | 4.39±0.47                              | 10.30±0.80 | 996±51.11                               | 1027±11.72 | 620±1.05                               | 840±4.91  |
|              | 2.0 phr  | 7.24±0.76                               | 9.82±0.64  | 2.10±0.30                              | 3.37±0.41  | 1006±31.15                              | 1075±26.83 | 779±6.53                               | 667±12.74 |
| ZDEC 0.5 phr | 0.5 phr  | 23.01±1.31                              | 28.72±2.18 | 17.19±1.57                             | 20.70±1.17 | 774±36.72                               | 892±23.84  | 839±13.27                              | 888±16.97 |
|              | 1.0 phr  | 22.25±0.81                              | 27.91±1.50 | 16.75±0.39                             | 19.28±0.66 | 813±18.98                               | 909±15.29  | 844±28.49                              | 890±15.15 |
|              | 2.0 phr  | 20.44±1.97                              | 26.33±2.82 | 12.52±1.13                             | 18.28±1.60 | 845±29.77                               | 896±9.56   | 789±15.95                              | 889±10.69 |
| ZDEC 1.0 phr | 0.5 phr  | 17.98±0.66                              | 22.06±1.13 | 12.64±1.72                             | 15.31±0.76 | 830±18.99                               | 780±16.02  | 548±48.03                              | 741±15.93 |
|              | 1.0 phr  | 17.94±0.75                              | 21.83±0.46 | 12.31±1.04                             | 14.60±1.71 | 809±16.68                               | 792±9.86   | 630±31.51                              | 742±45.99 |
|              | 2.0 phr  | 16.92±0.86                              | 20.20±1.53 | 12.16±0.51                             | 12.65±1.14 | 803±6.64                                | 774±27.12  | 328±43.69                              | 739±30.37 |
| ZDEC 2.0 phr | 0.5 phr  | 17.99±1.40                              | 16.25±0.78 | 6.21±0.65                              | 14.90±0.38 | 823±29.77                               | 920±15.96  | 432±28.71                              | 651±33.16 |
|              | 1.0 phr  | 17.25±1.12                              | 16.90±0.95 | 6.68±0.52                              | 13.37±0.30 | 801±18.28                               | 817±8.59   | 518±44.42                              | 654±11.95 |
|              | 2.0 phr  | 16.03±1.17                              | 15.91±0.57 | 2.75±0.46                              | 13.64±0.57 | 799±12.28                               | 750±24.09  | 669±4.26                               | 517±24.43 |
| CBS 0.5 phr  | 0.5 phr  | 7.41±0.39                               | 9.06±1.06  | 6.10±0.69                              | 5.21±0.13  | 977±27.48                               | 1017±26.91 | 656±39.76                              | 959±25.74 |
|              | 1.0 phr  | 6.53±0.63                               | 8.96±1.19  | 5.64±0.84                              | 5.17±0.71  | 988±40.49                               | 1046±32.11 | 766±31.02                              | 957±21.33 |
|              | 2.0 phr  | 8.18±1.33                               | 8.75±0.55  | 1.33±0.81                              | 3.07±0.56  | 1009±78.52                              | 1079±13.65 | 857±40.69                              | 987±19.90 |

ตาราง ก 1 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของ T5PEG2 และ T5PEG5 ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break (ต่อ)

| สารตัวเร่ง  | กำมะถัน | Tensile strength, MPa<br>(before aging) |           | Tensile strength, MPa<br>(after aging) |           | % Elongation at break<br>(before aging) |           | % Elongation at break<br>(after aging) |           |
|-------------|---------|-----------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------|
|             |         | T5PEG2                                  | T5PEG5    | T5PEG2                                 | T5PEG5    | T5PEG2                                  | T5PEG5    | T5PEG2                                 | T5PEG5    |
| CBS 1.0 phr | 0.5 phr | 6.67±0.86                               | 6.55±1.56 | 4.67±0.09                              | 4.65±0.75 | 970±45.01                               | 897±55.17 | 825±29.13                              | 823±12.20 |
|             | 1.0 phr | 6.46±0.78                               | 7.45±1.83 | 4.03±0.39                              | 4.15±0.67 | 997±44.77                               | 949±45.98 | 924±79.29                              | 892±18.80 |
|             | 2.0 phr | 6.32±0.92                               | 5.97±0.33 | 2.94±1.00                              | 4.21±0.62 | 1010±31.42                              | 917±24.93 | 945±62.71                              | 934±23.30 |
| CBS 2.0 phr | 0.5 phr | 8.19±1.05                               | 7.66±0.61 | 5.54±0.86                              | 7.76±1.19 | 794±41.49                               | 905±23.82 | 682±67.52                              | 754±44.24 |
|             | 1.0 phr | 7.54±1.00                               | 6.77±0.41 | 5.11±0.20                              | 6.23±1.05 | 972±3.78                                | 871±43.39 | 741±53.50                              | 811±30.17 |
|             | 2.0 phr | 6.92±0.57                               | 6.75±0.24 | 5.83±0.54                              | 3.71±0.07 | 977±12.75                               | 939±54.01 | 820±30.17                              | 855±33.02 |

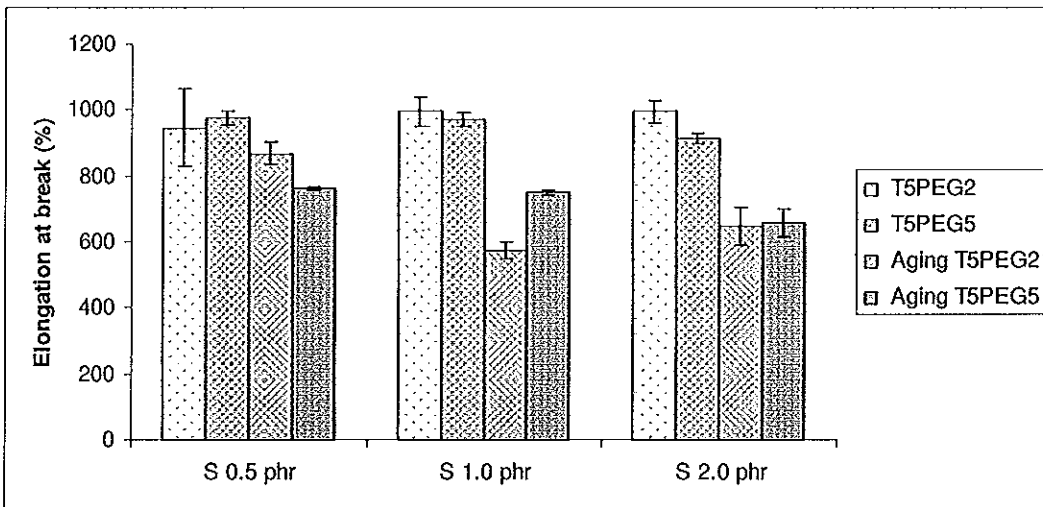
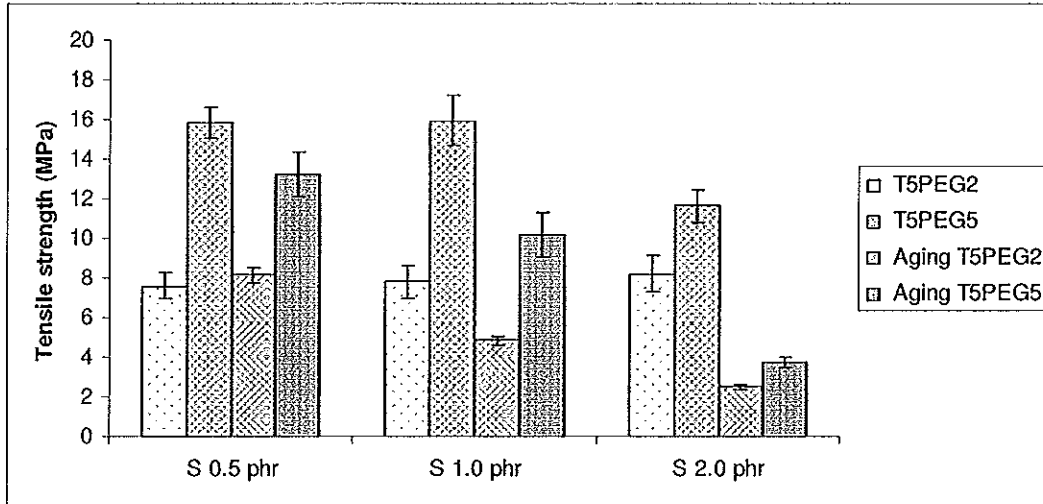
ผลของสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมกับกำมะถันและชนิดตัวเร่ง  
ที่ปริมาณต่าง ๆ

➤ TMTD 0.5 phr



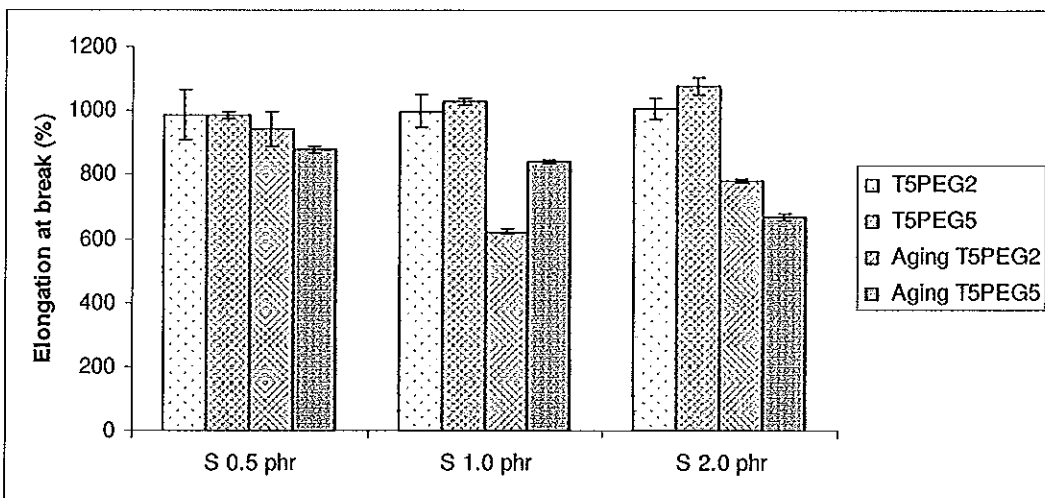
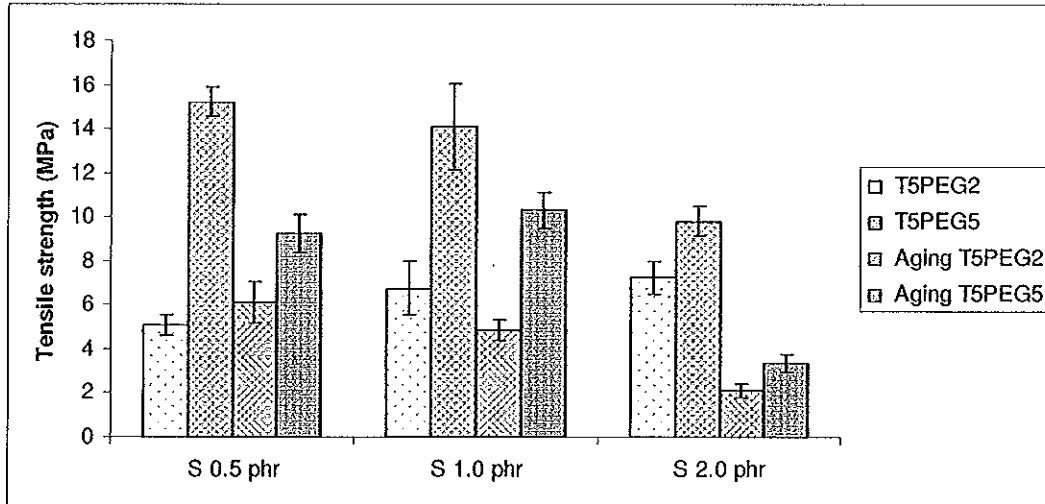
รูปที่ ก 1 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง TMTD 0.5 phr  
กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ  
Elongation at break

➤ TMTD 1.0 phr



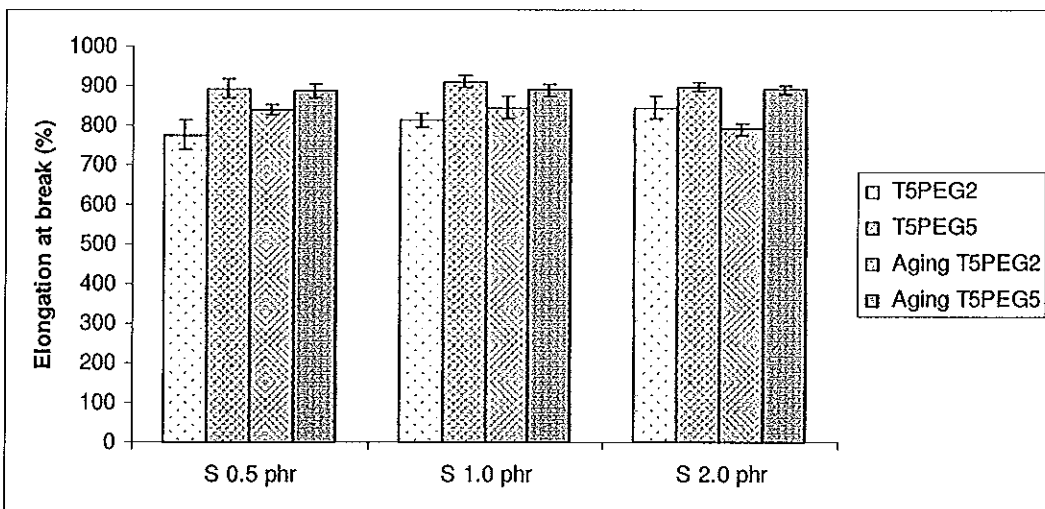
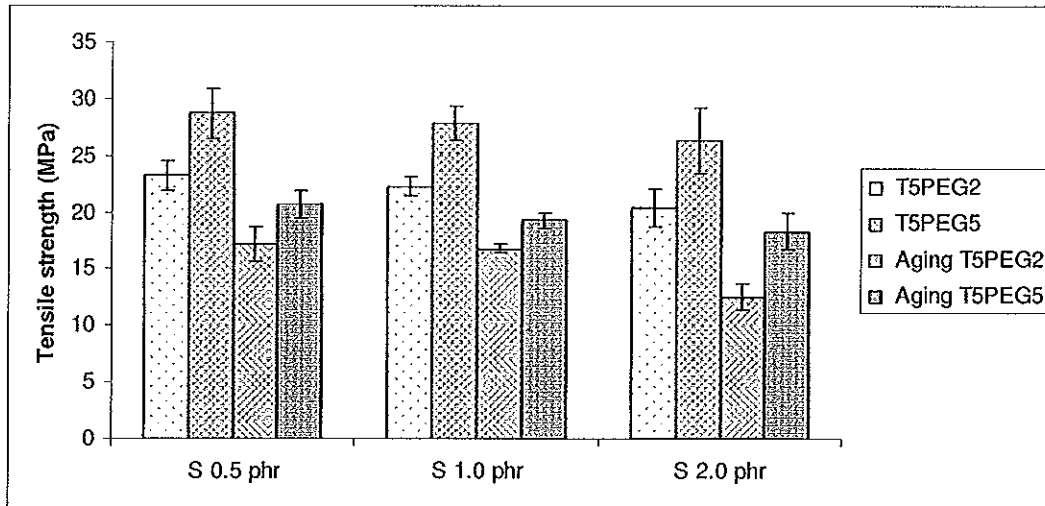
รูปที่ ก 2 เปรียบเทียบผลสารแขนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง TMTD 1.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

➤ TMTD 2.0 phr



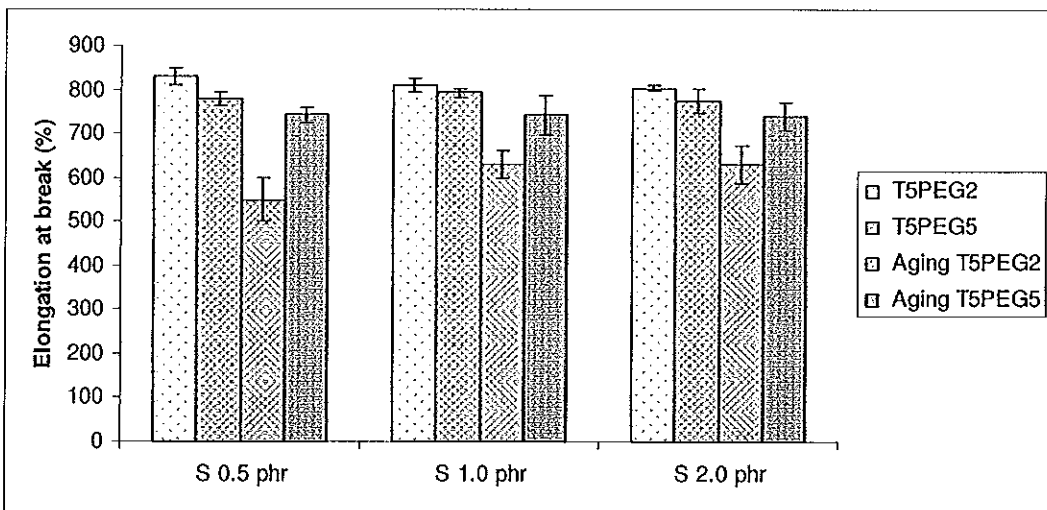
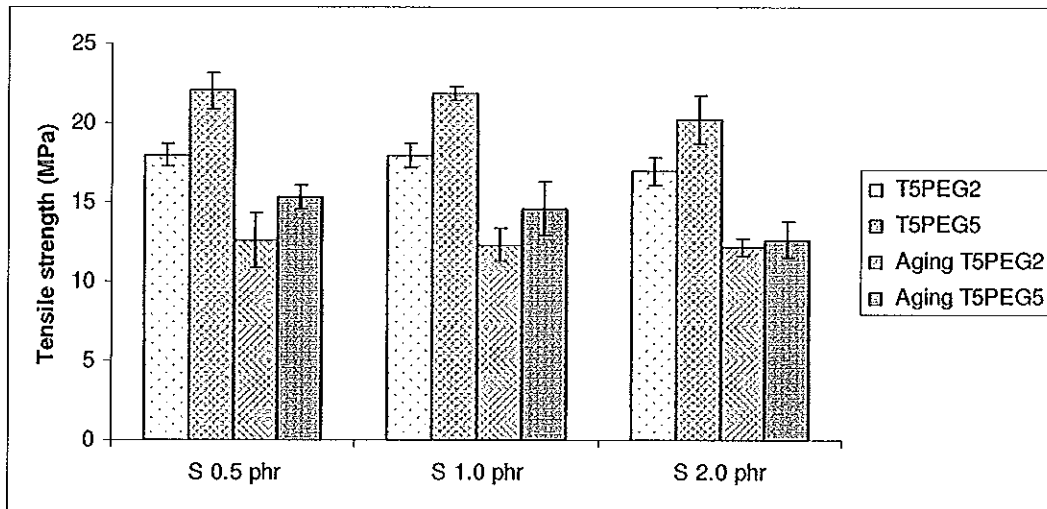
รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง TMTD 2.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

➤ ZDEC 0.5 phr



รูปที่ ก 4 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง ZDEC 0.5 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

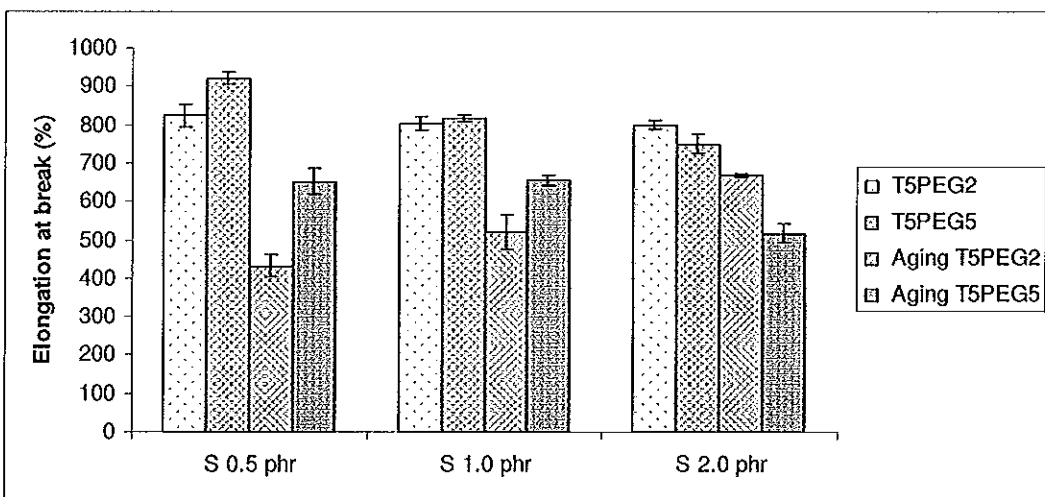
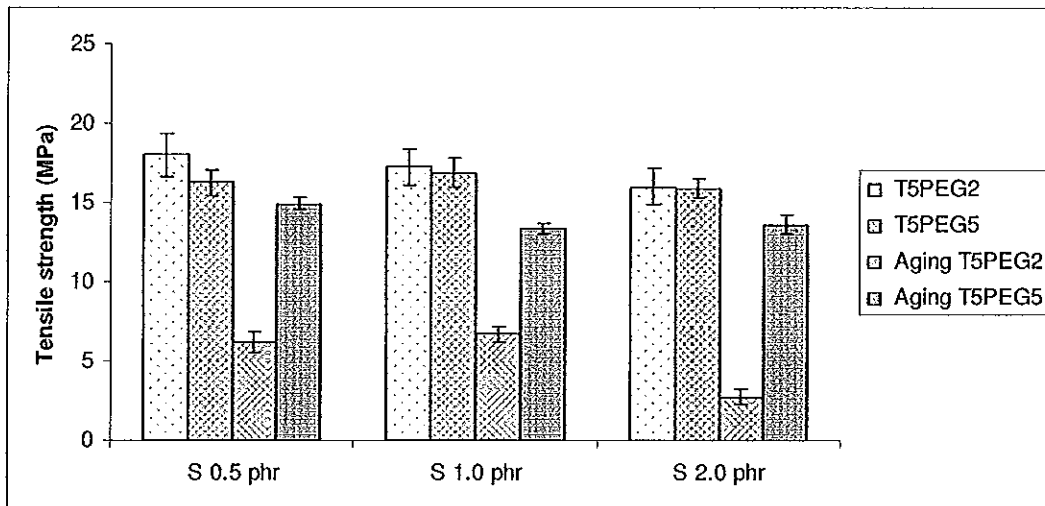
➤ ZDEC 1.0 phr



รูปที่ ก 5 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง ZDEC 1.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

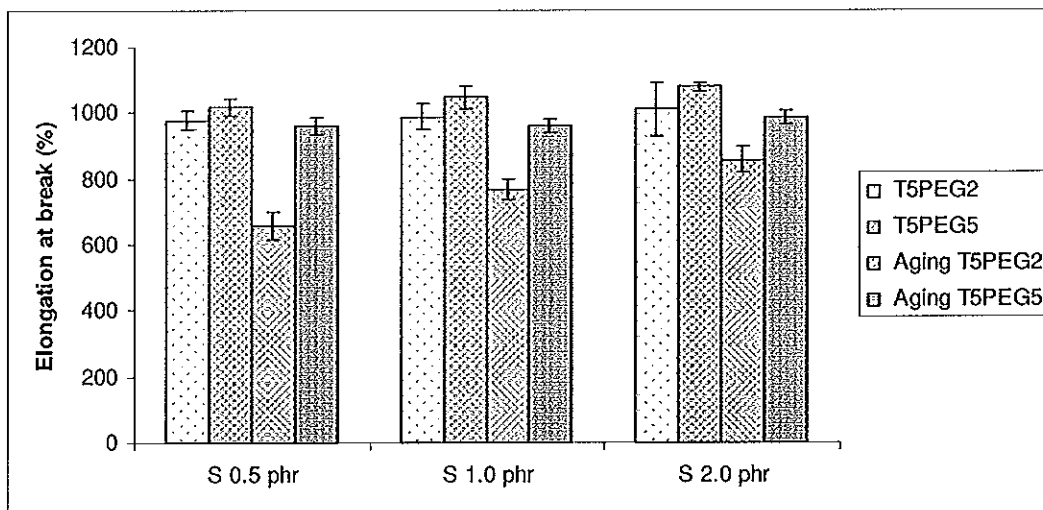
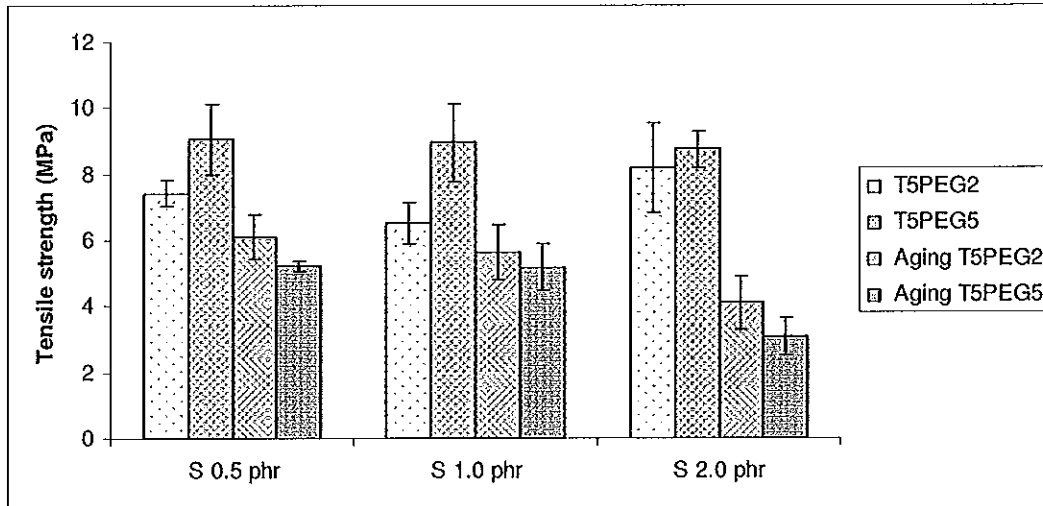


➤ ZDEC 2.0 phr



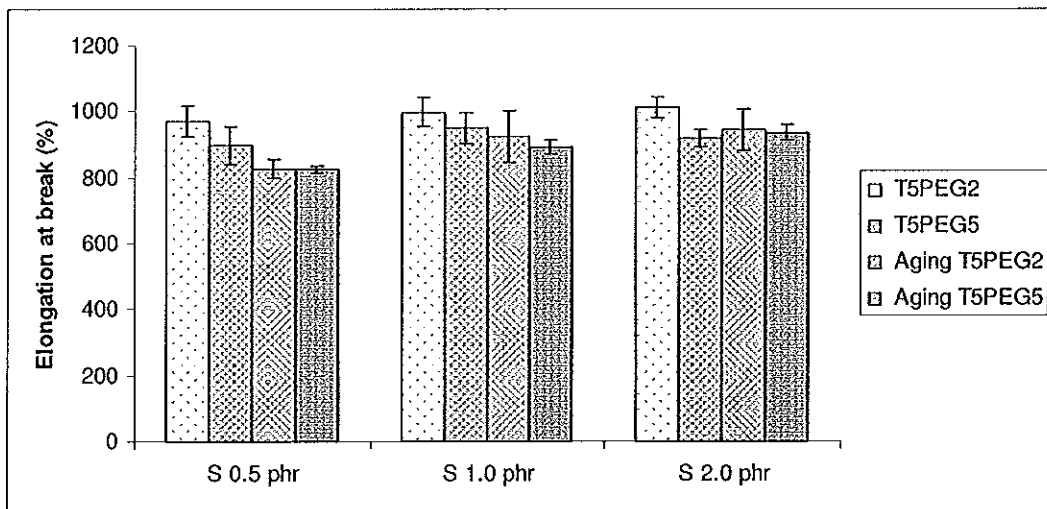
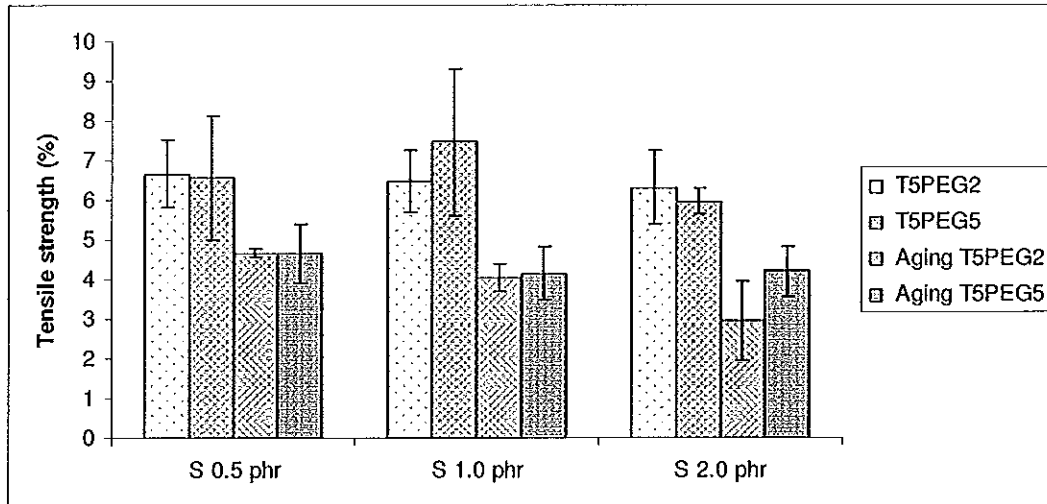
รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง ZDEC 2.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

➤ CBS 0.5 phr



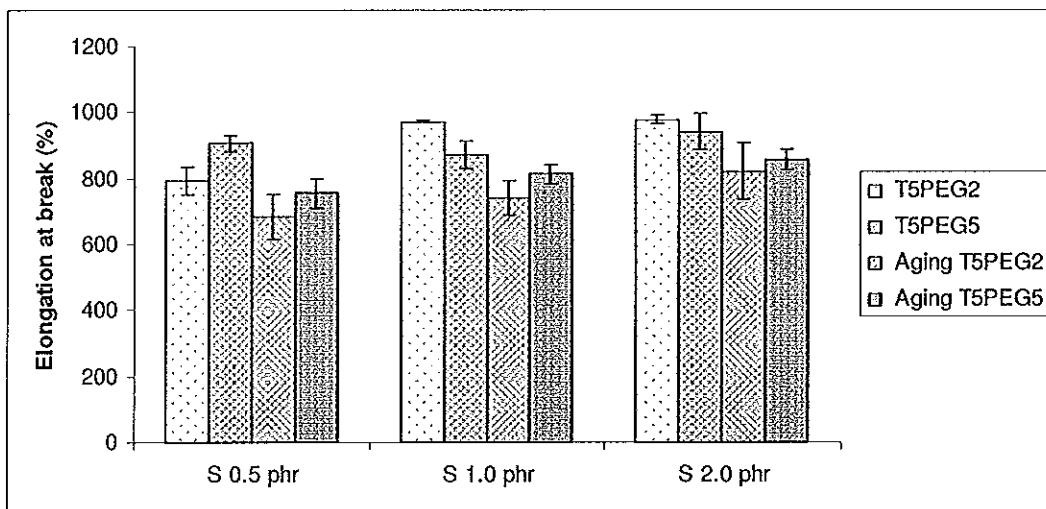
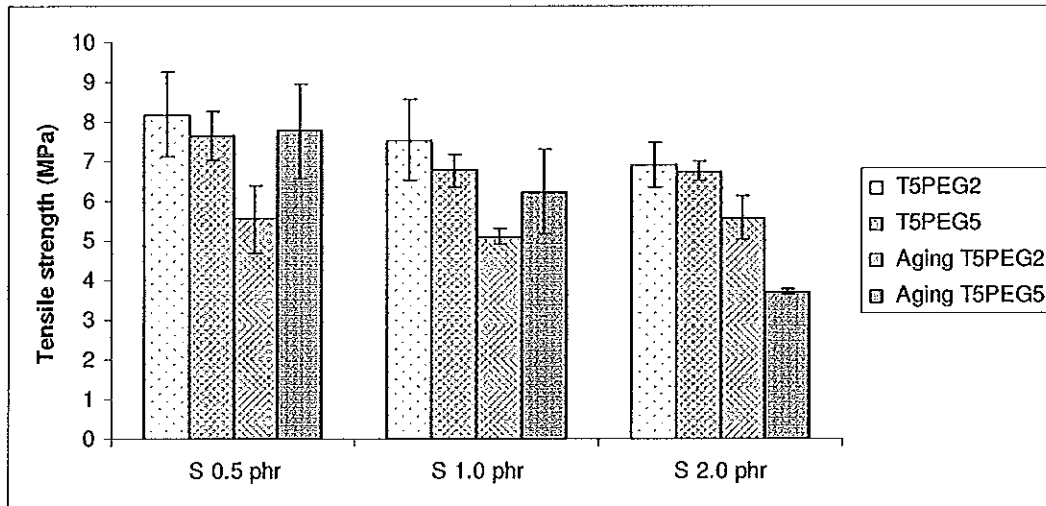
รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลสารแขนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง CBS 0.5 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

➤ CBS 1.0 phr



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง CBS 1.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

➤ CBS 2.0 phr

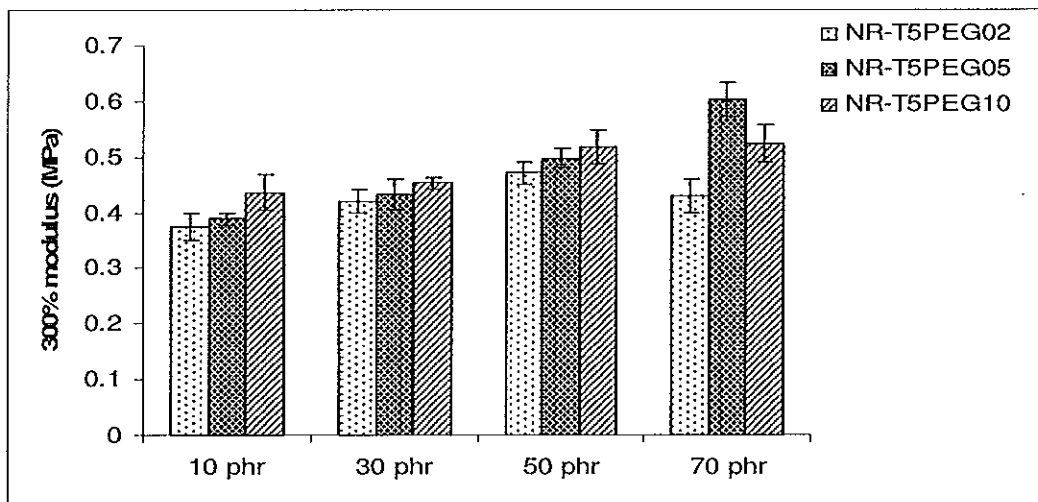


รูปที่ ก 9 เปรียบเทียบผลสารแขวนลอย T5PEG2 และ T5PEG5 ที่ผสมตัวเร่ง CBS 2.0 phr กับกำมะถันที่ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 phr ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงและ Elongation at break

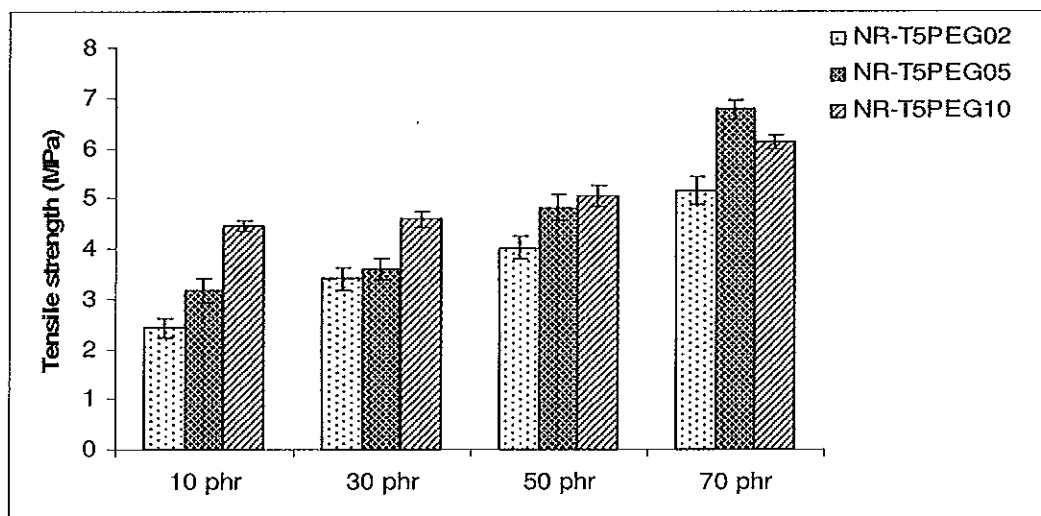
## ภาคผนวก ข

ผลของสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$

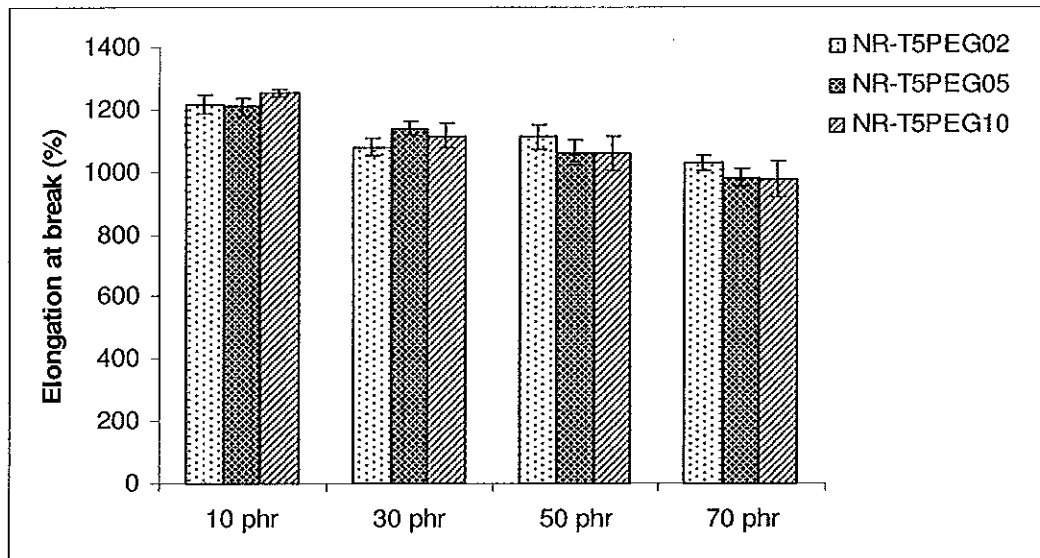
ผลของสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  โดยมี PEG เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค



รูปที่ ข 1 ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ 300% มอดูลัส

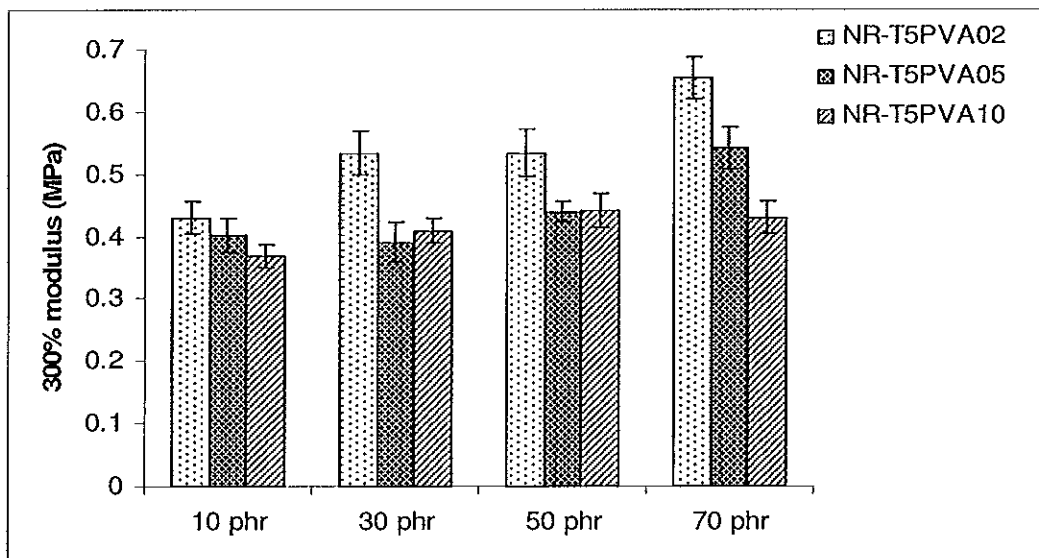


รูปที่ ข 2 ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ต่อการทนแรงดึงของฟิล์มบาง

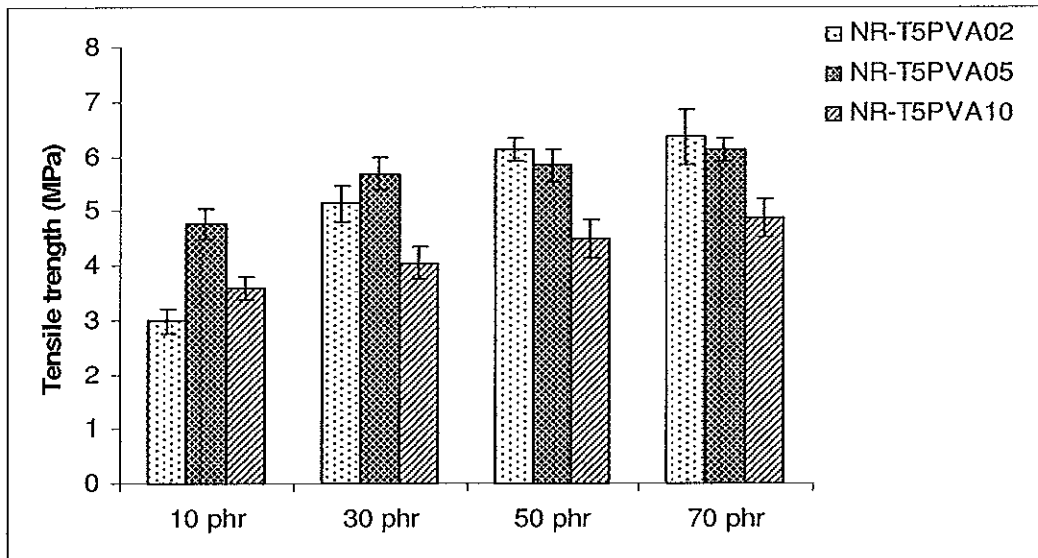


รูปที่ 3 ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ต่อระยะยืด ณ จุดขาดของฟิล์มบาง

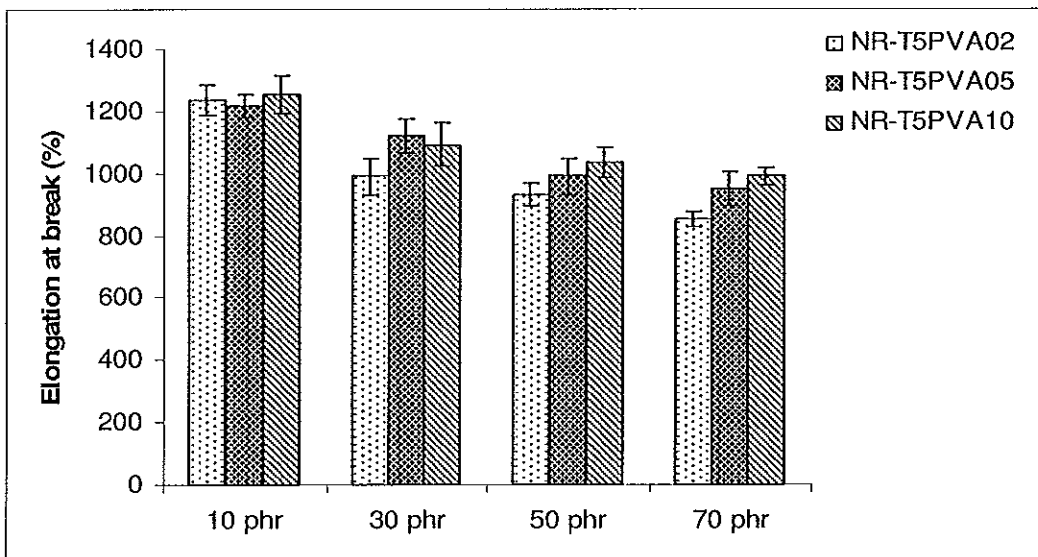
ผลของสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  โดยมี PVA เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค



รูปที่ 4 ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ 30% มอดูลัส



รูปที่ ๕ ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $TiO_2$  ต่อการทนแรงดึงของฟิล์มบาง



รูปที่ ๖ ผลของปริมาณสารแขวนลอย  $TiO_2$  ต่อระยะยืด ณ จุดขาดของฟิล์มบาง

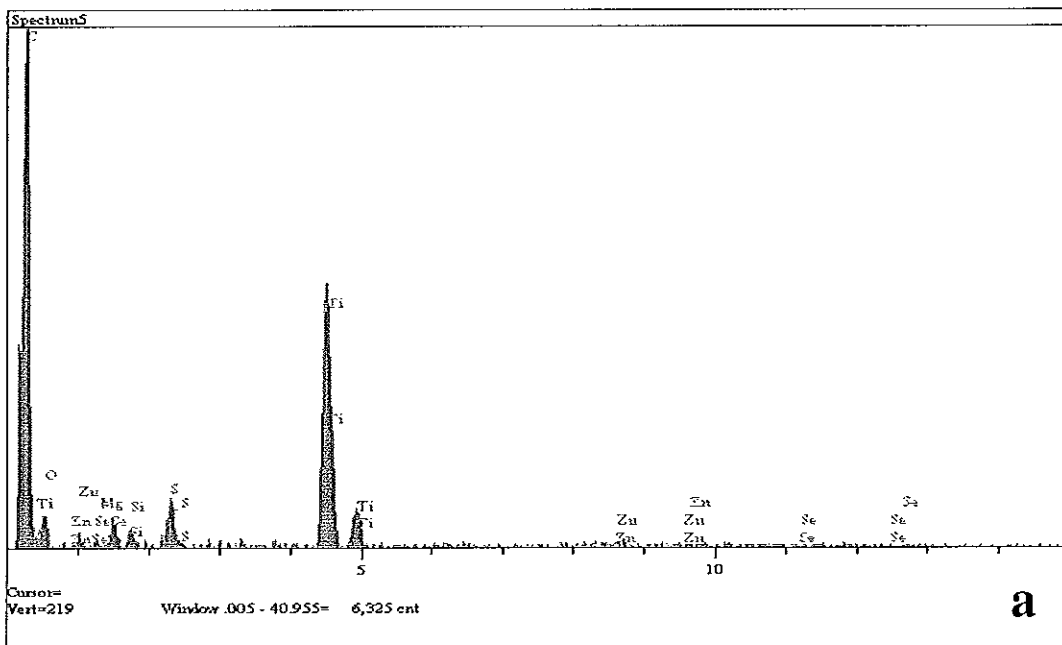
## ภาคผนวก ค

## ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย

## 1) ฟิล์มยางคอมปาวด์ ที่ตัวเร่ง ZDEC ปริมาณ 0.5 phr

## ตาราง ค 1 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านบน)

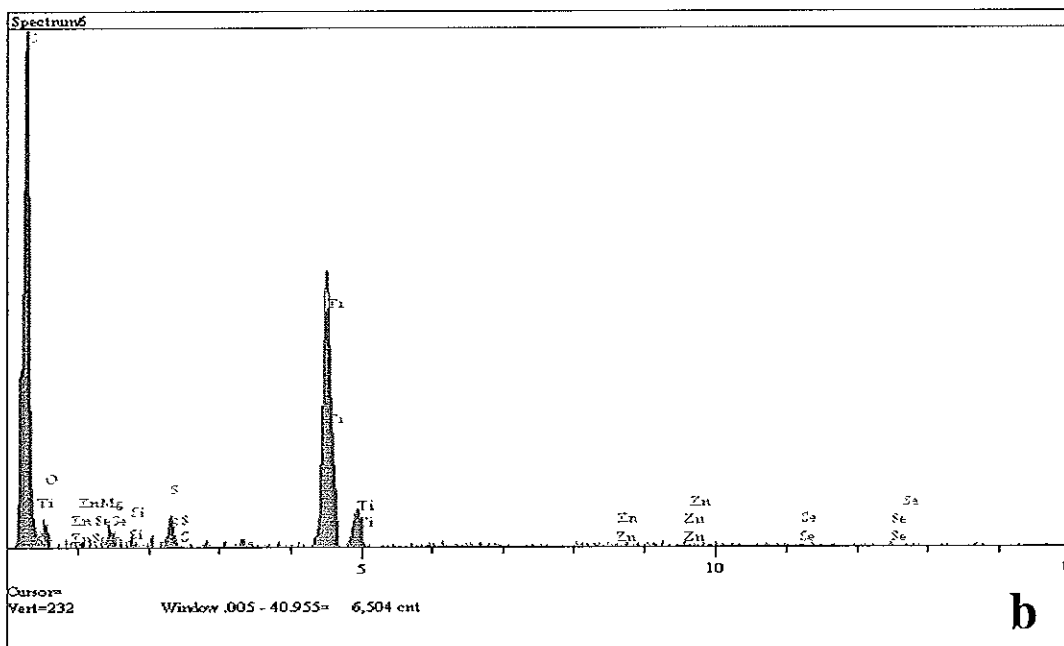
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 215.75          | 9.285       | 55.088  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 7.53            | 1.734       | 4.804   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.68            | 0.520       | 0.061   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 1.59            | 0.797       | 0.149   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 14.35           | 2.395       | 1.296   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 158.22          | 7.952       | 25.369  | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 1.81            | 0.851       | 1.595   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 1.65            | 0.812       | 11.637  | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |





ตาราง ค 2 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านล่าง)

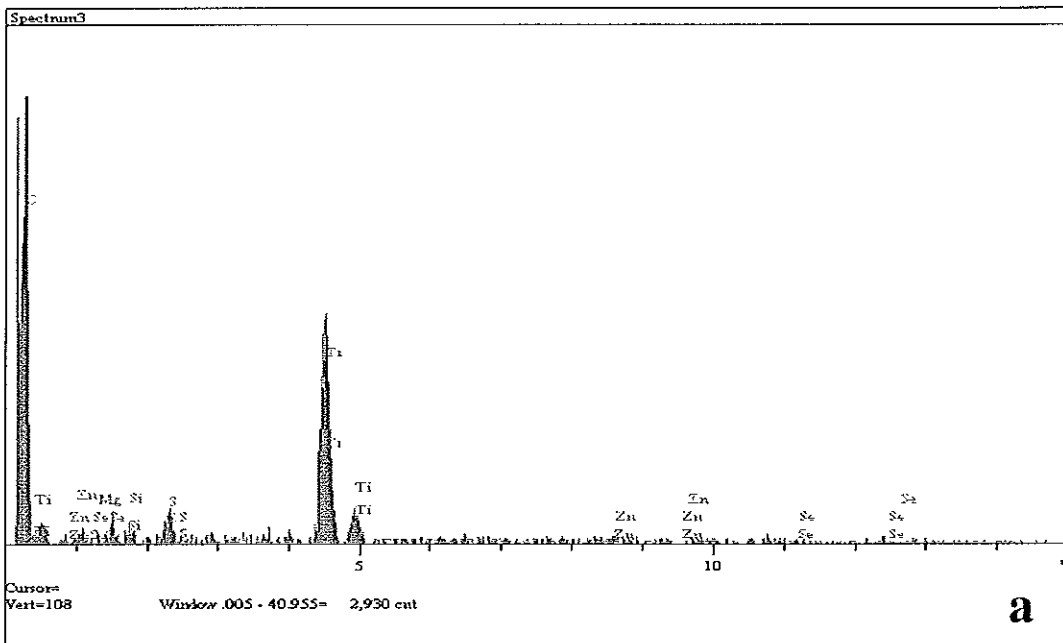
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 210.34          | 9.169       | 55.707  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 9.36            | 1.934       | 5.905   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 1.83            | 0.856       | 0.169   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 6.75            | 1.642       | 0.632   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 19.95           | 2.824       | 1.824   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 141.83          | 7.529       | 23.104  | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 2.72            | 1.043       | 2.438   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 1.42            | 0.754       | 10.220  | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |



รูปที่ ค 1 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG2 ที่ก่ามะถัน 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

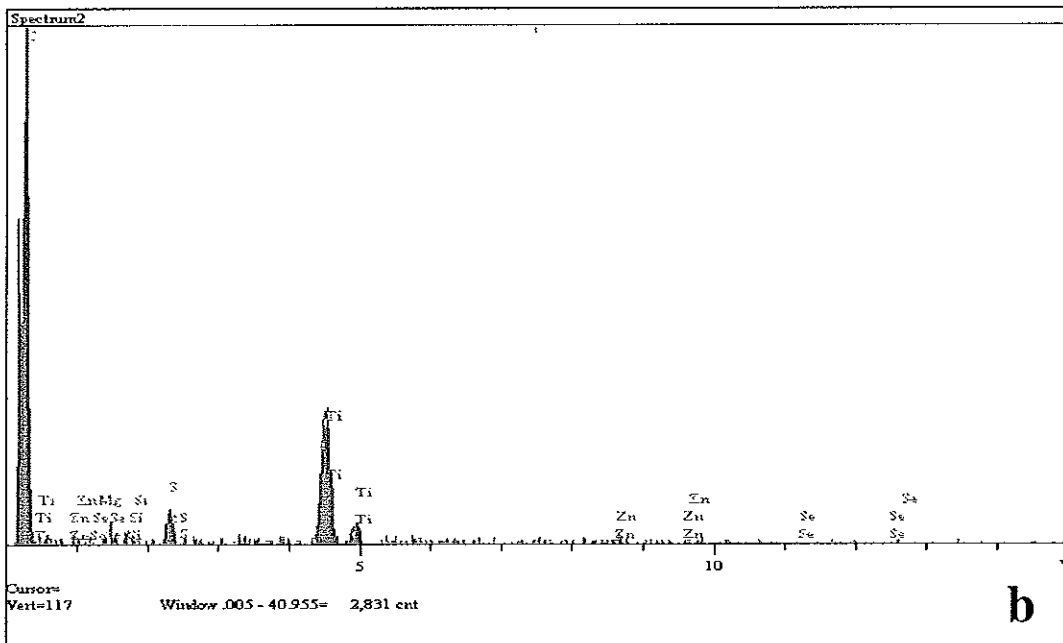
ตาราง ค 3 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านบน)

| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 108.47          | 6.586       | 66.785  | wt. % |       |
| O    | Ka   | 0.68            | 0.521       | 0.990   | wt. % |       |
| Mg   | Ka   | 0.56            | 0.474       | 0.118   | wt. % |       |
| Si   | Ka   | 1.81            | 0.850       | 0.401   | wt. % |       |
| S    | Ka   | 7.69            | 1.753       | 1.663   | wt. % |       |
| Ti   | Ka   | 38.95           | 3.947       | 14.977  | wt. % |       |
| Zn   | Ka   | 1.57            | 0.792       | 3.286   | wt. % |       |
| Se   | Ka   | 0.69            | 0.526       | 11.781  | wt. % |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt. % | Total |



ตาราง ค 4 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านล่าง)

| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 72.91           | 5.400       | 52.467  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 2.72            | 1.042       | 4.018   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.26            | 0.324       | 0.058   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 2.24            | 0.947       | 0.537   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 6.65            | 1.631       | 1.509   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 59.40           | 4.873       | 23.292  | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 1.36            | 0.737       | 2.883   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 0.89            | 0.596       | 15.235  | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |

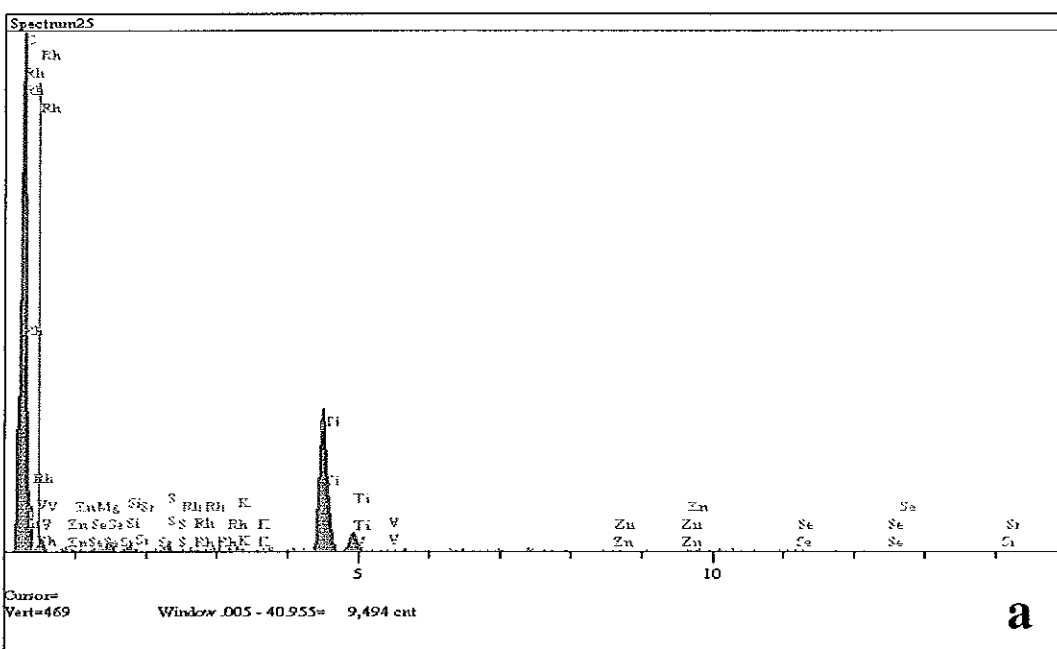


รูปที่ ค 2 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG5 ที่กัมมันต์ 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

2) फिल्मยางคอมปาวด์ ที่ตัวเร่ง TMTD ปริมาณ 0.5 phr

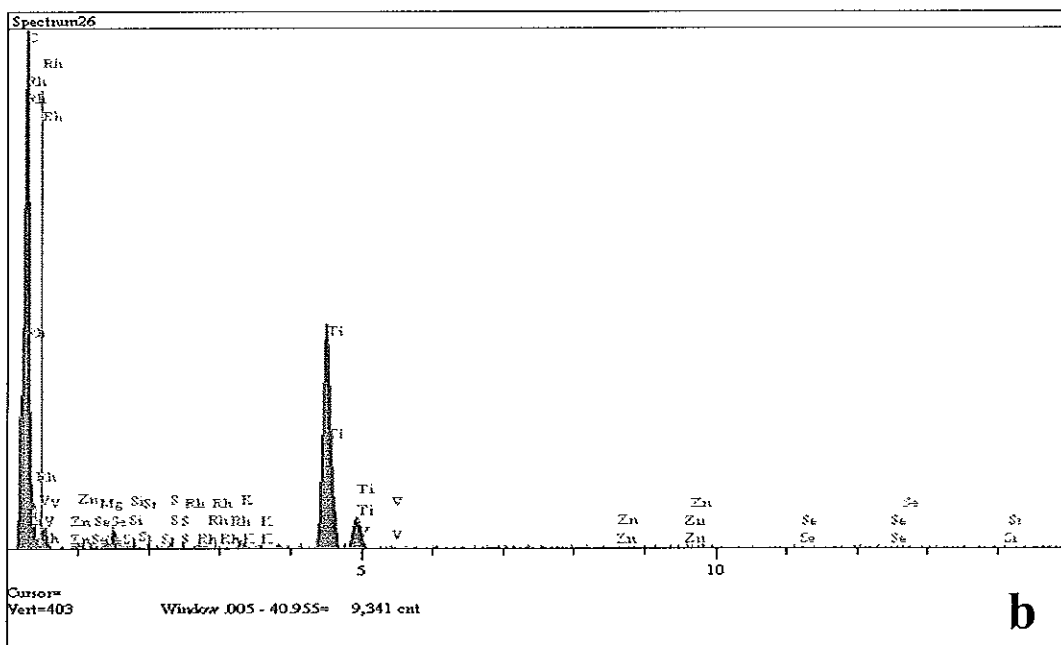
ตาราง ค 5 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านบน)

| El. | Line | Intensity<br>(c/s) | Error<br>2-sig | Conc    | Units |       |
|-----|------|--------------------|----------------|---------|-------|-------|
| C   | Ka   | 442.42             | 13.302         | 66.278  | wt. % |       |
| O   | Ka   | 6.53               | 1.616          | 2.801   | wt. % |       |
| Mg  | Ka   | 1.57               | 0.792          | 0.092   | wt. % |       |
| Si  | Ka   | 3.66               | 1.209          | 0.224   | wt. % |       |
| S   | Ka   | 6.37               | 1.596          | 0.385   | wt. % |       |
| K   | Ka   | 3.62               | 1.203          | 0.263   | wt. % |       |
| Ti  | Ka   | 163.78             | 8.093          | 17.833  | wt. % |       |
| V   | Ka   | 0.11               | 0.210          | 0.014   | wt. % |       |
| Zn  | Ka   | 1.96               | 0.885          | 1.171   | wt. % |       |
| Se  | Ka   | 2.13               | 0.922          | 10.261  | wt. % |       |
| Sr  | La   | 1.63               | 0.807          | 0.297   | wt. % |       |
| Rh  | La   | 2.04               | 0.903          | 0.382   | wt. % |       |
|     |      |                    |                | 100.000 | wt. % | Total |



ตาราง ค 6 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านล่าง)

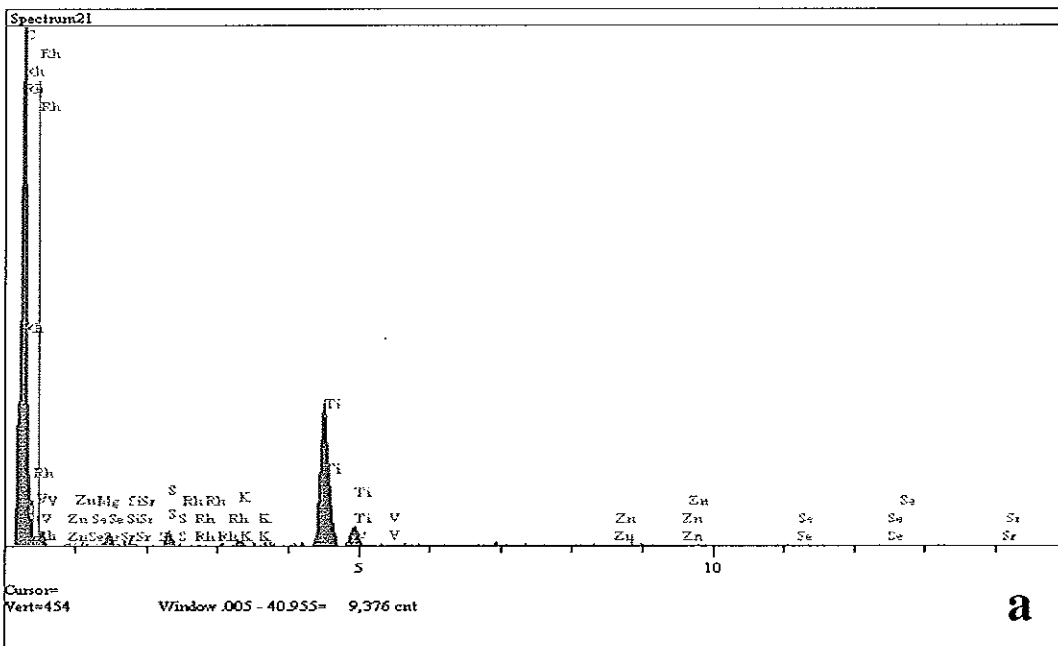
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 371.04          | 12.177      | 57.638  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 11.74           | 2.166       | 5.111   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 1.26            | 0.710       | 0.076   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 2.20            | 0.938       | 0.138   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 3.92            | 1.252       | 0.239   | wt.%  |       |
| K    | Ka   | 4.77            | 1.380       | 0.343   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 221.19          | 9.402       | 24.114  | wt.%  |       |
| V    | Ka   | 0.80            | 0.566       | 0.101   | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 1.01            | 0.636       | 0.606   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 2.25            | 0.948       | 10.809  | wt.%  |       |
| Sr   | La   | 1.19            | 0.688       | 0.219   | wt.%  |       |
| Rh   | La   | 3.38            | 1.162       | 0.606   | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |



รูปที่ ค 3 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG2 ที่กำมะถัน 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

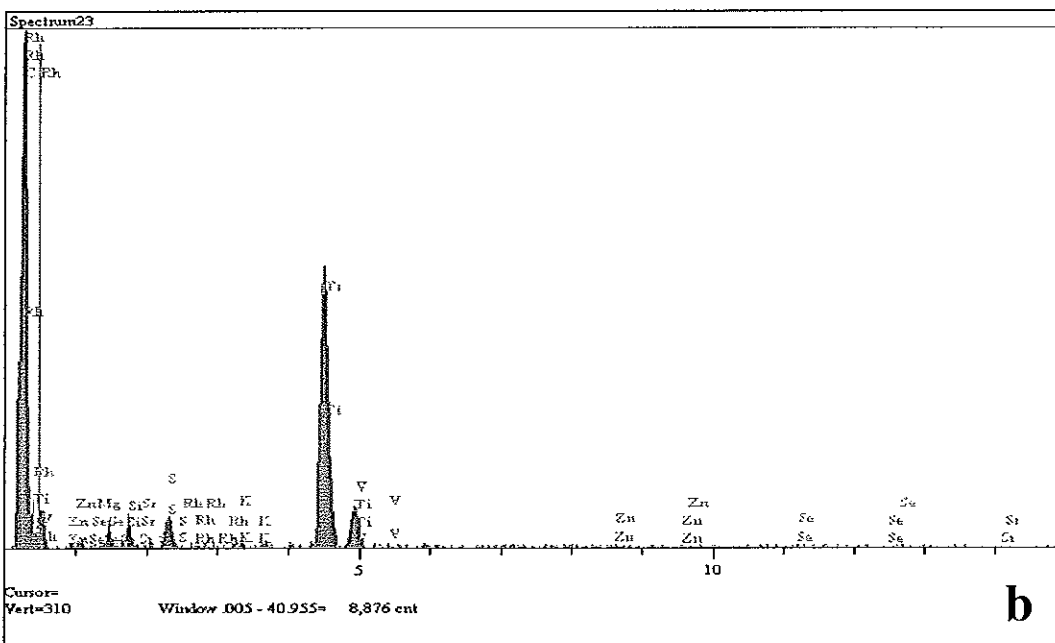
ตาราง ค 7 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านบน)

| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 435.79          | 13.202      | 65.323  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 8.56            | 1.850       | 3.280   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.42            | 0.408       | 0.022   | wt.%  |       |
| Al   | Ka   | 11.09           | 2.106       | 0.655   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 2.89            | 1.075       | 0.166   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 12.70           | 2.254       | 0.716   | wt.%  |       |
| K    | Ka   | 5.57            | 1.493       | 0.377   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 159.66          | 7.991       | 16.062  | wt.%  |       |
| V    | Ka   | 0.15            | 0.244       | 0.017   | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 2.64            | 1.027       | 1.446   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 2.56            | 1.013       | 11.415  | wt.%  |       |
| Sr   | La   | 1.91            | 0.873       | 0.327   | wt.%  |       |
| Rh   | La   | 1.08            | 0.658       | 0.193   | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |



ตาราง ค 8 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านล่าง)

| Elf. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 294.10          | 10.846      | 53.791  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 13.47           | 2.321       | 5.741   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.33            | 0.361       | 0.020   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 11.51           | 2.145       | 0.742   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 19.00           | 2.757       | 1.191   | wt.%  |       |
| K    | Ka   | 3.96            | 1.259       | 0.292   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 214.28          | 9.258       | 23.666  | wt.%  |       |
| V    | Ka   | 2.20            | 0.939       | 0.281   | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 2.34            | 0.967       | 1.409   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 2.51            | 1.003       | 12.188  | wt.%  |       |
| Sr   | La   | 1.68            | 0.818       | 0.317   | wt.%  |       |
| Rh   | La   | 1.92            | 0.877       | 0.363   | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |

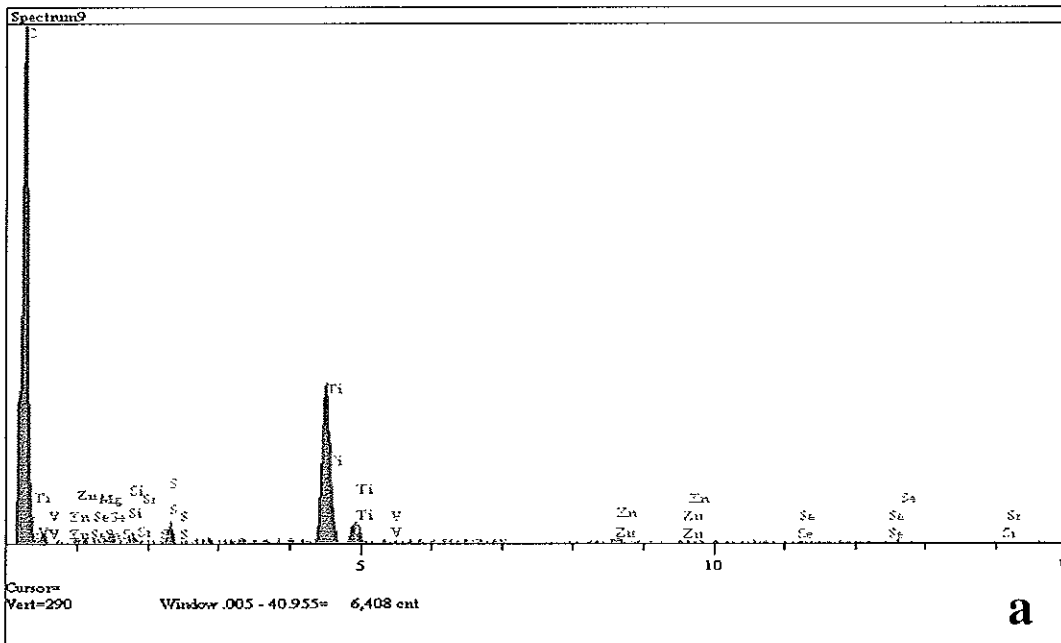


รูปที่ ค 4 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG5 ที่กัมมันต์ 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

### 3) फिल्मยางคอมปาวด์ ที่ตัวเร่ง CBS ปริมาณ 0.5 phr

ตาราง ค 9 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านบน)

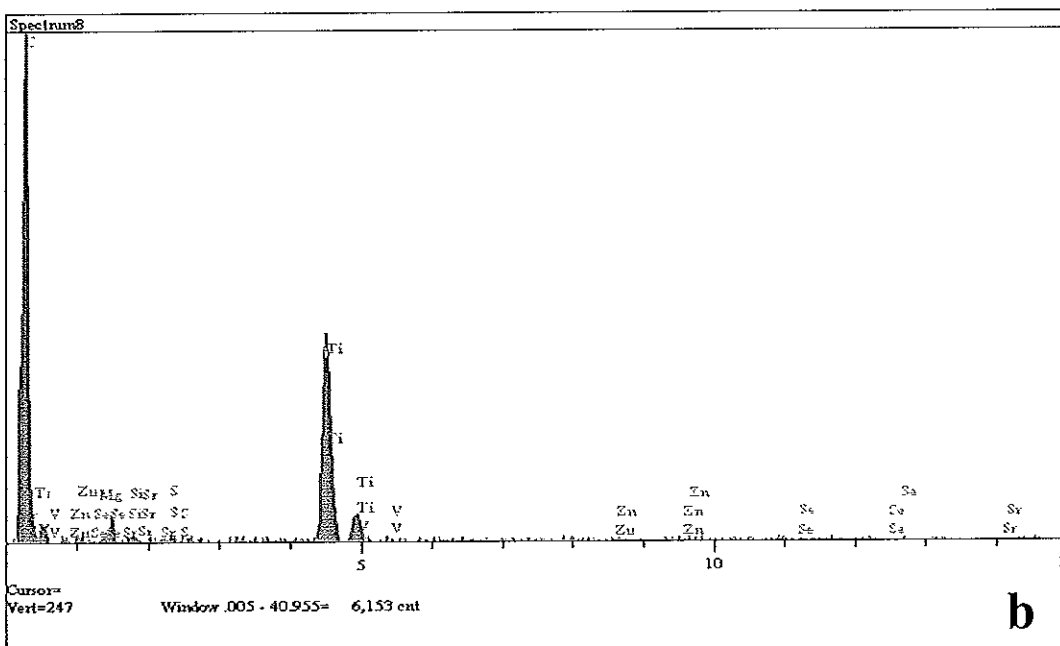
| El. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|-----|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C   | Ka   | 273.42          | 10.456      | 64.422  | wt.%  |       |
| O   | Ka   | 4.44            | 1.332       | 2.595   | wt.%  |       |
| Mg  | Ka   | 0.36            | 0.379       | 0.031   | wt.%  |       |
| Si  | Ka   | 1.61            | 0.803       | 0.142   | wt.%  |       |
| S   | Ka   | 9.57            | 1.956       | 0.827   | wt.%  |       |
| Ti  | Ka   | 111.72          | 6.684       | 17.127  | wt.%  |       |
| Zn  | Ka   | 4.05            | 1.272       | 3.401   | wt.%  |       |
| Se  | Ka   | 1.59            | 0.799       | 10.826  | wt.%  |       |
| Sr  | La   | 2.40            | 0.980       | 0.629   | wt.%  |       |
|     |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |





ตาราง ค 10 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG2 (ผิวด้านล่าง)

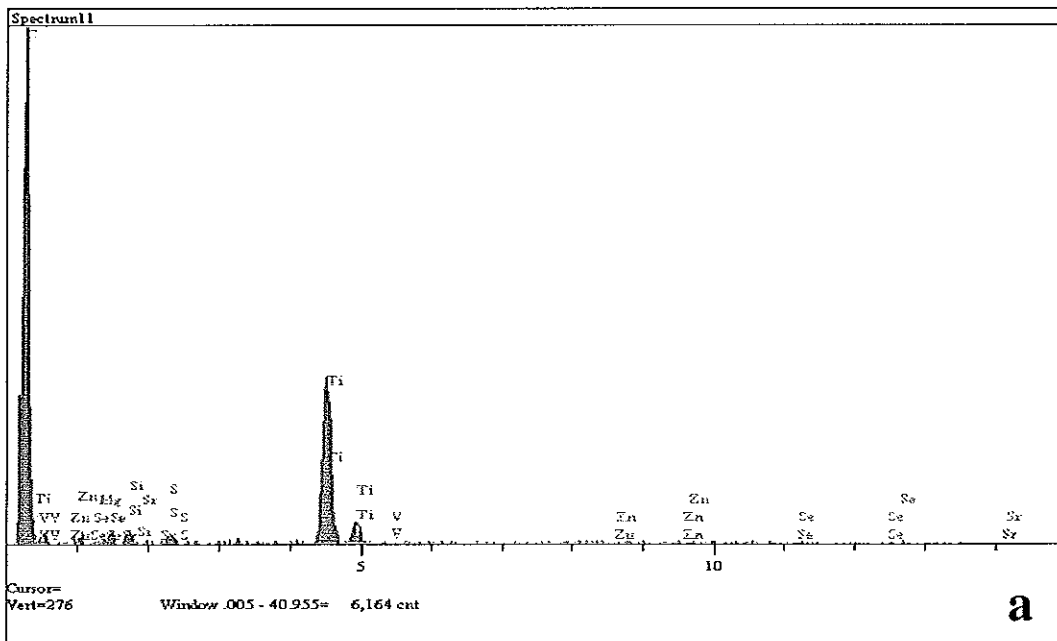
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 238.06          | 9.756       | 60.221  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 5.78            | 1.520       | 4.036   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.42            | 0.412       | 0.042   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 1.46            | 0.765       | 0.146   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 2.50            | 1.000       | 0.246   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 128.87          | 7.178       | 22.557  | wt.%  |       |
| V    | Ka   | 0.73            | 0.542       | 0.149   | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 2.17            | 0.932       | 2.097   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 1.29            | 0.718       | 9.993   | wt.%  |       |
| Sr   | La   | 1.74            | 0.833       | 0.514   | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |



รูปที่ ค 5 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG2 ที่กำมะถัน 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

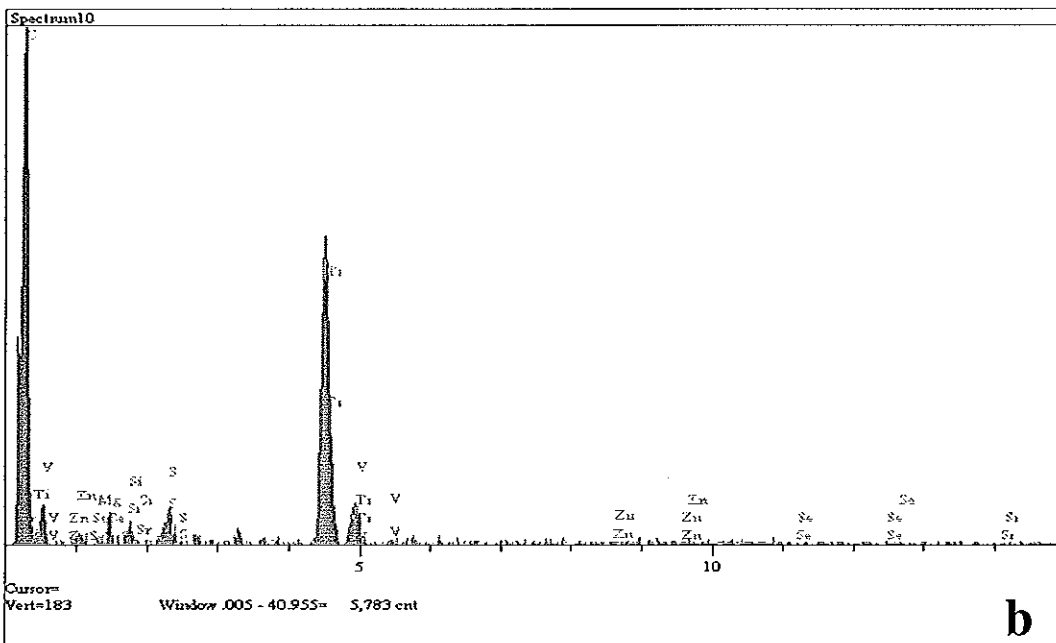
ตาราง ค 11 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านบน)

| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|------|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C    | Ka   | 257.02          | 10.136      | 63.128  | wt.%  |       |
| O    | Ka   | 3.68            | 1.212       | 2.117   | wt.%  |       |
| Mg   | Ka   | 0.53            | 0.462       | 0.043   | wt.%  |       |
| Si   | Ka   | 5.44            | 1.475       | 0.492   | wt.%  |       |
| S    | Ka   | 5.26            | 1.451       | 0.458   | wt.%  |       |
| Ti   | Ka   | 113.76          | 6.744       | 17.308  | wt.%  |       |
| Zn   | Ka   | 1.50            | 0.773       | 1.227   | wt.%  |       |
| Se   | Ka   | 2.26            | 0.950       | 15.122  | wt.%  |       |
| Sr   | La   | 0.39            | 0.396       | 0.106   | wt.%  |       |
|      |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |



ตาราง ค 12 ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางที่สารแขวนลอย T5PEG5 (ผิวด้านล่าง)

| El. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc    | Units |       |
|-----|------|-----------------|-------------|---------|-------|-------|
| C   | Ka   | 182.20          | 8.534       | 53.329  | wt.%  |       |
| O   | Ka   | 10.07           | 2.007       | 7.641   | wt.%  |       |
| Mg  | Ka   | 0.15            | 0.247       | 0.017   | wt.%  |       |
| Si  | Ka   | 5.26            | 1.450       | 0.563   | wt.%  |       |
| S   | Ka   | 12.68           | 2.251       | 1.346   | wt.%  |       |
| Ti  | Ka   | 138.68          | 7.445       | 26.406  | wt.%  |       |
| V   | Ka   | 0.43            | 0.416       | 0.095   | wt.%  |       |
| Zn  | Ka   | 1.92            | 0.876       | 2.027   | wt.%  |       |
| Se  | Ka   | 0.94            | 0.614       | 7.937   | wt.%  |       |
| Sr  | La   | 2.05            | 0.904       | 0.640   | wt.%  |       |
|     |      |                 |             | 100.000 | wt.%  | Total |

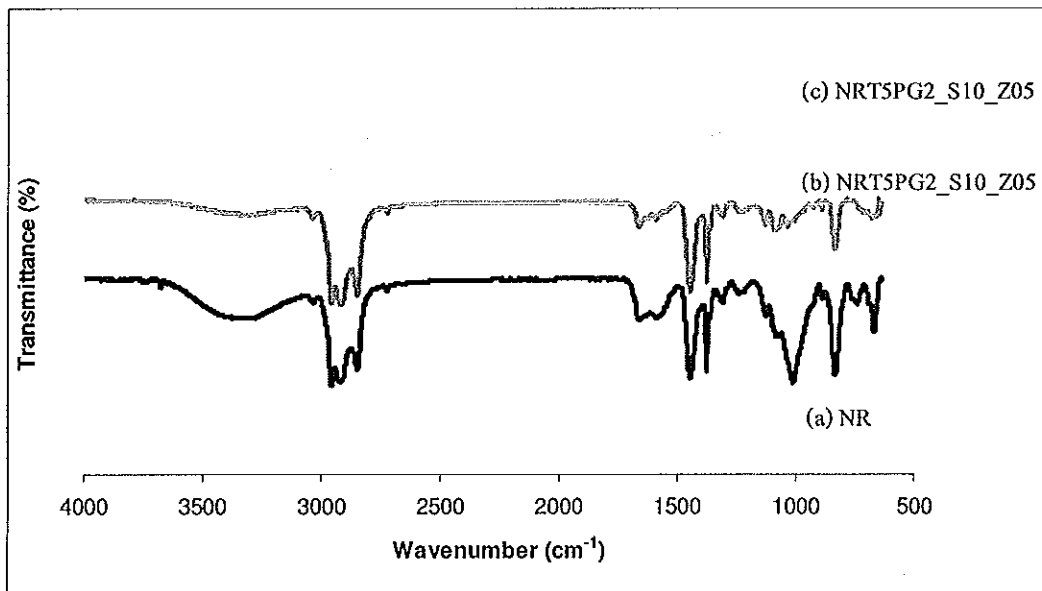


รูปที่ ค 6 ปริมาณสารประกอบที่ผสมสารแขวนลอย T5PEG5 ที่กำมะถัน 1 phr a) ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศ, b) ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับกระจก

## ภาคผนวก ง

## FT-IR ของฟิล์มบางธรรมชาติคอมโพสิต

อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มบางธรรมชาติและฟิล์มบาง NR ผสมสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ชนิด T5PEG2 และ T5PEG5 โดยสัญญาณการดูดกลืนแสงของยาง NR ปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ คือ ที่ตำแหน่ง  $2529 \text{ cm}^{-1}$  เป็น CH-aliphatic,  $1660$  และ  $834 \text{ cm}^{-1}$  เป็น C=C,  $1370$  และ  $1446 \text{ cm}^{-1}$  เป็น  $\text{CH}_2$  และ  $\text{CH}_3$  ตามลำดับ



รูปที่ ง 1 ATR-FTIR สเปกตรัมของ a) NR, b) NRT5PG2\_S10\_Z05, c) NRT5PG5\_S10\_Z05

## ภาคผนวก จ

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. การประชุมวิชาการนานาชาติ The 12<sup>th</sup> International Seminar on Elastomers 2010 and 2<sup>nd</sup> Thailand-Japan Rubber Symposium

**Preparation and Characterization of Natural Rubber Latex  
Composite with TiO<sub>2</sub>**

**Kritsada Phatcharasi<sup>1</sup>, Lek Srikong<sup>2#</sup> and Wirach Taweepreda<sup>1#</sup>**

<sup>1</sup>Membrane Science and Technology Research Center, Department of Material Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songhkla 90112, Thailand

<sup>2</sup>Department of Mining and Material Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

#NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songhkla 90110

Phone 0-86-7785004, Fax. 074-446925, E-Mail: wirach.t@psu.ac.th

**Abstract**

Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) composite films were prepared by casting the natural rubber (NR) latex compounding with high loading TiO<sub>2</sub> dispersion on glass surface. The dispersion of TiO<sub>2</sub> was prepared by milling grounded TiO<sub>2</sub> in water for 75% by wt. with poly(ethylene glycol), PEG, acted as dispersing agent. High loading TiO<sub>2</sub> dispersion (50 phr) leads to the aggregate structure of TiO<sub>2</sub> on latex film investigated by scanning electron microscopy (SEM). The mechanical properties of the rubber composite were also investigated aggregation by measuring tensile strength and elongation at break before and after thermal ageing.

## 1. Introduction

Natural rubber (NR) properties can be improved by incorporation of rigid particles such as carbon black, silica, clays, calcium carbonate, and carbon nanotube etc.[1,2] The addition of nanofiller usually enhancement the rubber modulus and improvements in abrasion and tear resistance. Because of the scientific and commercial importance of these materials, numerous efforts have focused to understand the behavior of nanofillers on the performance of an elastomeric matrix. In this paper, the dispersion of TiO<sub>2</sub> in NR latex film and the effect of high filler loading on mechanical properties of rubber were investigated.

## 2. Experimental

### Preparation of TiO<sub>2</sub> dispersion

Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub> (R-902, Dupont Co., Ltd.) was dispersed in water for 75% by wt. with 2% by wt. dispersing agent poly(ethylene glycol), PEG (Honam Petrochemical, Co., Ltd.). The dispersion was prepared by using ball mill for 72 hours.

### Preparation of natural rubber (NR) and TiO<sub>2</sub> composites

TiO<sub>2</sub> dispersion was mixed with NR latex and other chemicals as formula as shown in table 1. The latex compound was cast on flat glass before drying at room temperature. Then the TiO<sub>2</sub> composite films were vulcanized at 150°C in air-oven.

Table 1 Formulation of compounding ingredients.

| Ingredient                      | Part per hundred rubber |
|---------------------------------|-------------------------|
| Concentrated NR latex (60%DRC)  | 100.0                   |
| 50% Sulfur dispersion           | 1.0                     |
| 50% ZDEC dispersion             | vary                    |
| 75% TiO <sub>2</sub> dispersion | 50                      |

### Characterization of TiO<sub>2</sub> composite film

Surface morphology of the TiO<sub>2</sub> dispersion, and composite NR latex films were studied using scanning electron microscope (SEM), HITACHI SU-1500 and atomic force microscope (AFM), Park System XE70

The mechanical properties of TiO<sub>2</sub> composite film were carried out on a LLOYD instrument tensile tester. The samples were cut into dumbbell shape with dimension according to ASTM D412 (die C). Aging of the dumbbell specimens were carried out at 100 °C for 24 hr. in air-oven. Tensile properties were operated at a cross-head speed of 500 mm/min.

### 3. Results and Discussions

TiO<sub>2</sub> particles disperse in water with average particle size 200 nm as illustrated in fig.1.

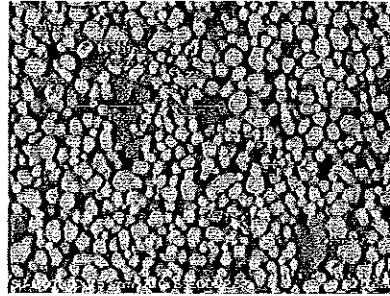


Fig. 1 SEM image of TiO<sub>2</sub> dispersion

The TiO<sub>2</sub> particles distribute on the latex film with aggregate form. Some part of aggregate TiO<sub>2</sub> will be covered by NR after the vulcanization process as shown in fig. 2.

The concentration of accelerator ZDEC is not effect on the distribution of TiO<sub>2</sub> on latex film as shown in fig. 3 because of high loading of filler.

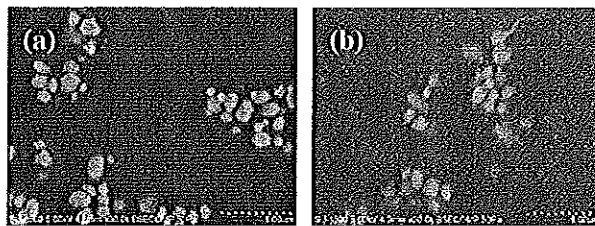


Fig. 2 SEM images of TiO<sub>2</sub> composites film drying at (a) 60 °C and (b) 150 °C.

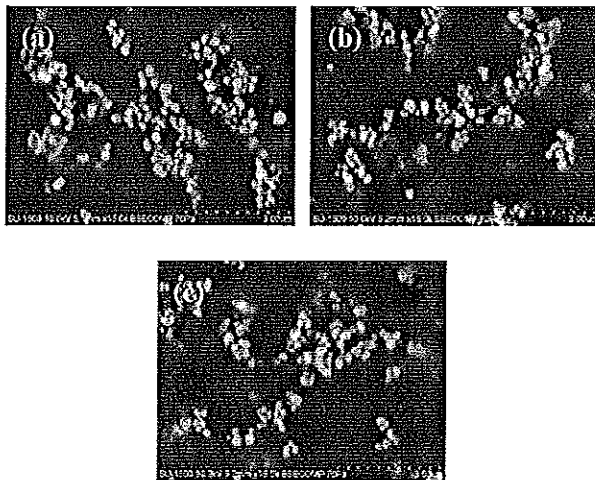
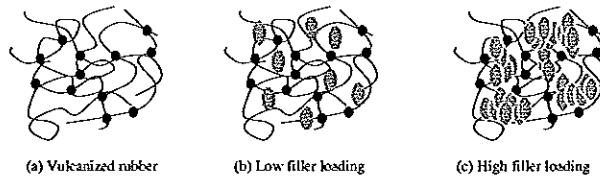


Fig. 3 SEM mages of vulcanized TiO<sub>2</sub> composites film by varying ZDEC for (a) 0.5 phr (b) 1.0 phr and (c) 2.0 phr.

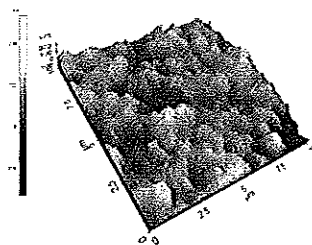
The same trend of behavior was observed by Derham [4] in carbon-black-filled rubber. At low loading, the chances of forming aggregates are comparatively less and hence good dispersion of the fillers is achieved as illustrated in fig. 4.



**Fig. 4** Schematic representation of unfilled and filled vulcanized rubber

The surface of composite film which is investigated by AFM found that the surface is roughness covered with  $\text{TiO}_2$  particle as shown in fig. 5.

The tensile properties of composite films before and after ageing were found that the tensile strength and elongation at break are not changed even through the concentration of ZDEC is increased from 0.5 to 2.0 phr as shown in fig. 6. Normally, increasing the accelerator concentration and the ratio of accelerator with sulfur affects the mechanical properties of the vulcanized rubber. High concentration of accelerator or the ratio of accelerator with sulfur more than 1 promote the effective vulcanization [1].



**Fig. 5** AFM image of vulcanized  $\text{TiO}_2$  composite film.



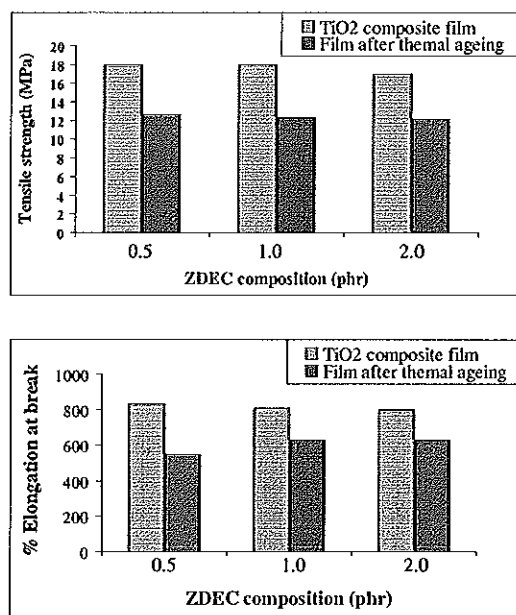


Fig. 6 Tensile strength and elongation at break of composite films before and after thermal ageing.

#### 4. Conclusions

NR latex composite with TiO<sub>2</sub> is simple to form a thin film. TiO<sub>2</sub> particles form aggregate structure with high loading and distribute on the composite film. The mechanical properties of composite films covered by TiO<sub>2</sub> are not changed with increasing the concentration of ZDEC. This event indicated that rubber particle may be dispersed in TiO<sub>2</sub> matrix.

#### Acknowledgement

This work has been partially support by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of excellence network. KP would like to thank Faculty of Science, Prince of Songkla University for supporting M.Sc. scholarship.

#### References

- [1] Blow, C.M., *Rubber Technology and Manufacture*, Butterworths, London, 1971.
- [2] Varghese, S.; Karger-Kocsis, J., Natural rubber-based nanocomposites by latex compounding with layered silicates, *Polymer* 2003, **44**, pp. 4921-4927.
- [3] Meera, A.P.; Said, A.; Grohens, Y.; Luyt, A.S.; Thomas, S., Tensile stress relaxation studies of TiO<sub>2</sub> and nanosilica filled natural rubber composites, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, **48**, pp. 3410-3416

## 2. การประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2010 (SPC 2010)

SPC2010  
River Kwai Village Hotel, Kanchaburi, THAILAND

Poster Presentation

### **Membrane for Gas Separation from Micro Composites of Natural Rubber with TiO<sub>2</sub>**

*W. Taweepreda<sup>1,2</sup>, and K. Phatcharasi<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Membrane Science and Technology Research Center, Department of Material Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, 90112

<sup>2</sup>ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

#### *Abstract*

The gas permeability coefficient of micro composites of natural rubber (NR) with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) has been investigated with special reference to type of gases, pressure, and TiO<sub>2</sub> loading. The composite membrane was characterized by X-ray diffraction technique. The dispersion of TiO<sub>2</sub> in the rubber matrix was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The physical properties of membrane were measured by tensile strength testing. The TiO<sub>2</sub> dispersed in PEG showed good dispersion in rubber matrix and it was observed that high TiO<sub>2</sub> loading enhance the gas barrier properties. The physical crosslink density of membrane was studied by x-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES) exhibit the correlation with the gas barrier properties. The diffusion of oxygen/nitrogen gases through the membrane were investigated by time-lag method and diffusion selectivity was computed.

**Keyword:** natural rubber latex; membrane; titanium dioxide; x-ray absorption near edge structure spectroscopy; XANES; gas separation



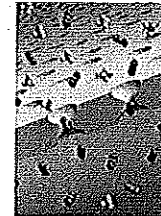
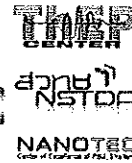
# Membrane for Gas Separation from Micro Composites of Natural Rubber with TiO<sub>2</sub>

Wirach Taweeprada<sup>1,2</sup>, and Krisada Phatcharasit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Membrane Science and Technology Research Center, Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110

<sup>2</sup>ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

Corresponding Author E-Mail Address: wirach.t@psu.ac.th



## ABSTRACT

The gas permeability coefficient of micro composites of natural rubber (NR) with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) has been investigated with special reference to type of gases, pressure, and TiO<sub>2</sub> loading. The composite membrane was characterized by X-ray diffraction technique. The dispersion of TiO<sub>2</sub> in the rubber matrix was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The physical properties of membrane were measured by tensile strength testing. The TiO<sub>2</sub> dispersed in PEG showed good dispersion in rubber matrix and it was observed that high TiO<sub>2</sub> loading enhance the gas barrier properties. The physical crosslink density of membrane was studied by x-ray absorption near edge structure spectroscopy (XANES) exhibit the correlation with the gas barrier properties. The diffusion of oxygen/nitrogen gases through the membrane were investigated by time-lag method and diffusion selectivity was computed.

## Introduction:



Thailand is the largest natural rubber (NR) producer and exporter in the world. NR value added by processing to many products such as tires, rubber gloves, condoms, balloons, and parts, cushions, and elastic bands. However, large manufacturing industries are held by the leading export markets for Thai rubber such as the USA, Japan, China, Malaysia and South Korea. 90% of NR production in Thailand is exported. In this study, the NR is applied for gas separation membrane. NR properties is improved by TiO<sub>2</sub> micro-composite.

## Experimental:



Dispersion of TiO<sub>2</sub> in a matrix with PEG (left) and SEM image



NR latex

### Preparation of TiO<sub>2</sub> Composites Natural Rubber Membrane (CNR membrane)

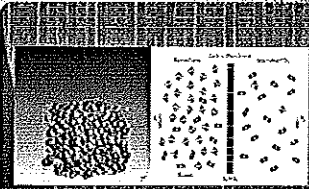
Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub> (R-502, Degussa Co., Ltd.) was dispersed in water for 24h by wet dispersing agent polyethylene glycol, PEG (Hexamethylenediol, Co., Ltd). TiO<sub>2</sub> particles disperse in water with average particle size 200 nm. The dispersion was prepared by using ball mill for 72 hours. TiO<sub>2</sub> dispersion was mixed with NR latex and other chemicals before casting on flat glass and drying at room temperature. Then the TiO<sub>2</sub> composite films were vulcanized at 150°C in air oven.

### Characterization of TiO<sub>2</sub> composite film

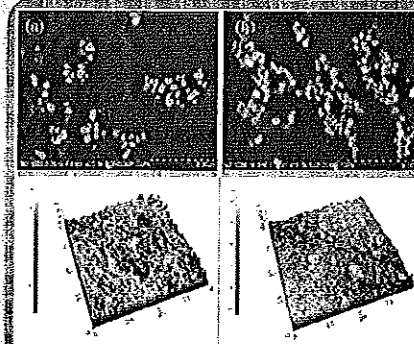
Surface morphology of the TiO<sub>2</sub> dispersion and composite NR latex films were studied using scanning electron microscope (SEM), HITACHI SU-1500 and atomic force microscope (AFM), Park System XE70.

## Results and Discussion:

The TiO<sub>2</sub> particles distributed on the NR film with aggregate form. Some part of aggregate TiO<sub>2</sub> will be covered by NR after the vulcanization process. The AFM image indicated that the TiO<sub>2</sub> CNR membrane has surface properties similar with NR latex and NR membrane TiO<sub>2</sub> film.



| Penetrant Molecule | D (10 <sup>-7</sup> cm <sup>2</sup> /s) |
|--------------------|-----------------------------------------|
| CH <sub>4</sub>    | 5.0                                     |
| N <sub>2</sub>     | 3.5                                     |
| O <sub>2</sub>     | 3.0                                     |
| CO <sub>2</sub>    | 3.1                                     |

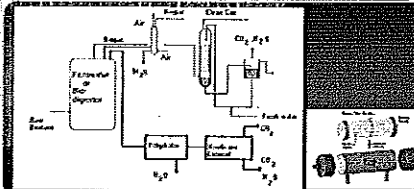


The diffusion coefficients of gases in TiO<sub>2</sub> composite NR membrane were calculated by the permeability test results in above diagram.

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{6t} \left( \sum_{i=1}^n r_i^2 \right)$$

The results of gas diffusion coefficient (D) indicated that TiO<sub>2</sub> composite NR membrane might be used for purification of methane from other gases and can be applied for Biogas production. Biogas has become an attractive energy source due to the limitation of energy from fossil. However, the use of biogas is limited by its low quality.

SEM and AFM images of composite NR latex films



## Acknowledgement:

This work was partially supported by NANOTEC Center of Excellence of Prince of Songkla University. Authors would like to thank Park Systems Corporation for SEM and AFM images. Membrane Science and Technology Research Center and Polymer Science Program, Prince of Songkla University for supporting facilities.

## ประวัติผู้เขียน

|                                             |                          |                     |
|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล                                   | นายกฤษฎา พัทธสิทธิ์      |                     |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา                        | 5110220001               |                     |
| วุฒิการศึกษา                                |                          |                     |
| วุฒิ                                        | ชื่อสถาบัน               | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิทยาศาสตร์บัณฑิต<br>(วิทยาศาสตร်พอลิเมอร์) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2551                |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และทุนผู้ช่วยวิจัย (Research Assistant) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Kritsada Phatcharasit, Lek Srikong and Wirach Taweepreda. "Preparation and Characterization of Natural Rubber Latex Composite with TiO<sub>2</sub>." The 12<sup>th</sup> International Seminar on Elastomers 2010 and 2<sup>nd</sup> Thailand-Japan Rubber Symposium, March 8-11, 2010. The Holliday Inn Resort Regent Beach Cha-am, Thailand.

Wirach Taweepreda, and Krisada Phatcharasit. "Membrane for Gas Separation from Micro Composites of Natural Rubber with TiO<sub>2</sub>." Siam Physics Congress 2010 (SPC 2010), March 25-27, 2010. River Kwai Village Hotel, Kanchaburi, Thailand.