

การกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำมันซิลิโคนโดยใช้สารช่วยกระจายตัว  
พอลิ (เอทิลีนไกลคอล-บี-ไดเมทิลไซลอกเซน-บี-เอทิลีนไกลคอล) ไตรบลิคโคพอลิเมอร์



นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISPERSION OF TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES IN SILICONE OIL USING POLY  
(ETHYLENE GLYCOL-B-DIMETHYLSILOXANE-B-ETHYLENE GLYCOL) TRIBLOCK  
COPOLYMER AS DISPERSANTS



Mr. Surachet Toommee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511638

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำมัน  
ซิลิโคนโดยใช้สารช่วยกระจายตัว พอลิ(เอทิลีนไกลคอล-บี-ได  
เมทิลไซลออกเซน-บี-เอทิลีนไกลคอล)ไตรบลิคโคพอลิเมอร์

โดย

นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาด ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาด ไตรผล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. รักชาติ ไตรผล)


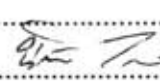
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธุ์ เจียมศิริเลิศ)

สรุปรายชื่อ : การกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำมันซิลิโคนโดยใช้สารช่วยกระจายตัว พอลิ (เอทิลีนไกลคอล-บี-ไดเมทิลไซลอกเซน-บี-เอทิลีนไกลคอล) ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์. (DISPERSION OF TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES IN SILICONE OIL USING POLY (ETHYLENE GLYCOL-B- DIMETHYLSILOXANE-B-ETHYLENE GLYCOL) TRIBLOCK COPOLYMER AS DISPERSANTS) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. นิคานาถ ไตรผล, 97 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในตัวของน้ำมันซิลิโคน ที่ใช้พอลิ (เอทิลีนไกลคอล-บี-ไดเมทิลไซลอกเซน-บี-เอทิลีนไกลคอล) ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยศึกษาถึงผลของโครงสร้างโมเลกุลและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ต่อการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอย จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันไม่ส่งผลชัดเจนต่อพฤติกรรมการไหลตัวและความเสถียรของสารแขวนลอย แต่ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติของสารแขวนลอย คือ สารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและสารแขวนลอยมีความเสถียรสูง ส่วนสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้มีปริมาณสารช่วยกระจายตัวมากเกินไปทำให้สารแขวนลอยไม่เสถียร ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการดูดซับบนพื้นผิวอนุภาคของสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าโคพอลิเมอร์ชนิดนี้มีส่วนช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรในตัวของน้ำมันซิลิโคน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา: วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต: .....  
สาขาวิชา: เทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: .....  
ปีการศึกษา: 2551.....

## 4972543223: MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD: TITANIUM DIOXIDE/ NANOPARTICLE/ DISPERSANT/ SILICONE OIL

SURACHET TOOMMEE : DISPERSION OF TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES  
IN SILICONE OIL USING POLY (ETHYLENE GLYCOL-B-DIMETHYLSILOXANE-B-  
ETHYLENEGLYCOL) TRIBLOCK COPOLYMER AS DISPERSANTS .THESIS

PRINCIPAL ADVISOR: ASST.PROF.NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., 97 pp.

Preparation of titanium dioxide nanoparticles in silicone oil suspension using Poly (ethyleneglycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers as dispersants was studied in this research. Effects of dispersants molecular structures and concentrations on dispersion and stability of the suspensions were investigated. It was found that the dispersant structures insignificantly affected rheological behavior and stability of the suspensions. The dispersant concentrations, on the other hand, caused variations in the suspension properties. The suspensions prepared with low dispersant concentrations (0.2 and 1.0 wt%) were well-dispersed and highly stable. High dispersant concentration of 5.0 wt% resulted in over deflocculation and unstable suspensions. The results can be explained through the adsorption behavior of the copolymers on particle surface at various dispersant concentrations. In addition, it was found that the copolymers promoted dispersion of titanium dioxide nanoparticles in silicone oil.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: Materials Science .....Student's Signature:.....

Field of Study: Ceramic Technology..... Principle Advisor's Signature:.....

Academic year: 2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผศ. ดร. นิคานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่สั่งสอนวิชาและให้คำปรึกษา ปัญหาต่าง ๆ

อาจารย์ ดร. รักชาติ ไตรผล (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร) ที่กรุณาให้ความรู้ ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านบุคลากร สถานที่ เครื่องมือและสนับสนุนค่าใช้จ่ายในระหว่างทำวิจัย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินในการทำวิจัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทำวิจัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและคำปรึกษาตลอดระยะเวลาในการศึกษามาด้วยดีโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวของผู้เขียนทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทำให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณยวิทย์ทรัพย์ยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โทเทเนียมไดออกไซด์.....	4
2.2 น้ำมันซิลิโคน.....	6
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำมันซิลิโคน.....	6
2.2.2 สมบัติและการใช้งานของน้ำมันซิลิโคน.....	6
2.3 Poly (ethyleneglycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer.....	7
2.3.1 วิธีการสังเคราะห์.....	7
2.3.2 การนำไปใช้งาน.....	9
2.4 นาโนเทคโนโลยีและอนุภาคระดับนาโน.....	9
2.4.1 ข้อดีของนาโนเทคโนโลยี.....	10
2.4.2 ข้อเสียของนาโนเทคโนโลยี.....	10
2.5 พฤติกรรมการไหลของของไหล.....	11
2.5.1 ของไหลแบบนิวโทเนียน (newtonian fluid).....	11
2.5.2 ของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (non-newtonian fluid).....	11
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล.....	14
2.5.4 ค่าความหนืด.....	15
2.6 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย.....	16

2.7 สารช่วยกระจายตัว (Dispersant) .....	19
2.7.1 ความหมายของสารช่วยกระจายตัว .....	19
2.7.2 ประเภทของสารช่วยกระจายตัว .....	20
2.7.3 การดูดซับของพอลิเมอร์บนพื้นผิว .....	21
2.8 ทฤษฎีการหักเห การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุ .....	22
2.8.1 แสงและสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	22
2.8.2 การหักเหของแสง .....	23
2.8.2.1 ดัชนีหักเหของแสง .....	26
2.8.2.2 กฎการหักเหแสงของสเนลล์ .....	26
2.8.3 การดูดกลืน การส่องผ่านและการสะท้อนของแสง .....	26
2.8.3.1 วัสดุโลหะ .....	26
2.8.3.2 วัสดุกระจกซิลิเกต .....	26
2.8.3.3 วัสดุพลาสติก .....	29
2.9 ผลงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง .....	29
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>36</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	36
3.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	37
3.1.2 น้ำมันซิลิโคน .....	36
3.1.3 สารช่วยกระจายตัว .....	36
3.2 สมบัติทางกายภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	36
3.2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	37
3.2.2 ขนาดของอนุภาคเดี่ยว .....	38
3.3 กระบวนการเตรียมสารแขวนลอย .....	38
3.4 สมบัติของสารแขวนลอย .....	39
3.4.1 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย .....	39
3.4.2 สมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต .....	40
3.4.3 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย .....	40
3.4.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย .....	40
3.5 วิธีการแยกอนุภาคระดับนาโนในสารแขวนลอย .....	41
3.6 สมบัติของสารส่วนลอย (Supernatant) .....	42



บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	43
4.1 สมบัติทางกายภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	43
4.1.1 โครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	43
4.1.2 ขนาดของอนุภาคเดี่ยว .....	44
4.2 สมบัติของสารแขวนลอย .....	45
4.2.1 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย .....	45
4.2.2 สมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต .....	58
4.2.3 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย .....	68
4.2.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย .....	77
4.3 สมบัติของสารส่วนลอย .....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	90
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	90
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	91
รายการอ้างอิง .....	92
ภาคผนวก .....	94
ภาคผนวก ก ตารางแสดง Certificate of Analysis ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (K37277308 719 , Merck KGaA , Germany) .....	95
ภาคผนวก ข ตารางแสดง Certificate of Analysis ของน้ำมันซิลิโคน (MFCD00003269 , Fluka chemika , Switzerland) .....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	97

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
ตารางที่ 2.2 ดัชนีหักเหของแสงของวัสดุบางชนิด.....	24
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมในการเตรียมสารแขวนลอย.....	39
ตารางที่ 4.1 การวัดมาตรฐาน JCPDS (21-1272) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด anatase.....	44



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิโคน (polysiloxane) .....	6
รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์ PEG-PDMS-PEG triblock copolymer .....	8
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียน .....	11
รูปที่ 2.5 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดเสมือนพลาสติก.....	12
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดไดลาแทนด์.....	12
รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดพลาสติก .....	13
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียน thixotropic และ rheopectic.....	13
รูปที่ 2.9 แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของระนาบชั้นของไหล.....	15
รูปที่ 2.10 การ stabilization ของอนุภาคเซรามิก .....	17
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง total interaction potential ( $V_T$ ), attraction ( $V_A$ ) และ repulsion ( $V_R$ ) ของอนุภาคในน้ำ .....	19
รูปที่ 2.12 การดูดซับพอลิเมอร์บนพื้นผิวของอนุภาค .....	21
รูปที่ 2.13 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ .....	23
รูปที่ 2.14 การหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง.....	24
รูปที่ 2.15 แสดงมุมตกกระทบวิกฤต ( $\phi_c$ ) สำหรับการสะท้อนกลับหมดของแสงที่ผ่านจาก ตัวกลางที่มีค่า $n$ มากไปยังตัวกลางที่มี $n$ น้อย ( $n'$ ) .....	25
รูปที่ 2.16 การส่องผ่านของแสงผ่านกระจกแผ่นเรียบที่มีการสะท้อนกลับเกิดขึ้นที่ผิวด้านบน และด้านล่างของกระจก และมีการดูดกลืนแสงของกระจก .....	28
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านกับความยาวคลื่นของแสงสำหรับกระจก ใสบางชนิด .....	28
รูปที่ 2.18 การสะท้อนของแสงภายในเนื้อวัสดุที่บริเวณที่เป็นรอยต่อส่วนที่เป็นผลึก ทำให้ความโปร่งใสลดลง .....	29
รูปที่ 2.19 รูป TEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ZnO นาโนในสารแขวนลอย.....	30
รูปที่ 2.20 รูป TEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ZnO นาโนในสารแขวนลอย.....	31
รูปที่ 2.21 แสดงการดูดซับของ PEI บนผิวอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	32
รูปที่ 2.22 ค่า viscosity ของสารแขวนลอยที่ค่า pH ต่าง ๆ.....	32
รูปที่ 2.23 โครงสร้างโมเลกุลของ polyoxyethylene(POE)-modified silicones .....	33

รูปที่ 2.24 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มี โครงสร้างตัวแบบ branch .....	34
รูปที่ 2.25 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มี โครงสร้างตัวแบบ linear .....	34
รูปที่ 2.26 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มี โครงสร้างตัวแบบ linear .....	35
รูปที่ 2.27 ค่าการยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของสารแขวนลอย เจือจาง $\text{TiO}_2 / \text{ZnO} = 25/75$ ที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัว 10 wt.% .....	35
รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของน้ำมันซิลิโคน Octamethylcyclotetrasiloxane .....	36
รูปที่ 3.2 โครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ .....	37
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการ เตรียมสารแขวนลอยและการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารแขวนลอย .....	41
รูปที่ 4.1 โครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	43
รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	44
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก .....	46
รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก .....	46
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก .....	47
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 .....	47
รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23 .....	48
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182 .....	48
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182 .....	49
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน .....	50
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 15 วัน .....	50
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน .....	51



รูปที่ 4.28 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสาร ช่วยกระจายตัว 5.0 wt% .....	62
รูปที่ 4.29 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 23:13:23.....	64
รูปที่ 4.30 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 23:02:23.....	65
รูปที่ 4.31 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 182:13:182 .....	66
รูปที่ 4.32 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 182:02:182 .....	67
รูปที่ 4.33 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่เวลาต่าง ๆ .....	69
รูปที่ 4.34 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 23:13:23.....	70
รูปที่ 4.35 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 23:02:23.....	71
รูปที่ 4.36 อัตราส่วน $h/h_0$ ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23.....	72
รูปที่ 4.37 อัตราส่วน $h/h_0$ ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:03:23.....	72
รูปที่ 4.38 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 182:13:182 .....	73
รูปที่ 4.39 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้าง แบบ 182:02:182 .....	74
รูปที่ 4.40 อัตราส่วน $h/h_0$ ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182.....	75
รูปที่ 4.41 อัตราส่วน $h/h_0$ ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182.....	75
รูปที่ 4.42 ลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอย.....	76
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคใน สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 .....	78
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคใน สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 .....	78
รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคใน สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 .....	79

รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคใน สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182 .....	79
รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23.....	81
รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23.....	81
รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 .....	82
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182 .....	82
รูปที่ 4.51 แสดงโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane b-ethylene glycol) triblock copolymer และการดูดซับของสารช่วยกระจายตัว บนพื้นผิวของอนุภาค $TiO_2$ ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน.....	83
รูปที่ 4.52 แบบจำลองลักษณะการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาค $TiO_2$ ....	84
รูปที่ 4.53 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอยที่ใช้ ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก.....	86
รูปที่ 4.54 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอยที่ใช้ ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	86
รูปที่ 4.55 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอยที่ใช้ ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก.....	87
รูปที่ 4.56 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23.....	87
รูปที่ 4.57 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23.....	88
รูปที่ 4.58 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182.....	89
รูปที่ 4.59 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182.....	89

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติในการป้องกันแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจึงเป็นที่สนใจและใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมการผลิตสีและสารเคลือบผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคโทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดในระดับนาโนซึ่งมีสมบัติเฉพาะตัวคือเมื่อผสมกับตัวกลางของเหลวแล้วจะให้สารแขวนลอยที่ใสและไม่มีสี<sup>[1]</sup> ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางประเภทป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากไม่ทิ้งคราบขาวเมื่อทาลงบนผิวหนัง<sup>[2]</sup> และยังเป็นที่ต้องการในการผลิตสารเคลือบผิวกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใสไม่มีสีอีกด้วย

การเตรียมสารแขวนลอยของโลหะออกไซด์ในตัวกลางของเหลวให้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและสารแขวนลอยมีความเสถียรนั้น สารช่วยกระจายตัวมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในการทำหน้าที่เพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน ไม่เกาะกันเป็นกลุ่ม และสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้โดยไม่ตกตะกอนเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคระดับนาโนซึ่งมีขนาดเล็กและมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง ทำให้มีโอกาสเกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคได้ง่ายและทำให้สมบัติที่ต้องการในการนำไปใช้งานลดลงหรือหมดไป โดยหลักการในการทำงานของสารช่วยกระจายตัว คือสายโซ่พอลิเมอร์ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคจะเป็นตัวช่วยในการแยกอนุภาคออกจากกัน ดังนั้นการที่สารช่วยกระจายตัวจะทำงานได้ดีจะต้องมีความสมดุลทางเคมีระหว่างผิวของอนุภาคและสารช่วยกระจายตัว นอกจากนี้ธรรมชาติของตัวกลางรวมทั้งโครงสร้างของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสารช่วยกระจายตัวด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้ Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers เป็นสารช่วยกระจายตัวในการเตรียมสารแขวนลอยของผงโทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน โดย triblock copolymer ชนิดนี้มีน้ำมันซิลิโคนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทำให้สามารถผสมกับน้ำมันซิลิโคนที่ใช้เป็นตัวกลางในการศึกษาได้ดี นอกจากนี้ส่วนปลายทั้งสองด้านของสารช่วยกระจายตัวยังมีความเป็นขั้วสูงทำให้คาดว่าจะเกาะกับผิวของอนุภาคโทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีประจุได้ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers ในการเป็น



สารช่วยกระจายตัวดีตามไปด้วย โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของ Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนให้มีการกระจายตัวที่ดีในน้ำมันซิลิโคนโดยใช้สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers
2. ศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน

## 1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

ในงานวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD) ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิค Laser light scattering และศึกษาขนาดของอนุภาคเดี่ยวโดยเทคนิค Transmission electron microscopy (TEM)
2. ศึกษากระบวนการเตรียมสารแขวนลอยของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน โดยทำการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นและความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัว (degree of polymerization) ต่อสมบัติของสารแขวนลอย
3. ทำการแยกอนุภาคระดับนาโนในสารแขวนลอย ด้วยวิธีการ centrifuge
4. ศึกษาสมบัติการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของสารส่วนลอย (supernatant) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สารแขวนลอยของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและมีความเสถียร

2. ได้ทราบถึงผลของโครงสร้างโมเลกุลของ Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer ต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการเลือกสารช่วยกระจายตัวสำหรับระบบการเตรียมสารแขวนลอยต่างๆต่อไป



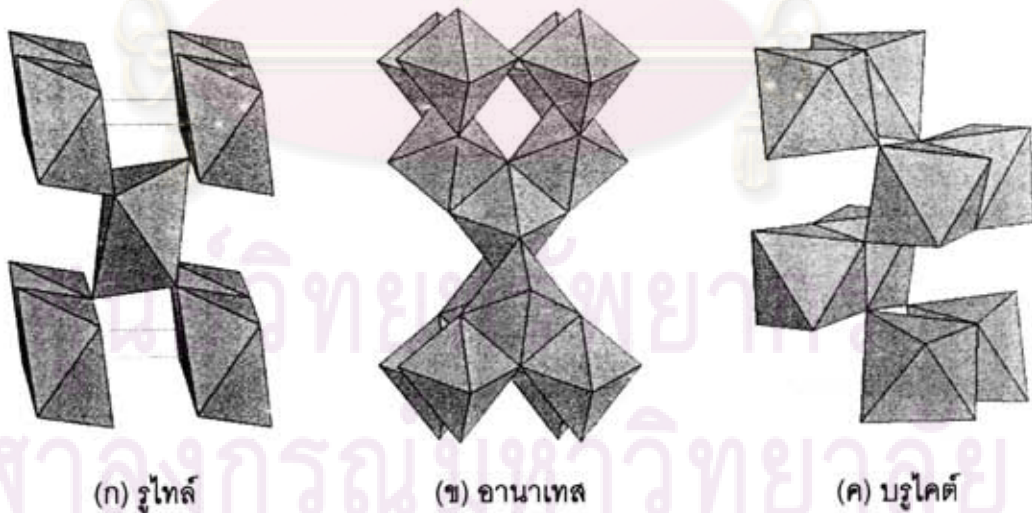
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โทเทเนียมไดออกไซด์

โทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[3]</sup> เป็นสารแก่แก่ชนิดหนึ่งเท่ากับโลกของเราและเป็นหนึ่งใน 50 ชนิดของสารที่มีการผลิตมากที่สุดทั่วโลก ลักษณะโดยทั่วไปมีสีขาวทึบแสง เกิดเองตามธรรมชาติมี 3 รูปแบบใหญ่ๆ คือ รูไทล์ อานาเทสและบรูไคต์ แสดงในรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน โทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีสีขาว มีประโยชน์สำหรับการใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต โทเทเนียมไดออกไซด์ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง สารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ สารที่ทำให้ตัวอ่อนในครรภ์เกิดความผิดปกติหรือสารที่มีพิษ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าโทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ใช่สารที่มีพิษ โดยทั่วไปมีความปลอดภัยในการใช้กับอาหาร ยา สีและเครื่องสำอาง จึงพบแร่ชนิดนี้พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สีทาบ้านไปถึงอาหารและเครื่องสำอาง โดยในกลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้นำโทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้เพื่อหลายวัตถุประสงค์ เช่น ให้ความขาว ปกปิดและป้องกันแสงแดด



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของโทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[4]</sup>

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[4]</sup>

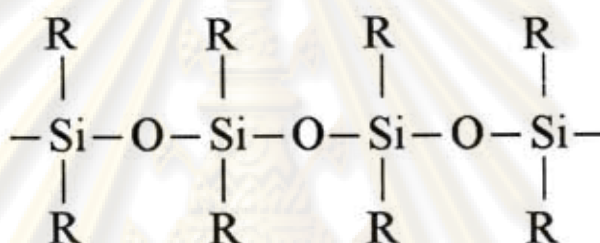
	Rutile TiO <sub>2</sub>	Anatase TiO <sub>2</sub>	Brookite TiO <sub>2</sub>
Form.Wt.	79.890	79.890	79.890
Atoms/Unit cell (Z)	2	4	8
CrystalSystem	Tet	Tet	Orth
Point Group	4/mmm	4/mmm	mmm
Space Group	P4 <sub>2</sub> /mnm	I4 <sub>1</sub> /amd	Pbca
<i>Unit Cell</i>			
A (Å)	4.5845	3.7842	9.184
B (Å)	2.9533	9.5146	5.447
C (Å)	62.07	136.25	5.145
Vol			257.38
Molar Volume	18.693	20.156	19.377
Density	4.2743	3.895	4.123

ด้วยความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทำให้สามารถสังเคราะห์สารให้มีขนาดเล็กได้จนถึงระดับนาโนเมตรซึ่งมีประโยชน์และข้อได้เปรียบมากมาย ข้อหนึ่งที่สำคัญคืออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนนี้เมื่อเตรียมเป็นสารแขวนลอยที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี จะให้สารที่ใสไม่มีสีและมีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงเป็นที่สนใจของภาคอุตสาหกรรมเครื่องสำอางเป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มที่จะใช้อนุภาคนาโนเพิ่มมากขึ้นในการป้องกันแสงแดดและเครื่องสำอางให้สีอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการใช้อนุภาคนาโนในเครื่องสำอางนั้นมีข้อควรระวังอยู่บ้างคือ เรื่องอันตรายของขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งอาจเป็นพิษต่อร่างกาย โดยพบว่าอนุภาคนาโนขนาด 70 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ อนุภาคนาโนขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้และอนุภาคนาโนขนาด 30 นาโนเมตร สามารถแทรกเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้ ซึ่งผู้ทำงานเกี่ยวข้องและผู้บริโภคควรให้ความสนใจเป็นพิเศษ

## 2.2 น้ำมันซิลิโคน

### 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำมันซิลิโคน

น้ำมันซิลิโคนจัดเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์<sup>(5)</sup> ซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท สารพอลิเมอร์ประเภทซิลิโคนมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและกลุ่มอินทรีย์ (หมู่อัลคิลหรือแอริล) ที่ต่ออยู่กับซิลิคอน น้ำมันซิลิโคนที่ใช้ในทางการค้าส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ ซึ่งอาจจะยาวหรือสั้นขึ้นกับประโยชน์ในการนำไปใช้งาน โดยสายโซ่ของน้ำมันซิลิโคนทุกชนิดจะประกอบด้วยซิลิคอนสลับอยู่กับออกซิเจนและมีกลุ่มอินทรีย์ต่ออยู่กับอะตอมของซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้เรียกว่าพอลิซิลอกเซน (polysiloxane)



R = หมู่อัลคิลหรือแอริล

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิโคน (polysiloxane)

### 2.2.2 สมบัติและการใช้งานของน้ำมันซิลิโคน

หมู่อินทรีย์ที่ต่ออยู่กับอะตอมของซิลิคอนในโครงสร้างของน้ำมันซิลิโคนมีผลต่อสมบัติของน้ำมันซิลิโคน อย่างไรก็ดีโดยทั่วไปแล้วน้ำมันซิลิโคนมักจะมีหมู่เมทิลหรือหมู่ฟีนิลหรือทั้ง 2 หมู่ต่ออยู่กับซิลิคอน หมู่เมทิลจะช่วยทำให้การบ่มของเรซินเร็วขึ้นและได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อย ในขณะที่หมู่ฟีนิลจะช่วยให้การทนต่อความร้อนขึ้นทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงลดลง แต่มีความอ่อนตัวไม่เปราะและแรงยึดกับผิวหน้าดีขึ้น

น้ำมันซิลิโคนมีความทนต่อความร้อนได้ดีมากไม่ว่าจะใช้เพียงลำพังหรือใช้ร่วมกับเรซินตัวอื่น ๆ สมบัติที่เด่นมากอย่างหนึ่งของน้ำมันซิลิโคน คือ มีความทนทานต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ดีมากและมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สารเคลือบผิวที่ได้จากน้ำมันซิลิโคนจะทนความร้อนได้สูงถึง 260 องศาเซลเซียส ในขณะที่สารเคลือบผิวจากเรซินอื่น ๆ ทนความร้อนได้ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส

น้ำมันซิลิโคนมีข้อดียกกว่าพอลิเมอร์อินทรีย์ทั่ว ๆ ไป คือ สมบัติในการยึดติดกับผิวหน้า ความทนทานต่อตัวทำละลาย ความเหนียวและการบ่ม โดยน้ำมันซิลิโคนจะสู้พอลิเมอร์อินทรีย์ไม่ได้ และน้ำมันซิลิโคนยังมีราคาค่อนข้างแพง นอกจากนี้ประโยชน์ในการนำไปใช้งานของน้ำมันซิลิโคนยังมีอีกมากมาย เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ใช้เป็นตัวป้องกัน การเกิดฟองอากาศ ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ทำเป็นฉนวนในอุตสาหกรรม ไฟฟ้าและวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ และยังใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางประเภทครีมทาผิว เนื่องจากไม่เหนียวเหนอะหนะและไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ

### 2.3 Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer

Copolymer คือ polymer ที่ประกอบด้วย monomer ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า copolymerization การแบ่งชนิดของ copolymer สามารถแบ่งได้หลายแบบ โดยแบ่งตามรูปแบบการจัดเรียงตัวของหน่วย monomer ที่อยู่บนสายโซ่พอลิเมอร์ หนึ่งในนั้นได้แก่ block copolymer ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อย homopolymer ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยจะจัดเรียงเป็นลำดับยาวของหน่วยย่อยที่ซ้ำ ๆ กัน เช่น diblock copolymer ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้  $AAA-(A)_x-AABBB-(B)_y-BBB$  และ triblock copolymer ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้  $AAA-(A)_x-AABBB-(B)_y-BBBAA-(A)_z-AA$  หรือ  $AAA-(A)_x-AABBB-(B)_y-BBBCCC-(C)_z-CC$

#### 2.3.1 วิธีการสังเคราะห์

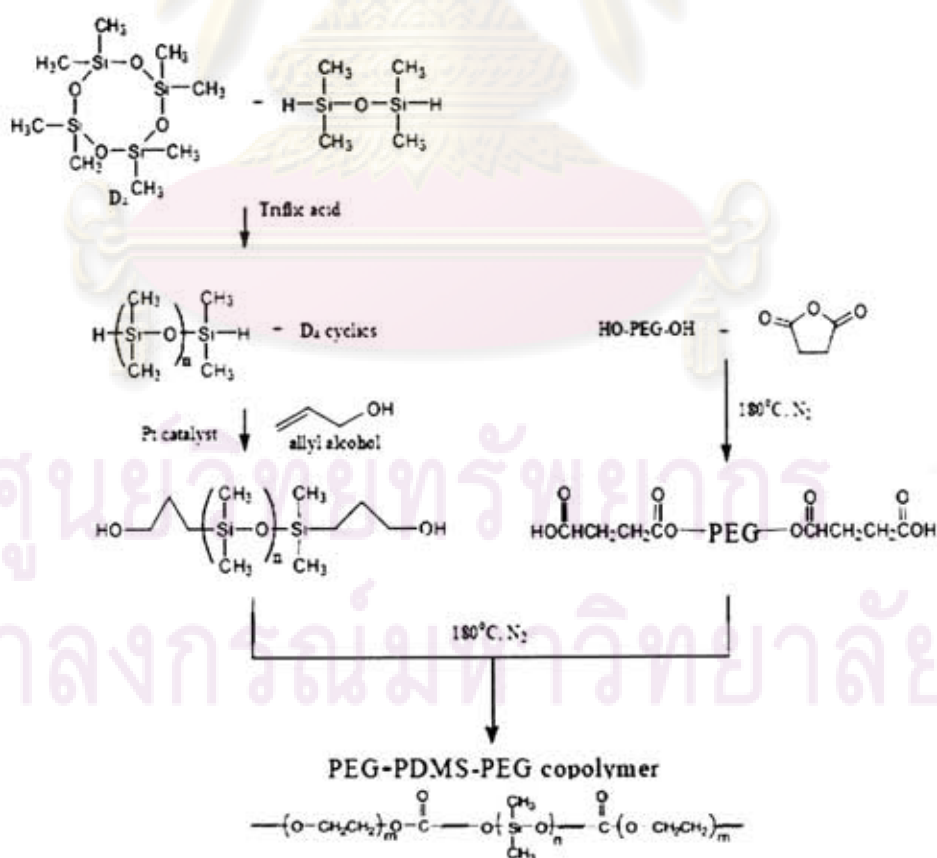
สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer<sup>[6]</sup> ชนิดนี้สังเคราะห์ขึ้นโดย ผศ.ดร.เมธา รัตนกรพิทักษ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยมีวิธีการและขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

การสังเคราะห์ PDMS<sup>[7]</sup> เริ่มจากเตรียม siloxane prepolymer ให้มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 1,000 กรัมต่อโมล จากนั้นให้ Si-H bonds เปิดวงไซ โดยให้ octamethylcyclotetrasiloxane (20 กรัม, 0.068 โมล) และ 1,1,3,3-tetramethyldisiloxane (3.54 มิลลิลิตร, 0.02 โมล) และใช้กรด triflic ผสมทั้งหมดลงในขวดรูปชมพู่ทำการ stirred ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดมาล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน

การสังเคราะห์ PDMS diol เริ่มจากเตรียม Allyl alcohol (2.04 มิลลิลิตร, 0.03 โมล) ผสมกับ toluene จำนวน 10 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่จากนั้นเติม platinum catalyst จำนวน 0.08 มิลลิลิตร แล้วทำการ stirred ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นำ PDMS prepolymers (มวลโมเลกุลเท่ากับ 1000 กรัมต่อโมล) ที่เตรียมได้จำนวน 10 กรัม มาค่อยๆ เติมนลงในสารละลาย จากนั้นกำจัด allyl alcohol โดยให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

การสังเคราะห์ PEG diacid เริ่มจากเตรียม PEG diacid ให้มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 1,000 กรัมต่อโมล โดยใช้ PEG (10 กรัม, 0.01 โมล) ผสมกับ succinic anhydride (2.4 กรัม, 0.024 โมล) และเติม dibutyltin oxide (0.0020 กรัม) จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยก succinic anhydride แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน

การสังเคราะห์ PEG-PDMS block copolymers ทำได้โดยใช้ Acid-terminated PEG (10 กรัม, 0.01 โมล) ผสมกับ hydroxylterminated PDMS (5 กรัม, 0.005 โมล) แล้วเติม dibutyltin oxide จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์ PEG-PDMS-PEG triblock copolymer

### 2.3.2 การนำไปใช้งาน

PEG-PDMS block copolymers เป็นที่สนใจในวงการพอลิเมอร์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีสมบัติพิเศษเฉพาะตัว เช่น สมบัติด้าน biocompatibility มีค่า flexibility<sup>[8]</sup> ที่สูง มีความเสถียรของค่า thermal oxidation และ oxidative ที่สูง รวมทั้งไม่มีพิษต่อร่างกายและยังสามารถละลายในน้ำได้ ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมยารักษาโรค อาหาร และเครื่องสำอาง

นอกจากนั้น PEG-PDMS block copolymers ยังมีสมบัติที่สำคัญ คือ ประกอบด้วยส่วนที่เป็น hydrophobic และ hydrophilic ซึ่งสมบัติทั้งสองนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น เป็นสารช่วยกระจายตัว ใช้เป็นตัวทำให้สารแขวนลอยมีการกระจายตัวที่เสถียร และใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรคโดยใช้ทำเป็น drug carriers

### 2.4 นาโนเทคโนโลยีและอนุภาคระดับนาโน

นาโนเทคโนโลยี คือ แขนงหนึ่งของสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมสิ่งที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมและโมเลกุล โดยทั่วไปนาโนเทคโนโลยีจะเกี่ยวข้องกับขนาดที่เท่ากับ 100 นาโนเมตรหรือเล็กกว่านั้น ซึ่งขนาดดังกล่าวได้หมายรวมถึงวัสดุอุปกรณ์ชิ้นงานหรือนวัตกรรมใหม่ ๆ ที่สร้างขึ้นมา

อนุภาคนาโน<sup>[9]</sup>ถูกจัดเป็นอนุภาคระดับกล้องจุลทรรศน์ซึ่งหมายถึงเราไม่สามารถมองเห็นอนุภาคนั้นๆ ได้โดยตรงด้วยตาเปล่าสองข้างของเรานั้นเอง มีหลายสิ่งหลายอย่างที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่สิ่งเหล่านั้นก็ไม่ได้ถูกนำมารวมเป็นอนุภาคนาโนทั้งหมด เพราะอนุภาคนาโนนั้นจะต้องมีขนาดในระดับนาโนเมตรเท่านั้น (nm = nanometres) แต่ก็ใช่ว่าอะไรก็ตามที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรนั้นคืออนุภาคนาโนทั้งหมดอีกเช่นกัน

โดยทั่วไปอนุภาคนาโนถูกสร้างมาจากวัตถุกิ่งตัวนำโดยอาจจะนำมาติดด้วยควอนตัมดอท (quantum dot หรือรู้จักกันในอีกนามว่า semiconductor nanocrystal ซึ่งหมายถึงผลึกของแข็งของสารกึ่งตัวนำ ที่ประกอบไปด้วยขนาดของอะตอมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางราว 10-20 นาโนเมตร ประมาณ 10 - 50 อะตอม รวมทั้งมี electron เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 100 - 1000 electrons ) อนุภาคนาโนนั้นเป็นอนุภาคที่สำคัญอย่างยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของวัตถุ อะตอม และโครงสร้างระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี วัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีสมบัติทางฟิสิกส์คงที่ตามขนาดของวัตถุนั้น แต่ในวัตถุระดับนาโนไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากมีสมบัติอื่นเข้ามาร่วมด้วย ได้แก่ quantum confinement, surface plasmon resonance และ superparamagnetism



สิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างของอนุภาคนาโนคือความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็ก โดยปริมาณของอะตอมที่พื้นผิวมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคในระดับนาโน นอกจากนี้แล้วอนุภาคนาโนสามารถอยู่ในรูปของสารแขวนลอยได้เช่นกัน เนื่องจากแรงระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายมีมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนนี้ลอยตัวอยู่ได้ อนุภาคนาโนบางชนิดมีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการสะท้อนของแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อนุภาคนาโนของทอง ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นสีแดงที่เรียกกันว่า ruby หรือ burgundy อนุภาคนาโนยังคงเกี่ยวโยงไปถึง clusters ซึ่งหมายถึงกลุ่มเล็กๆของอะตอมหรือโมเลกุลนั่นเอง สมบัติเกี่ยวกับ วัสดุ dielectric (สสารที่มีแรงต้านอย่างสูงต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า เช่น ฉนวนไฟฟ้า) และความสามารถของการเป็นสารกึ่งตัวนำของอนุภาคนาโนนั้น สามารถถูกสร้างขึ้นเป็นโครงสร้างผสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลาย ๆ ด้านหรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการนำไปใช้ให้ดียิ่งขึ้น เช่น core-shell nanoparticles ยิ่งไปกว่านั้นอนุภาคนาโนสามารถถูกออกแบบให้มีรูปร่างได้หลากหลายรูปแบบ

#### 2.4.1 ข้อดีของนาโนเทคโนโลยี

ข้อดีของของนาโนเทคโนโลยีนั้นมีอยู่มากมาย ขึ้นอยู่กับผู้ทดลองจะจินตนาการประดิษฐ์หรือคิดค้นสิ่งไหนขึ้นมา เช่น การสร้างอาหารที่ไม่มีวันหมด การกระจายการศึกษาอย่างทั่วถึงทุกมุมโลก การเพาะพันธุ์สัตว์น้ำที่สูญพันธุ์ขึ้นใหม่ การสร้างพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเต็มที่ การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีทางด้านไอทีก็สามารถใช้ได้หลายด้าน เช่น คอมพิวเตอร์ที่พัฒนาจาก "นาโน" จะมีความเร็วมากกว่าปัจจุบันถึงล้านเท่า แต่เกิดความร้อนน้อยลง และขนาดของคอมพิวเตอร์ในอนาคตก็จะมีขนาดเล็กลงด้วย ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์จะมีขนาดเท่าเครื่องเมนเฟรมหรือพีซีทั่วไป สายเคเบิลหรือสายส่งสัญญาณทั่ว ๆ ไปที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล ก็จะมีประสิทธิภาพและมีสมบัติพิเศษต่าง ๆ มากขึ้น เช่น ทำให้ไม่มีสัญญาณรบกวน ส่งสัญญาณได้รวดเร็วและครบถ้วนแม่นยำ

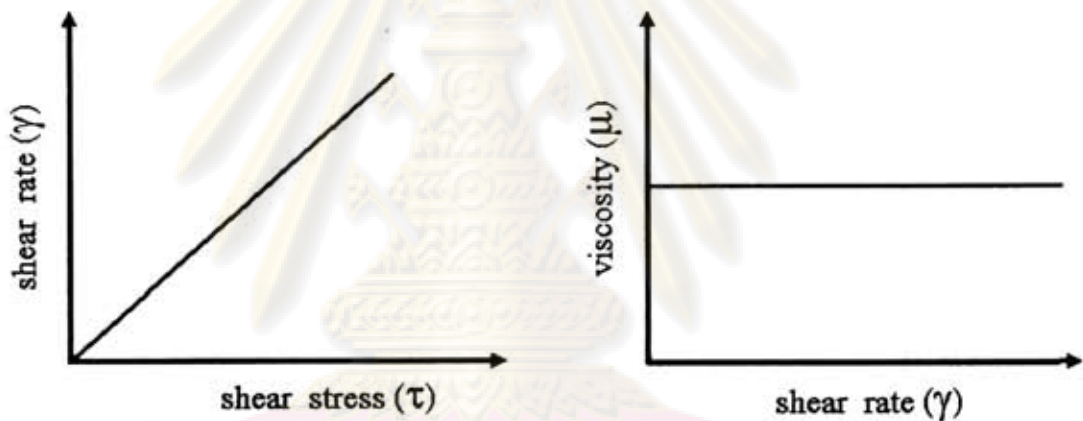
#### 2.4.2 ข้อเสียของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีมีข้อเสียในเรื่องการใช้สารเคมีจำนวนมากในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ขนาดที่เล็กมากของนาโนเทคโนโลยีทำให้มีโอกาสปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมจึงต้องมีการคิดหาวิธีการควบคุมป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อไป

## 2.5 พฤติกรรมการไหลของของไหล

### 2.5.1 ของไหลแบบนิวโทเนียน (newtonian fluid)

วัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นไปตามที่นิวตันได้ตั้งสมมติฐานไว้ นั่นเรียกว่า ของไหลแบบนิวโทเนียน จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนเป็นไปในลักษณะเส้นตรง และความหนืดของของไหลนั้นจะคงที่ตลอด แม้ว่าอัตราเฉือนจะเปลี่ยนไปก็ตาม ซึ่งหมายความว่า ถ้าวัดความหนืดของสารนี้ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าความหนืดจะคงที่เสมอ ไม่ว่าจะใช้เครื่องวัดความหนืดรุ่นไหน เข็มเบอร์ใด หรือใช้ความเร็วในการหมุนของเข็มเท่าใดก็ตาม ตัวอย่างของสารที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ น้ำ ตัวทำละลายที่มีขนาดโมเลกุลไม่ใหญ่มากนัก และของไหลมาตรฐาน เป็นต้น



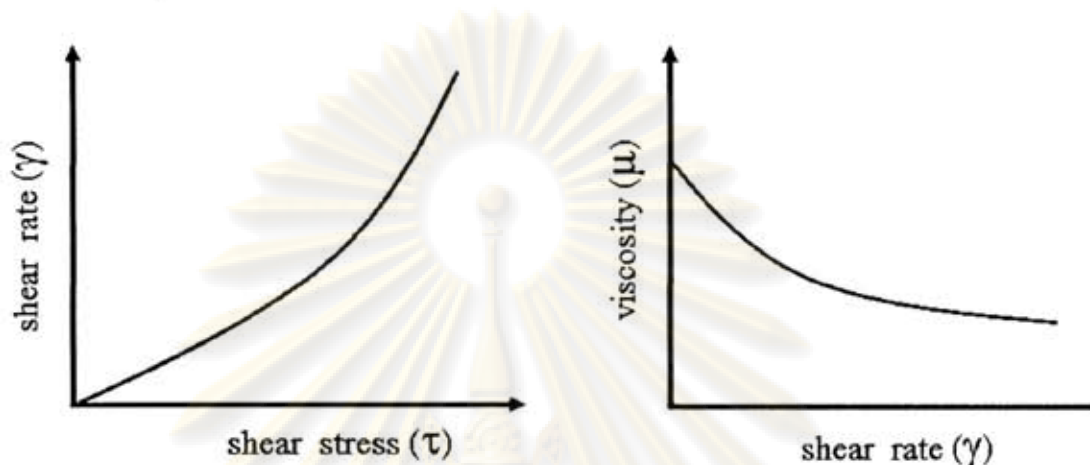
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียน

### 2.5.2 ของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (non-newtonian fluid)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือน สำหรับของไหลประเภทนี้จะไม่เป็นค่าคงที่ คือ ถ้าอัตราเฉือนเปลี่ยน ค่าความเค้นเฉือนจะเปลี่ยนไปในลักษณะที่เป็นสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้น ค่าความหนืดจึงเปลี่ยนเมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนไป การวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องที่ต่างรุ่นกันหรือใช้ขนาดเข็ม ความเร็วในการหมุนของเข็มที่ต่างกัน จะส่งผลให้ค่าความหนืดที่วัดได้แตกต่างกันออกไป ดังนั้น การวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนจึงต้องอาศัยการควบคุมภาวะตัวแปรต่าง ๆ อย่างระมัดระวัง โดยค่าที่วัดได้นี้เรียกว่า ค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity)

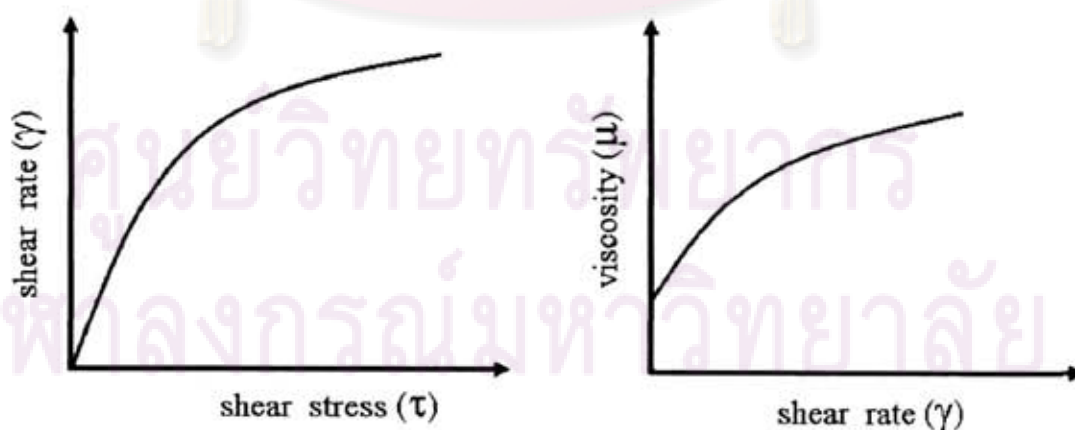
พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนมีอยู่หลายประเภท ซึ่งสามารถแบ่งจัดจำแนกได้ ดังนี้

1. พฤติกรรมเสมือนพลาสติก (pseudoplastic behavior) เป็นพฤติกรรมส่วนใหญ่ของของไหลประเภทนอนนิวโทเนียน ซึ่งพบได้บ่อยครั้งใน slurry เซรามิก ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการไหลแบบ shear thinning เนื่องจากค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



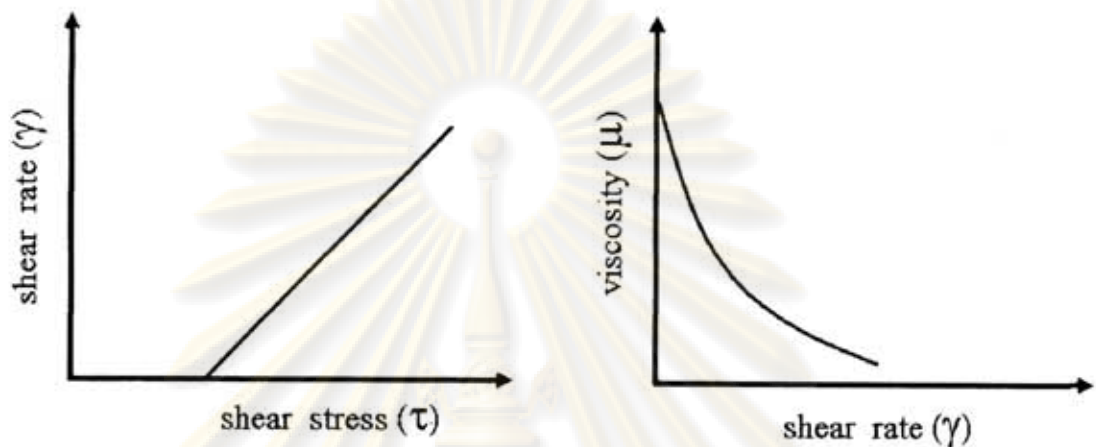
รูปที่ 2.5 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดเสมือนพลาสติก

2. พฤติกรรมไดลาแทนต์ (dilatant behavior) เป็นพฤติกรรมซึ่งไม่เป็นที่ปรารถนา เนื่องจากเมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงขึ้น วัสดุจะเริ่มจับตัวขึ้นทำให้เกิดการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากในสภาพดังกล่าวอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวแบบชิดกันมากที่สุด การทำให้เกิดความเค้นเฉือนในแนวระดับนั้น เท่ากับเป็นการทำให้อนุภาคแถวบนเคลื่อนตัวไปอยู่เหนืออนุภาคที่เรียงตัวอยู่ด้านล่าง ทำให้วัสดุมีความหนืดสูงมากเนื่องจากขณะที่อนุภาคเคลื่อนตัวนั้นจะเกิดการชนกับอนุภาคอื่น ๆ และเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลในแนวตั้งและแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



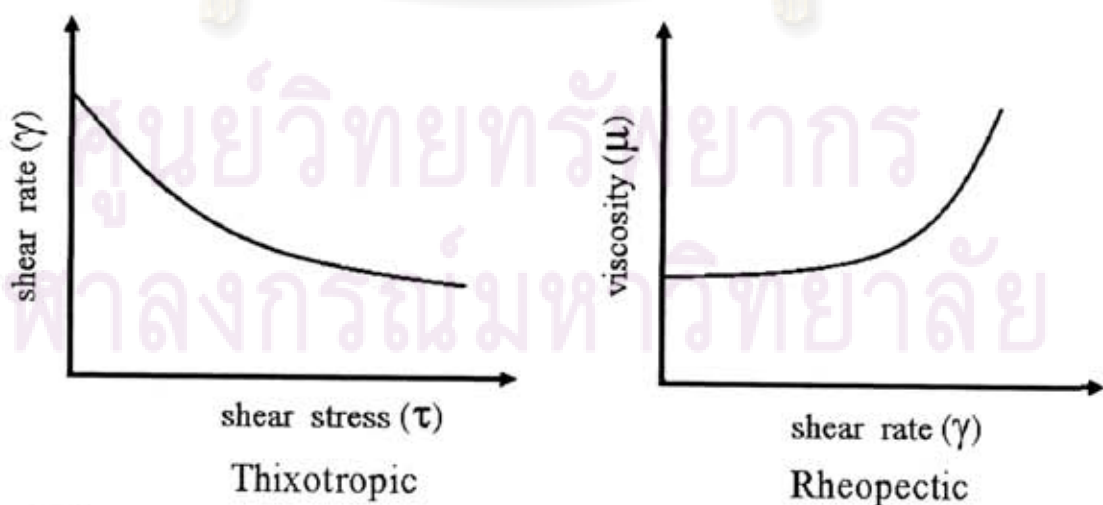
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดไดลาแทนต์

3. พฤติกรรมพลาสติก (plastic behavior) ภายใต้ภาวะที่อยู่กับที่ของไหลชนิดนี้ จะประพฤติตัวเสมือนเป็นของแข็ง จึงต้องอาศัยแรงจำนวนหนึ่งมากกระทำเพื่อที่จะทำให้เกิดการไหล ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ กรณีของขอสมะเขือเทศซึ่งต้องเขย่าขวดก่อนจึงจะสามารถเทออกจากขวดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนิวโทเนียนชนิดพลาสติก

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถ้ามีการพิจารณาในเรื่องของระยะเวลาด้วยแล้ว การแบ่งชนิดของของไหลแบบนอนิวโทเนียนอาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ thixotropy และ rheopexy ของไหลบางชนิดจะแสดงค่าความหนืดที่เปลี่ยนไปตามเวลาภายใต้ภาวะที่มีค่าอัตราเฉือนคงที่ ซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณี คือ ถ้าของไหลมีค่าความหนืดลดลงตามเวลา จะจัดอยู่ในประเภท thixotropic ส่วนของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลาจะเรียกว่าประเภท rheopexic ดังรูปที่ 2.8<sup>(10)</sup>



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนิวโทเนียน thixotropic และ rheopexic

สำหรับพฤติกรรมการไหลตัวของของเหลวสามารถแสดงได้ด้วย power law model<sup>(11)</sup> ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด ( $\eta$ ) และแรงเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) ดังนี้

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

โดยที่  $K$  = consistency และ  $n$  = power law index (flow index) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแบ่งได้ 3 กรณี คือ

เมื่อ $n = 1$	แสดงว่าเป็น newtonian fluid
เมื่อ $0 < n < 1$	แสดงว่าเป็น shear thinning fluid และ
เมื่อ $n > 1$	แสดงว่าเป็น dilatant fluid

### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมกรไหล

1. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างเด่นชัดต่อพฤติกรรมกรไหลของสาร วัสดุบางชนิดที่มีความไวต่ออุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน การศึกษาในแง่อิทธิพลของอุณหภูมิต่อวัสดุจึงมีประโยชน์มากสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการใช้งานหรือใช้กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ เช่น น้ำมันเครื่อง จารบี เป็นต้น

2. อัตราเฉือน ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วว่า ของไหลประเภทนอนนิวโทเนียนจะมีพฤติกรรมกรไหลที่เปลี่ยนไปตามอัตราเฉือน การศึกษาผลกระทบในแง่ของอัตราเฉือนนี้จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สีทาบ้าน เครื่องสำอาง กาว สีเคลือบ อาหาร เป็นต้น

3. ภาวะในระหว่างการวัด การควบคุมภาวะของวัสดุที่จะทำการวัดเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องระมัดระวังเนื่องจากสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความหนืดได้ จึงต้องมีการจดบันทึกข้อมูลทางเทคนิคที่ใช้ในการวัดไว้อย่างละเอียดด้วย เช่น รุ่นของเครื่อง ความเร็ว ขนาดของเบอร์เข็ม ขนาดของภาชนะที่บรรจุสารใช้หยาป้องกันการกระทบของเข็มด้วยหรือไม่ และเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง เป็นต้น

4. เวลา เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อวัสดุประเภท thixotropic และ rheopectic แต่ก็ยังมีสารอื่น ๆ อีกหลายชนิดที่ค่าความหนืดสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ แม้จะไม่มีค่าความเค้นเฉือนมากกระทำก็ตาม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการบ่มเก็บไว้นาน หรือเป็นการวัดความหนืดของสารในขณะที่อยู่ระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา เป็นต้น

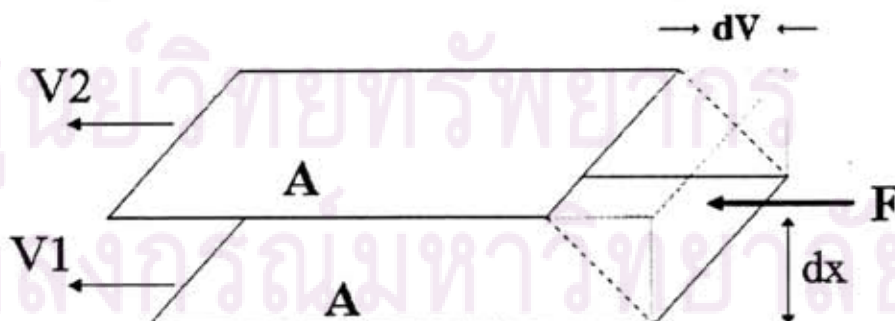
5. ประวัติความเป็นมาของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่เราจะต้องรู้มาก่อนที่จะนำมาวัดค่าความหนืดนั้นได้เกิดอะไรขึ้นกับสารตัวอย่างมาแล้วบ้าง เช่น การได้รับความร้อน การบ่ม เก็บ กรรมวิธีในการเตรียม ซึ่งควรจะให้มึผลกระทบต่อค่าความหนืดน้อยที่สุด หากพิจารณาแล้ว จะเห็นว่าสารประเภท thixotropic จะมีความไวต่อสิ่งเหล่านี้มากที่สุด เนื่องจากการกวน การผสม การเท นี้อีกกรรมใด ๆ ที่ก่อให้เกิดความเค้นเฉือนนั้นจะสามารถส่งผลให้ค่าความหนืดของสารเปลี่ยนแปลงได้ทั้งสิ้น

6. ส่วนผสมของสารเติมแต่ง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่าความหนืดเนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมโดยการเปลี่ยนสัดส่วนขององค์ประกอบหรือเติมสารใด ๆ ลงไป ก็ย่อมทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น การเติมตัวทำละลายลงในหมึกพิมพ์เพื่อลดความหนืดหรือการเติมสารควบคุมการไหลลงในสีทาบ้าน เป็นต้น<sup>(11)</sup>

#### 2.5.4 ค่าความหนืด

ค่าความหนืด คือ ผลที่ได้จากการวัดแรงเสียดทานภายในของไหล โดยแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชั้นของของไหลมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน แรงเสียดทานยังมีค่ามากเท่าใดก็ยิ่งต้องใช้แรงในการเคลื่อนที่มากขึ้นเท่านั้น แรงที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า ความเค้นเฉือน (shear stress) โดยปกติแล้วการเฉือน (shearing) จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ เช่น การเทของเหลว การวาดหรือปาดของเหลวปกคลุมไปบนพื้นผิวหนึ่ง ๆ การฉีดพ่นสเปรย์ การคลุกเคล้าส่วนผสม เป็นต้น ดังนั้นของไหลที่มีค่าความหนืดสูงจึงต้องการแรงมากกว่าของไหลที่มีค่าความหนืดต่ำ ๆ

Sir Isac Newton ได้อธิบายในเรื่องความหนืดของของไหลโดยอาศัยแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองแสดงการเคลื่อนที่ของระนาบชั้นของไหล<sup>(11)</sup>

เมื่อระนาบของไหลสองชั้นที่ขนานกันและมีพื้นที่เท่ากัน คือ A ถูกแยกออกจากกันเป็นระยะทาง dx เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วที่ต่างกัน คือ  $V_1$  และ  $V_2$  นิวตันได้สมมติว่า แรงที่ต้องใช้ในการรักษาความแตกต่างของความเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเร็วตลอดของของไหลหรือเกรเดียนต์ความเร็ว ซึ่งแสดงได้ดังนี้  $\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$  โดย  $\eta$  เป็นค่าคงที่ เรียกว่า ค่าความหนืด , ค่าเกรเดียนต์ความเร็ว ( $dv/dx$ ) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราเฉือน (shear rate) เขียนแทนด้วย S มีหน่วยเป็นวินาที<sup>-1</sup> สำหรับเทอม ( $F/A$ ) คือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ ที่ต้องการในการทำให้เกิดการเฉือน เรียกว่าความเค้นเฉือน เขียนแทนด้วย  $F'$  มีหน่วยเป็น ไดน์ต่อตารางเซนติเมตร หรือนิวตันต่อตารางเมตร ในระบบ SI ดังนั้น  $\eta = \frac{F'}{S}$  นิวตันได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าวัสดุทุกชนิด ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะมีค่าความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน<sup>[11]</sup>

## 2.6 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย

การเติมผงเซรามิกลงในของเหลว เช่น น้ำ ผงเซรามิกจะไม่สามารถกระจายตัวได้และมีแนวโน้มที่จะเกาะตัวกันเป็นกลุ่มของผงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาค ซึ่งการตกตะกอนนี้ไม่เป็นที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง สีและสารเคลือบผิวทั้งหลาย เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ดูไม่น่านำไปใช้งานและทาลงบนผิวหนัง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มสารเติมแต่งประเภทสารช่วยกระจายตัวลงไปในส่วนผสมเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

การรวมตัวกันของผงเซรามิกสามารถอธิบายได้ด้วยผลของแรงดูด แรงผลัก หรือค่าพลังงานศักย์ระหว่างอนุภาค โดยสามารถแบ่งแรงระหว่างอนุภาคออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. แรงดูด ชนิด van der waals เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วคู่ชนิดถาวรและขั้วคู่ชนิดเหนี่ยวนำ (permanent and induced dipoles) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค

2. แรงผลักทางไฟฟ้า (electrostatic force) เป็นแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคที่พื้นผิวมีประจุชนิดเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้มักจะพบในกรณีที่ผงเซรามิกกระจายอยู่ในของเหลวที่มีค่า dielectric constant สูง ๆ โดยแรงผลักทางไฟฟ้านี้เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดของ electrical double layer

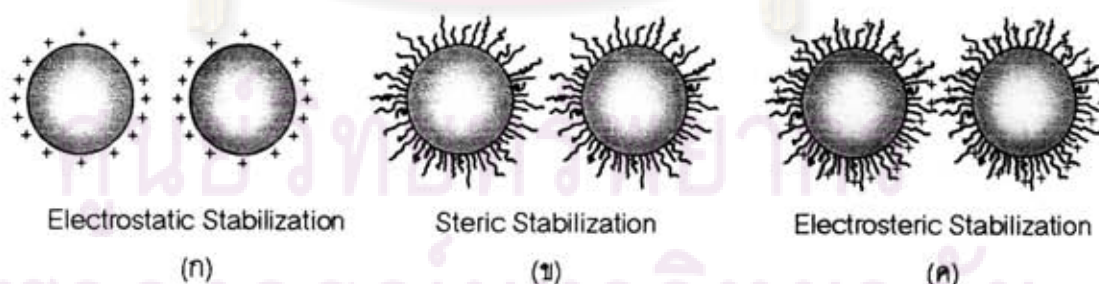
3. แรงผลักรวม steric force เป็นแรงผลักรวมที่เกี่ยวข้องกับสายรยางค์ของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาค แรงผลักรวมจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากจนกระทั่งสายรยางค์ของพอลิเมอร์ซ้อนทับกัน จะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีหากแรงดูดมีมากกว่าแรงผลักรวมก็จะทำให้อนุภาคเกาะกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (flocculation) การไหลตัวของสารก็เกิดขึ้นได้ยาก แต่ถ้าแรงผลักรวมมากกว่าแรงดูดก็จะทำให้อนุภาคกระจายตัวอยู่ห่างออกจากกันเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ (single unit) การไหลตัวของสารก็จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ดังนั้น จะเห็นว่าผลรวมของพลังงานจะแสดงเสถียรภาพของการกระจายตัวเกี่ยวข้องกับกลไกของแรงผลักรวม 2 แรง คือ แรงผลักรวมไฟฟ้าและแรงผลักรวม steric <sup>[12]</sup>

วิธีการทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยอยู่ในสารแขวนลอยได้อย่างเสถียรโดยไม่จับตัวกันแล้วตกตะกอนลงมา เรียกว่า "stabilization" โดยอาจทำได้ 3 วิธี <sup>[13]</sup> คือ

1. Electrostatic stabilization เป็นการทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างเสถียรโดยทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) อนุภาคผลักรวมเองจึงไม่ดูดจับกันและไม่ตกตะกอนลงมา

2. Steric stabilization เป็นการทำให้อนุภาคแขวนลอยได้อย่างเสถียร โดยการใส่ชั้นของพอลิเมอร์ไปเคลือบรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) ชั้นของพอลิเมอร์ที่ใส่ลงไปนี้จะเป็นตัวทำหน้าที่เหมือนกับเกราะกันชนไม่ให้อนุภาคเซรามิกเข้าใกล้กัน อนุภาคจึงไม่เกิดการดูดจับกันและไม่ตกตะกอน

3. Electrosteric stabilization เป็นการทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยได้อย่างเสถียรโดยอาศัยหลักการของวิธีที่ 1 และ 2 รวมกัน กล่าวคือ เป็นการใส่สารพอลิเมอร์ที่มีประจุไปเคลือบรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคดูดจับกันไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค)



รูปที่ 2.10 การ stabilization ของอนุภาคเซรามิก <sup>[13]</sup> (ก) Electrostatic stabilization (ข) Steric stabilization และ (ค) Electrosteric stabilization

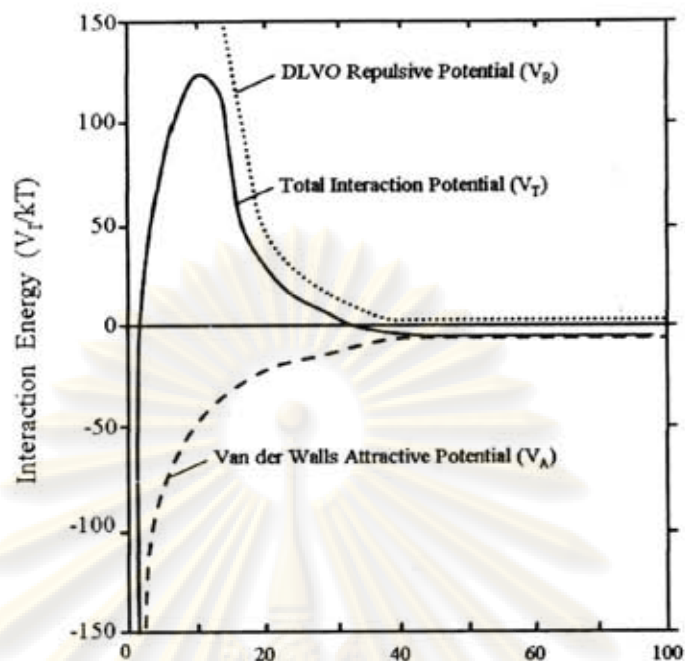


จากทฤษฎี DLVO โดย Deryaguin กับ Landau และ Verwey กับ Overbeek<sup>[13]</sup> ได้อธิบายเสถียรภาพของการแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางว่า ขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์รวม ดังสมการนี้

$$V_T = V_A + V_R + V_S$$

เมื่อ	$V_T$	=	พลังงานศักย์รวม (total potential energy) มีหน่วยเป็น joule
	$V_A$	=	พลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (van der waals attractive potential energy)
	$V_R$	=	พลังงานศักย์ผลึก (repulsive potential energy)
	$V_S$	=	พลังงานศักย์เนื่องมาจากตัวกลาง (potential energy due to solvent)

เราอาจจะประมาณได้ว่า  $V_T = V_A + V_R$  เพราะว่า  $V_S$  มีค่าน้อยมาก และหากเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_R$ ,  $V_A$  และ  $V_T$  กับระยะห่างระหว่างอนุภาค (h) จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.11 เมื่อ  $V_R =$  DLVO repulsive potential ,  $V_A =$  van der waals attractive potential และ  $V_T =$  total interaction potential =  $V_A + V_R$  จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมาก ๆ (h มีค่าใกล้ ๆ ศูนย์) พลังงานดึงดูด ( $V_A$ ) จะมีอิทธิพลต่อ  $V_T$  มากกว่า  $V_R$  ทำให้  $V_T$  มีค่าติดลบ แต่เมื่ออนุภาคอยู่ห่างกันมากขึ้น (h มีค่ามากขึ้น)  $V_R$  มีอิทธิพลต่อ  $V_T$  มากขึ้นจึงทำให้  $V_T$  มีค่าเป็นบวก จนกระทั่งมีค่าเป็นบวกสูงที่สุด และเมื่ออนุภาคอยู่ห่างจากกันออกไปอีก (h มีค่ามากขึ้นไปอีก)  $V_R$  และ  $V_A$  มีอิทธิพลต่อ  $V_T$  เท่ากัน  $V_T$  ดังนั้น จึงเท่ากับศูนย์ ทฤษฎี DLVO อธิบายว่าหากอนุภาค 2 อนุภาคที่เคลื่อนที่แบบ brownian เข้ามาชนกันด้วยพลังงานจลน์ที่มีค่ามากพอ พลังงานจลน์นั้นจะเอาชนะพลังงานศักย์ผลึก ( $V_R$ ) ทำให้อนุภาคทั้ง 2 เข้ามาอยู่ใกล้กันมากพอที่พลังงานศักย์ดึงดูด ( $V_A$ ) ดึงให้อนุภาคทั้ง 2 เข้ามาชิดกันแล้วเกิดการดูดจับกัน คือ เกิด agglomerate คือ การที่อนุภาคตั้งแต่ 2 อนุภาคเข้ามาดูดจับกัน เมื่อหลาย ๆ อนุภาคเข้ามาดูดจับกันมากขึ้นก็จะเกิดการตกตะกอน (flocculation) ของกลุ่มอนุภาคตกตะกอนลงสู่ก้นภาชนะ โดยการตกตะกอนนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกลับมาแขวนลอยอยู่ในสมดุลอีกครั้งได้<sup>[13]</sup>



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง total interaction potential ( $V_T$ ) , attraction ( $V_A$ ) และrepulsion ( $V_R$ ) ของอนุภาคในน้ำ<sup>[13]</sup>

## 2.7 สารช่วยกระจายตัว (Dispersant)

### 2.7.1 ความหมายของสารช่วยกระจายตัว

สารช่วยกระจายตัว เป็นสารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคของแข็งเกิดการกระจายตัวในสารแขวนลอย และควบคุมการตกตะกอนให้เกิดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากตามปกติอนุภาคของแข็งในสารแขวนลอยจะมีการจับตัวกันและตกตะกอนทำให้สารแขวนลอยมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงต้องทำให้อนุภาคแยกตัวออกจากกัน เพื่อแก้ไขสมบัติด้านความหนืดและการตกตะกอนให้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก หากสารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนเร็วจะทำให้สมบัติที่ต้องการในการนำไปใช้งานลดลงหรือหมดไป เช่น ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน สมบัติในการป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ลดลง ซึ่งสารเคมีจำพวกสารช่วยกระจายตัวจะช่วยทำหน้าที่ชะลอการตกตะกอน ช่วยทำให้อนุภาคของแข็งแยกออกจากกันและค่าความหนืดของสารแขวนลอยจะมีค่าที่ลดลง

สารช่วยกระจายตัวมีความสามารถในการปรับพื้นผิวระหว่างสารที่มีเฟสแตกต่างกัน โดยสารช่วยกระจายตัวสามารถจัดเรียงตัวไปตามขั้วของเฟส 2 เฟสที่ตรงข้ามกัน คือ ส่วนที่มีขั้ว (polar/hydrophilic) ของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวจะจับกับเฟสที่มีความเป็นขั้วมากกว่า ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้ว (nonpolar/lipophilic) ของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวจะจับกับเฟสที่ไม่มีขั้วหรือมีความเป็นขั้นน้อยกว่า

### 2.7.2 ประเภทของสารช่วยกระจายตัว

การจำแนกประเภทของสารช่วยกระจายตัวทำได้หลายแบบ แต่แบบที่มีประโยชน์และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง คือ การจำแนกตามธรรมชาติของส่วนที่มีขั้วของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัว การแบ่งประเภทของสารช่วยกระจายตัวตามระบบนี้จัดอยู่บนพื้นฐานของความเป็น ionic และ nonionic ของสาร โดยไม่ได้ให้ความสำคัญต่อความแตกต่างของส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุล ซึ่งวิธีนี้จะสามารถแบ่งประเภทของสารช่วยกระจายตัวได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ<sup>[14]</sup> ได้แก่

1. สารช่วยกระจายตัวประเภท amphoteric เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง ( $\text{pH} > 7$ ) ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic จะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อม เป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ ) ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic จะให้ประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ alkylamido alkyl amines และ alkyl substituted amino acid

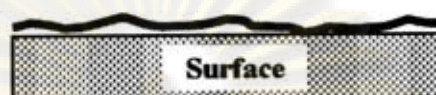
2. สารช่วยกระจายตัวประเภท anionic เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic ให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูป carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ acylated amino acids and และ acyl peptides carboxylic acids

3. สารช่วยกระจายตัวประเภท cationic เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic ให้ประจุบวก ส่วนมากมักจะเป็นพวก quaternary ammonium สารช่วยกระจายตัวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง ( $\text{pH} 10 - 11$ ) เนื่องจาก ammonium salt จะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ quaternaries และ alkyl imidazolines

4. สารช่วยกระจายตัวประเภท nonionic surfactant สารช่วยกระจายตัวประเภทนี้จะต่างจากสารช่วยกระจายตัวประเภท anionic และ cationic ตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวก polyether หรือ polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ alcohols และ alkanolamides

### 2.7.3 การดูดซับของพอลิเมอร์บนพื้นผิว

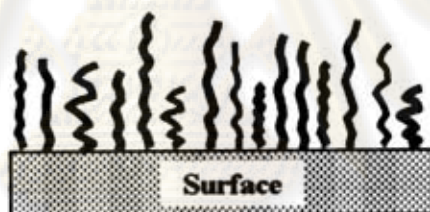
สารช่วยกระจายตัวหลายชนิดเป็นสารพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำงานโดยการดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคของแข็ง โดยการดูดซับของพอลิเมอร์บนพื้นผิวของอนุภาคของแข็งเกิดขึ้นได้ 3 แบบ<sup>[15]</sup> คือ แบบ trains loops และ tails ดังแสดงในรูปที่ 2.12



( ก )



( ข )



( ค )

รูปที่ 2.12 การดูดซับพอลิเมอร์บนพื้นผิวของอนุภาคแบบ (ก) trains (ข) loops และ (ค) tails

การดูดซับแบบ trains คือ การที่ทุกส่วนของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกดูดซับติดอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) การดูดซับแบบ loops คือ การที่ส่วนหนึ่งของโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ (มักจะเป็นส่วนกลางของโครงสร้างโมเลกุล) อยู่ห่างจากพื้นผิวอนุภาค โดยมีปลาย 2 ด้านของโมเลกุลยึดติดกับพื้นผิวของอนุภาคแบบ trains ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) และแบบ tails คือ การที่โครงสร้างโมเลกุลถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคด้วยปลายเพียงด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ค) ปริมาณและขนาดของ trains loops และ tails สามารถกำหนดได้โดยใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์เชิงสถิติ และพอลิเมอร์ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคนั้นจะสามารถยื่นออกมาจากพื้นผิวได้เป็นระยะถึงระดับหลักสิบนานาเมตรได้

ความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคระดับนาโนเมตร 2 อนุภาค ซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยชั้นของพอลิเมอร์นั้นค่อนข้างซับซ้อน สิ่งที่มีผลมากที่สุด คือ แรงผลักระหว่างอนุภาคซึ่งเกิดจาก osmotic pressure ทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน แต่อย่างไรก็ตามแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวของอนุภาค 2 อนุภาคก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้เช่นกันแม้จะเกิดขึ้นได้น้อยกว่า โดยเกิดจาก polymer bridging นั่นคือ การที่พอลิเมอร์ซึ่งถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคหนึ่งไปดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคอื่นด้วย ทำให้เกิด polymer bridging ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง

## 2.8 ทฤษฎีการหักเห การสะท้อนและการดูดกลืนแสงของวัสดุ

### 2.8.1 แสงและสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสงที่มองเห็นได้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.75 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แสงที่มองเห็นได้ (visible light) ประกอบด้วยแถบสีต่าง ๆ ตั้งแต่สีม่วงจนถึงสีแดง ซึ่งแสดงภาพขยายดังในรูปที่ 2.13 ส่วนแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่ำกว่าแสงที่มองเห็นได้ คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่าความยาวคลื่นในช่วง 0.01 ถึง 0.40 ไมโครเมตร และแสงที่มีค่าความยาวคลื่นสูงกว่าแสงที่มองเห็นได้คือรังสีอินฟราเรดมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 1,000 ไมโครเมตร

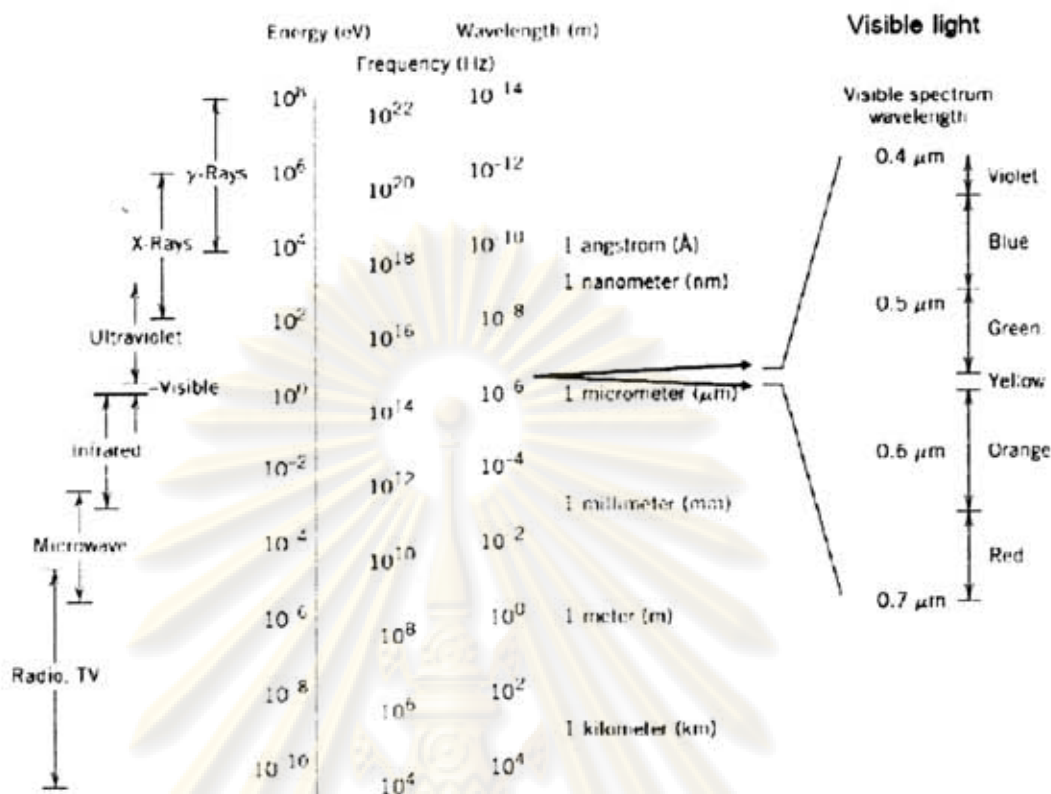
แม้ว่าจะไม่ทราบธรรมชาติของแสงอย่างแท้จริง แต่อย่างไรก็ตามแสงได้ถูกพิจารณาว่าเป็นคลื่นและอนุภาคที่เรียกว่า "โฟตอน" พลังงาน ( $\Delta E$ ) ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และความถี่ ( $\nu$ ) ของโฟตอน มีความสัมพันธ์กันโดยใช้สมการพื้นฐาน

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda$$

โดย  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ( $6.62 \times 10^{-34}$  Js)

$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ( $3.00 \times 10^8$  m/s)

จากสมการข้างต้น สามารถใช้พิจารณาโฟตอนที่เป็กลุ่มของอนุภาคที่มีพลังงานหรือเป็นคลื่นที่มีค่าความยาวคลื่นและความถี่จำเพาะค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.13 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ <sup>[16]</sup>

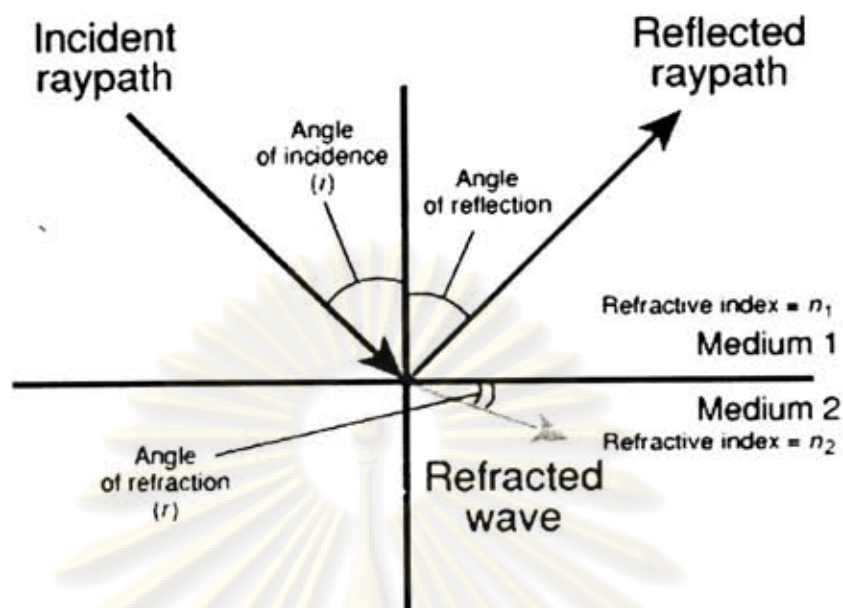
## 2.8.2 การหักเหของแสง

### 2.8.2.1 ดัชนีหักเหของแสง

เมื่อโฟตอนถูกส่งผ่านวัสดุที่โปร่งใส จะสูญเสียพลังงานบางส่วนมีผลทำให้ความเร็วของแสงลดลงและลำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง รูปที่ 2.14 แสดงภาพของลำแสงที่วิ่งผ่านอากาศจะมีความเร็วลดลงเมื่อผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากขึ้น เช่น กระจก ดังนั้นมุมตกกระทบของแสง ( $\phi$ ) จึงมีค่ามากกว่ามุมหักเหของแสง ( $\phi'$ ) ในกรณีนี้ความสัมพันธ์ของความเร็วแสงที่ผ่านไปในตัวกลางชนิดต่าง ๆ แสดงโดยใช้สมบัติทางทัศนศาสตร์ที่เรียกว่า ดัชนีหักเหของแสง ( $n$ ) ค่า  $n$  ของตัวกลางแต่ละชนิด คือ สัดส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศ ( $c$ ) ต่อความเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ ( $v$ ) แสดงดังสมการ

$$n = \frac{c}{v}$$

ค่าดัชนีหักเหของแสงของแก้วและผลึกของแข็งบางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.2 ค่าดัชนีหักเหของแสงที่แสดงนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.40 ถึง 2.60 <sup>[17]</sup>



รูปที่ 2.14 การหักเหของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง

ตารางที่ 2.2 ดัชนีหักเหของแสงของวัสดุบางชนิด<sup>(17)</sup>

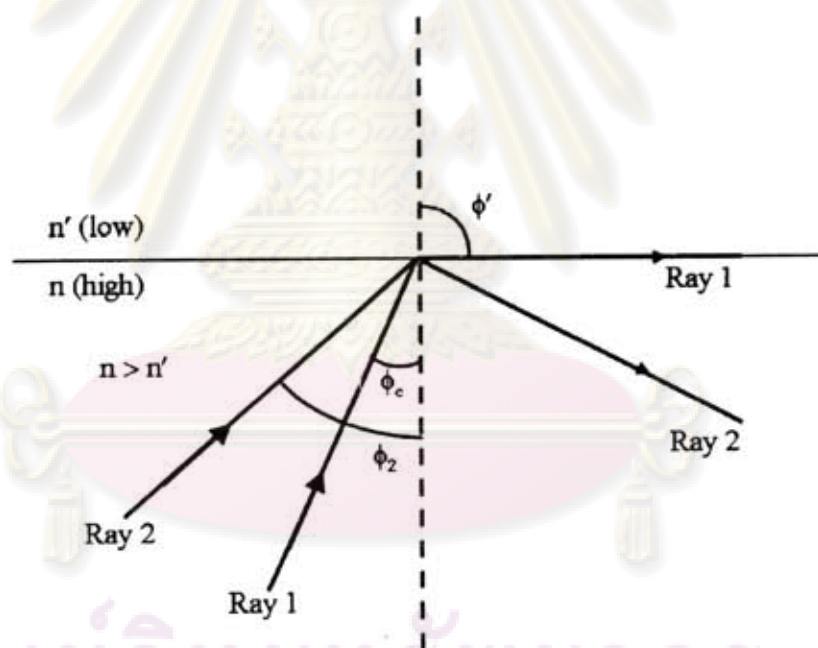
Materials	Average refractive index
Glass compositions :	
Silica glass	1.458
Soda-lime-silica glass	1.51 – 1.52
Borosilicate (Pyrex) glass	1.47
Crystalline compositions :	
Corundum , $Al_2O_3$	1.76
Quartz , $SiO_2$	1.555
Litharge , $PbO$	2.61
Diamond , C	2.41
Optical plastics :	
Polyethylene	1.50 – 1.54
Polystyrene	1.59 – 1.60
POlymethyl methacrylate	1.48 – 1.50
Polytetrafluorethylene	1.30 – 1.40

### 2.8.2.2 กฎการหักเหแสงของสเนลล์

ค่าดัชนีหักเหของแสงที่ผ่านจากตัวกลางชนิดหนึ่งมีค่าเท่ากับ  $n$  ไปยังตัวกลางอีกชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ  $n'$  มีความสัมพันธ์กับมุมที่แสงตกกระทบ ( $\phi$ ) และมุมที่แสงเกิดการหักเห ( $\phi'$ ) โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sin \phi'}{\sin \phi}$$

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางชนิดหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงสูงไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่ต่ำกว่า จะมีมุมที่ตกกระทบเป็นมุมตกกระทบวิกฤต ( $\phi_c$ ) คือ มุมตกกระทบที่ทำให้มุมสะท้อนของแสงทำมุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  เมื่อเพิ่มมุมตกกระทบให้มากกว่ามุมตกกระทบวิกฤตจะเกิดการสะท้อนกลับของแสงทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงมุมตกกระทบวิกฤต ( $\phi_c$ ) สำหรับการสะท้อนกลับหมดของแสงที่ผ่านจากตัวกลางที่มีค่า  $n$  มากไปยังตัวกลางที่มี  $n$  น้อย ( $n'$ ) สังเกตว่า Ray 2 มีมุมตกกระทบของแสง ( $\phi_2$ ) ซึ่งมากกว่า  $\phi_c$  ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงสู่ตัวกลางที่มีค่า  $n$



### 2.8.3 การดูดกลืน การส่องผ่านและการสะท้อนของแสง

วัสดุทุกชนิดมีสมบัติในการดูดกลืนแสงได้บางส่วน<sup>[18]</sup> (absorptivity) เนื่องจากมีอันตรกิริยา (interaction) ของโฟตอนต่อโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์และพันธะของอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลที่ใช้สร้างวัสดุนั้น ๆ สัดส่วนของแสงที่ส่องผ่านไปยังวัสดุนั้น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงที่สะท้อนกลับและปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนของวัสดุ สำหรับความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง ( $\lambda$ ) ผลรวมสัดส่วนของแสงที่ถูกสะท้อนกลับ (light reflected) แสงที่ถูกดูดกลืนไว้ (light absorbed) และแสงที่ส่องผ่านวัสดุ (light transmitted) มีค่ารวมกันเท่ากับ 1 เสมอ

$$(\text{Reflected fraction})_{\lambda} + (\text{absorbed fraction})_{\lambda} + (\text{transmitted fraction})_{\lambda} = 1$$

ซึ่งในวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าสัดส่วนระหว่างการดูดกลืน การส่องผ่านและการสะท้อนของแสงที่ต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ ดังต่อไปนี้

#### 2.8.3.1 วัสดุโลหะ

นอกจากแผ่นโลหะที่บางมาก ๆ โลหะมีการสะท้อนแสงได้ดีและหรือดูดกลืนแสงตกกระทบที่มีความยาวคลื่นสูง ๆ (คลื่นวิทยุ) จนถึงความยาวคลื่นช่วงกลางของคลื่นอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากโลหะมี conduction band ซ้อนทับกับ valence band แสงที่มาตกกระทบสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีระดับพลังงานสูงขึ้น และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งมีความยาวคลื่นมากเพื่อกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ผลเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวที่เรียบแล้วมีการสะท้อนกลับสูง ซึ่งสังเกตได้จากโลหะหลายชนิด เช่น ทองและเงิน ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโลหะจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของโลหะแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น ทองแดงและทองมีค่าดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำในช่วงของแสงสีน้ำเงินและเขียว แต่จะสะท้อนแสงสีส้มและแดง ดังนั้นแผ่นโลหะผิวเรียบจึงปรากฏสีตามแสงที่สะท้อนออกมา ส่วนโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น เงิน อลูมิเนียม มีการสะท้อนของแสงในทุกช่วงของสเปกตรัมของแสงที่มองเห็นได้จึงเห็นเป็นสีขาวเงิน

#### 2.8.3.2 วัสดุกระจกซิลิเกต

การสะท้อนของแสงจากแผ่นกระจกเรียบ สัดส่วนของแสงที่สะท้อนกลับของกระจกผิวเรียบสะอาดมีค่าน้อยมาก ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหแสงของกระจก และมุมที่ตกกระทบเป็นหลักสำหรับแสงที่ตกกระทบตั้งฉาก ( $\phi = 0^\circ$ ) สัดส่วนของแสงที่สะท้อนกลับ R (reflectivity) ของพื้นผิว สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเหแสงของวัสดุ ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ได้ดีเมื่อมุมที่แสงตกกระทบมีค่าไม่เกิน 20 องศา

การดูดกลืนแสงของแผ่นกระจก กระจกดูดกลืนพลังงานจากแสงที่ส่องผ่านกระจก ทำให้ความเข้มของแสงมีค่าลดลง เมื่อระยะทางส่องผ่านยาวมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของความเข้มแสงเริ่มต้น ( $I_0$ ) และความเข้มของแสงที่ส่องผ่านไปได้อ ( $I$ ) ของแผ่นกระจกหรือบานกระจกที่มีความหนา ( $t$ ) ซึ่งไม่มีการกระเจิงแสงภายในเนื้อกระจก คือ

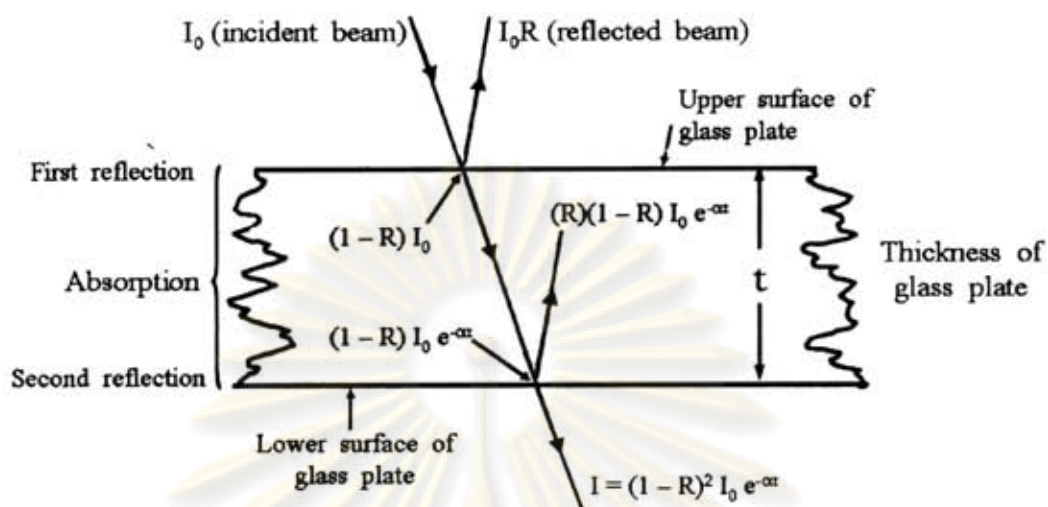
$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t}$$

ค่าคงที่  $\alpha$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเชิงเส้น (linear absorption coefficient) ซึ่งมีหน่วยเป็นต่อเซนติเมตร ( $\text{cm}^{-1}$ ) เมื่อทำการวัดความหนาเป็นเซนติเมตร

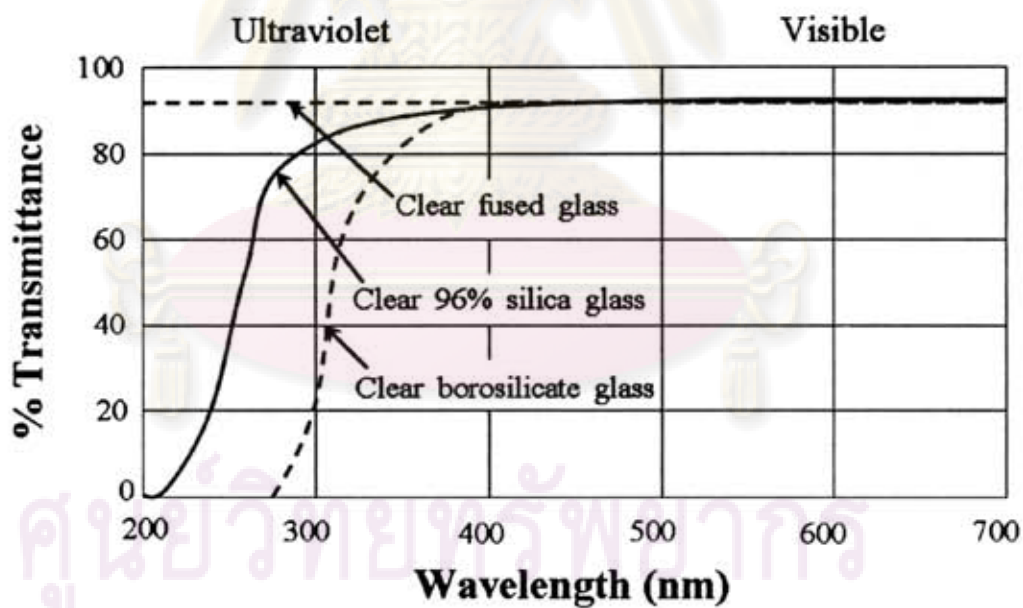
การสะท้อนกลับ (reflectance) การดูดกลืน (absorption) และการส่องผ่าน (transmittance) ของแสงที่ผ่านกระจกเรียบ ปริมาณของแสงที่ตกกระทบที่สามารถส่องผ่านแผ่นกระจกเรียบ คำนวณได้จากปริมาณแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของกระจก เช่นเดียวกับการคำนวณปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยกระจก เมื่อพิจารณาการส่องผ่านของแสงที่สามารถผ่านแผ่นกระจกเรียบได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 สัดส่วนของแสงที่ส่งไปถึงพื้นผิวด้านล่างของกระจกเรียบคือ  $(1-R)I_0e^{-\alpha t}$  สัดส่วนของแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวด้านล่างคือ  $R(1-R)I_0e^{-\alpha t}$  ดังนั้น ผลต่างของปริมาณแสงที่ส่องผ่านไปถึงพื้นผิวด้านล่างกับส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวด้านล่าง คือ สัดส่วนของแสงที่ส่องผ่านกระจกเรียบได้ ( $I$ ) นั่นคือ

$$\begin{aligned} I &= [(1-R)(I_0e^{-\alpha t})] - [R(1-R)(I_0e^{-\alpha t})] \\ &= (1-R)I_0e^{-\alpha t}(1-R) \\ &= (1-R)^2 I_0e^{-\alpha t} \end{aligned}$$

รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าร้อยละ 90 ของแสงที่ตกกระทบจะส่องผ่านกระจกซิลิกาเมื่อแสงมีค่าความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าซึ่งอยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต จะถูกดูดกลืนได้มากและส่องผ่านกระจกได้น้อยกว่าอย่างชัดเจน



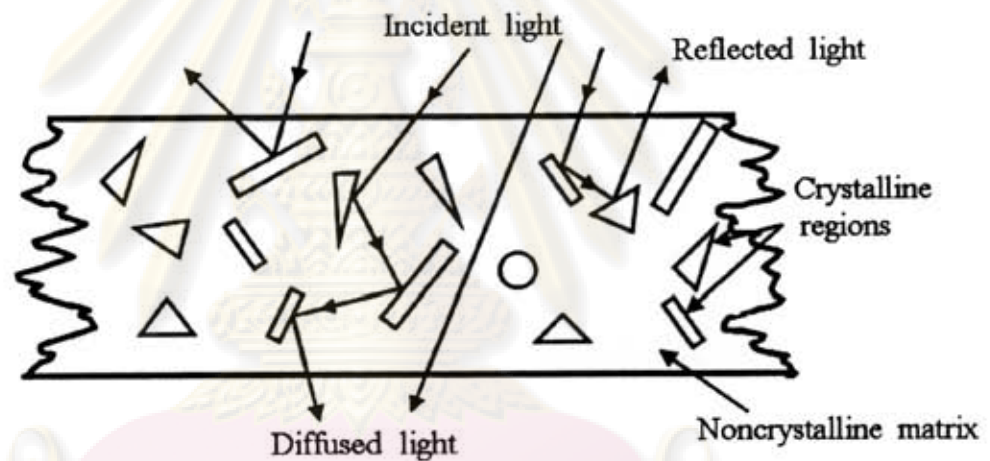
รูปที่ 2.16 การส่องผ่านของแสงผ่านกระจกแผ่นเรียบที่มีการสะท้อนกลับเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่างของกระจก และมีการดูดกลืนแสงของกระจก



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านกับความยาวคลื่นของแสงสำหรับกระจกใสบางชนิด

### 2.8.3.3 วัสดุพลาสติก

พลาสติกที่ไม่มีส่วนที่เป็นผลึกหลายชนิด เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน เททราฟลูออไรด์ และ พอลิคาร์บอนเนตมีสมบัติโปร่งใสดีมาก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่มีความเป็นผลึกบางส่วนบริเวณที่เป็นผลึกจะมีค่าดัชนีการหักเหของแสง ( $n$ ) มากกว่าบริเวณที่เป็นผลึกขนาดใหญ่กว่า ความยาวคลื่นของแสงจะเกิดการกระเจิงแสงจากการสะท้อนและการหักเหของแสงทำให้ความโปร่งใสของวัสดุลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ตัวอย่างเช่น แผ่นพอลิเอทิลีนแบบบางซึ่งมีโซ่กิ่งในโครงสร้างจึงมีความเป็นผลึกต่ำจะมีความโปร่งใสมากกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงซึ่งมีความเป็นผลึกมากกว่าเนื่องจากโครงสร้างเป็นเส้นตรง ความโปร่งใสของพลาสติกที่มีความเป็นผลึกบางส่วนสามารถปรับให้มีลักษณะขุ่นจนทึบได้ ขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก สารเจือปนและสารเติมเนื้อที่เติมลงไป



รูปที่ 2.18 การสะท้อนของแสงภายในเนื้อวัสดุที่บริเวณที่เป็นรอยต่อส่วนที่เป็นผลึก ทำให้ความโปร่งใสลดลง

## 2.9 ผลงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

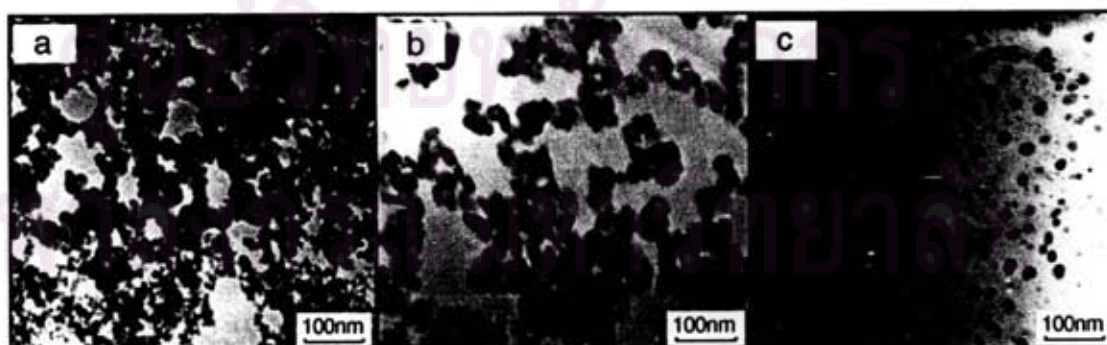
การเตรียมสารแขวนลอยของโลหะออกไซด์ในตัวกลางของเหลวให้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและสารแขวนลอยมีความเสถียรนั้น สารช่วยกระจายตัวมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก ในการทำหน้าที่เพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน ไม่เกาะกันเป็นกลุ่ม และสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้โดยไม่ตกตะกอนเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคระดับนาโนซึ่งมีขนาดเล็กและมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง ทำให้มีโอกาสเกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคได้ง่ายและทำให้สมบัติที่ต้องการในการนำไปใช้งาน

ลดลงหรือหมดไป โดยหลักการในการทำงานของสารช่วยกระจายตัว คือสายโซ่พอลิเมอร์ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคจะเป็นตัวช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคและแยกอนุภาคออกจากกัน ประสิทธิภาพในการทำงานของสารช่วยกระจายตัวจะขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างสมบัติทางเคมีของผิวอนุภาค ของสารช่วยกระจายตัวและธรรมชาติของตัวกลางรวมทั้งโครงสร้างโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัว

ที่ผ่านมาได้มีเอกสารงานวิจัยที่ทำการศึกษากเกี่ยวกับการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางชนิดต่างๆ โดยใช้สารช่วยกระจายตัว ดังนี้

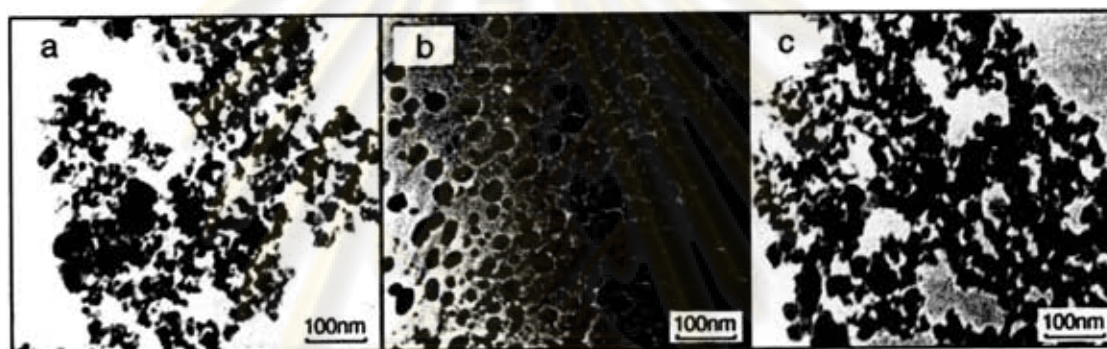
ในปี 2005 S.C. Liufu *et al.*<sup>[19]</sup> ได้ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางที่เป็นน้ำโดยใช้ maleic anhydride sodium salt copolymer (MA-Na copolymer) เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยเน้นศึกษาปริมาณการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในสารแขวนลอยที่มีค่า pH และปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกัน และได้เสนอว่าการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยในระบบเกิดจากแรงผลักแบบ electrosteric ซึ่งทำการทดลองโดยการเตรียมสารแขวนลอยปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยผงซิงค์ออกไซด์ ระดับนาโน 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้ MA-Na copolymer ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการปรับค่า pH ของสารแขวนลอยให้มีค่าเท่ากับ 5.4 7.2 และ 10 โดยใช้ HCl หรือ NaOH ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แล้ว stirred สารแขวนลอยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาพบว่า ค่า pH ของสารแขวนลอยมีผลต่อการลักษณะและพฤติกรรมของการกระจายตัวของอนุภาค โดยสารแขวนลอยที่มีค่า pH ที่สูงจะส่งผลให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดีและมีความเสถียรมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะเห็นว่าสารแขวนลอยที่มีค่า pH เท่ากับ 10 อนุภาคของซิงค์ออกไซด์จะเกิดการกระจายตัวได้ดีและมีความเสถียรสูงสุด



รูปที่ 2.19 รูป TEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ZnO นาโนในสารแขวนลอย (a) pH = 5.4 (b) pH = 7.2 และ (c) pH = 10

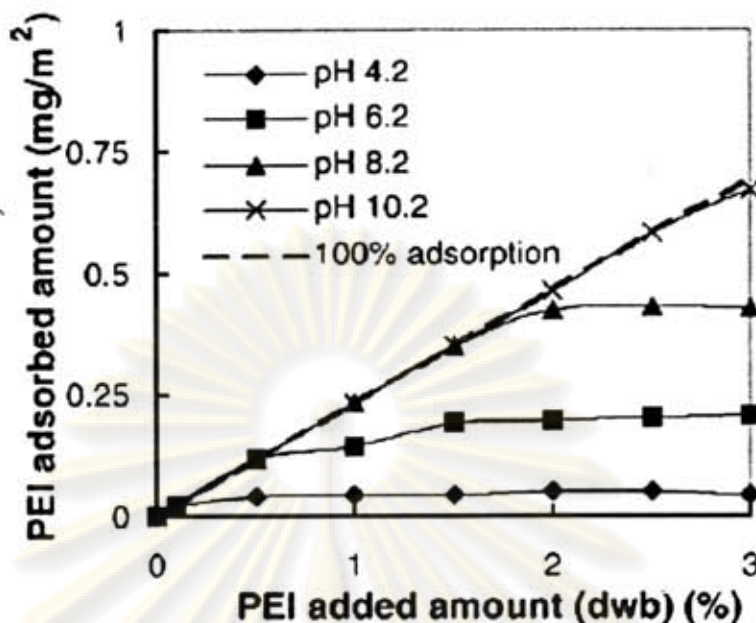
เมื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ช่วยกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งทำการศึกษาโดยเตรียมสารแขวนลอยที่มีค่า pH เท่ากับ 10 และใช้ MA-Na copolymer ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 200 600 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าสารแขวนลอยที่ใช้ MA-Na copolymer ความเข้มข้นต่ำ ๆ ไม่สามารถดูดซับบนผิวของอนุภาคได้ดีเท่าที่ควร เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการดูดซับบนผิวของอนุภาคได้ดีขึ้นทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เรียกว่า electrosteric มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ MA-Na copolymer มากขึ้นอีกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ bridging คือ การที่สายโซ่พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมให้อนุภาคกลับมา รวมกลุ่มกันและเกิดการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



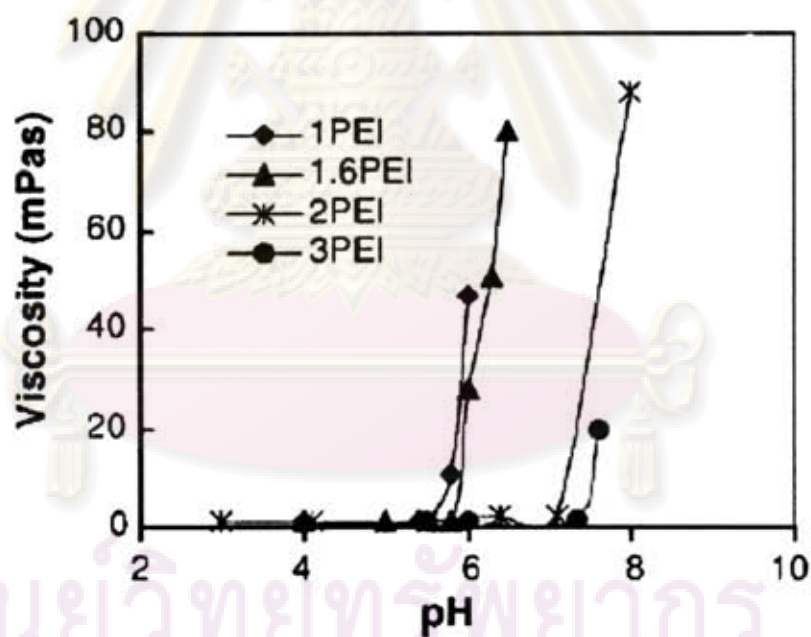
รูปที่ 2.20 รูป TEM (a)  $200 \text{ mg.l}^{-1}$  (b)  $600 \text{ mg.l}^{-1}$  (c)  $1200 \text{ mg.l}^{-1}$

ในปี 2006 F. Tang *et al.*<sup>[20]</sup> ได้ศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่มีอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางที่เป็นน้ำโดยใช้ polyethylenimine (PEI) เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยเน้นศึกษาปริมาณการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และสมบัติของสารแขวนลอยที่มีค่า pH ที่แตกต่างกัน โดยมุ่งเน้นไปที่การขึ้นรูปแบบ electrophoretic deposition เพื่อให้ได้ฟิล์มบาง

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าค่า pH ของสารแขวนลอยส่งผลต่อปริมาณการดูดซับของ PEI บนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยในภาวะที่ค่า pH เป็นกรด PEI จะดูดซับบนพื้นผิวอนุภาคได้ในปริมาณน้อย และส่วนใหญ่จะกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอย ส่วนในภาวะที่ค่า pH เป็นด่าง PEI จะดูดซับบนผิวของอนุภาคได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แสดงการดูดซับของ PEI บนผิวอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์

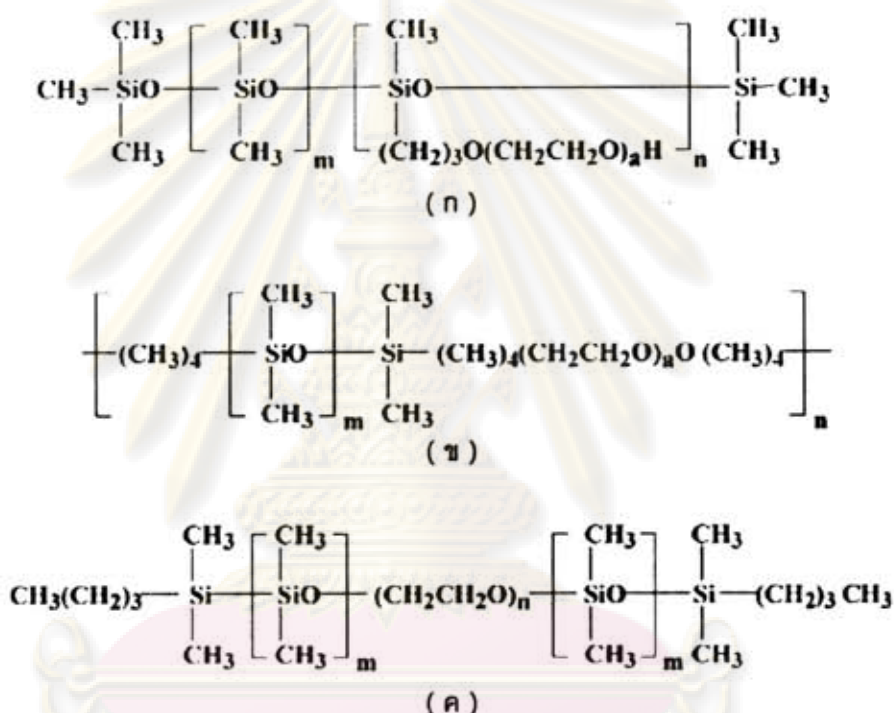


รูปที่ 2.22 ค่า viscosity ของสารแขวนลอยที่ค่า pH ต่าง ๆ

เมื่อทำการวัดค่าความหนืดของสารแขวนลอยที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 10 โดยปริมาตร และปริมาณของ PEI ค่าต่าง ๆ พบว่าความหนืดของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนจากสารแขวนลอยที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี ไปเป็นการเกาะตัวกันของอนุภาคในสารแขวนลอย โดยพบว่าการเติม PEI

ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้สารแขวนลอยมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในช่วง pH ที่กว้างกว่า ซึ่งหมายถึงว่าปริมาณของ PEI ช่วยทำให้สมบัติของสารแขวนลอยดีขึ้นนั่นเอง

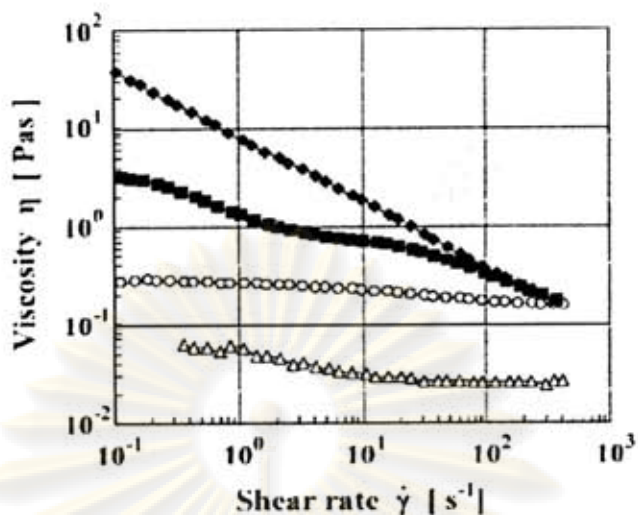
ในปี 2006 A. Nasu *et al.*<sup>[21,22]</sup> ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใน decamethylcyclopentasiloxane และใช้ polyoxyethylene(POE)-modified silicones เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ POE-modified silicones ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ แบบ branch แบบ linear (AB)<sub>n</sub> และแบบ linear (ABA) ดังแสดงในรูปที่ 2.23



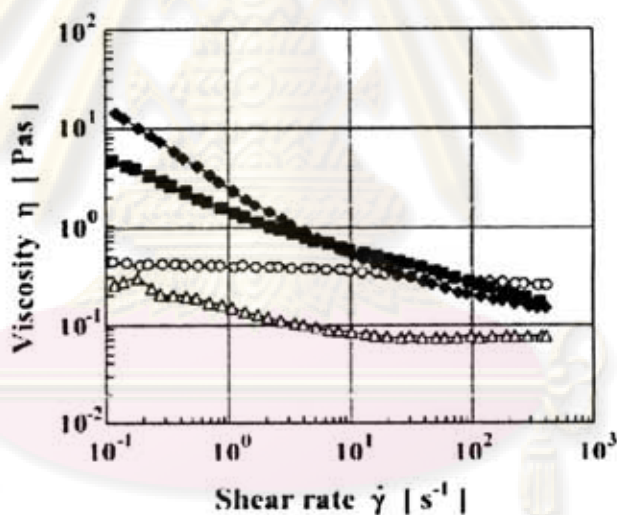
รูปที่ 2.23 โครงสร้างโมเลกุลของ polyoxyethylene(POE)-modified silicones (ก) แบบ branch (ข) แบบ (AB)<sub>n</sub> และ (ค) แบบ (ABA)<sup>[22]</sup>

ในสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงชนิดเดียว อนุภาคของซิงค์ออกไซด์เพียงชนิดเดียว หรือมีทั้งอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ผสมกัน จากการศึกษาพบว่า สารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคเพียงชนิดเดียวจะมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบ newtonian และมีความหนืดต่ำโดยไม่มี ความแตกต่างจากการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ส่วนในสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคผสมจะมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบ shear thinning เมื่อเตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ branch และแบบ linear (AB)<sub>n</sub> แต่ในสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ linear (ABA) จะมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบ newtonian ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ถึง 2.26





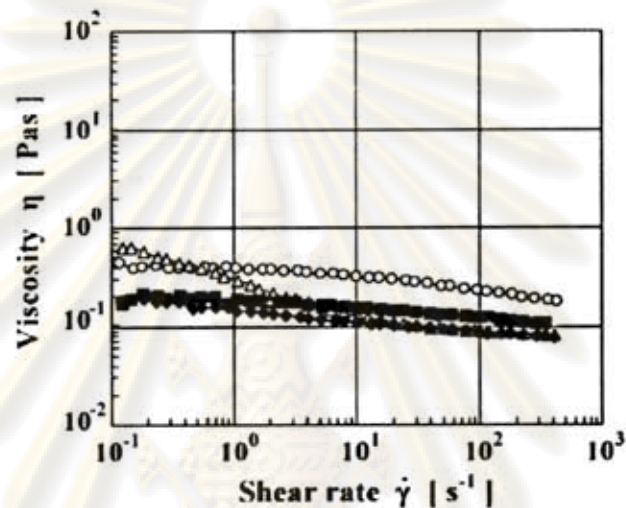
รูปที่ 2.24 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มีโครงสร้างตัวแบบ branch (○)  $\text{TiO}_2$  (■)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 50/50$  (◆)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 25/75$  และ (△)  $\text{ZnO}^{[22]}$



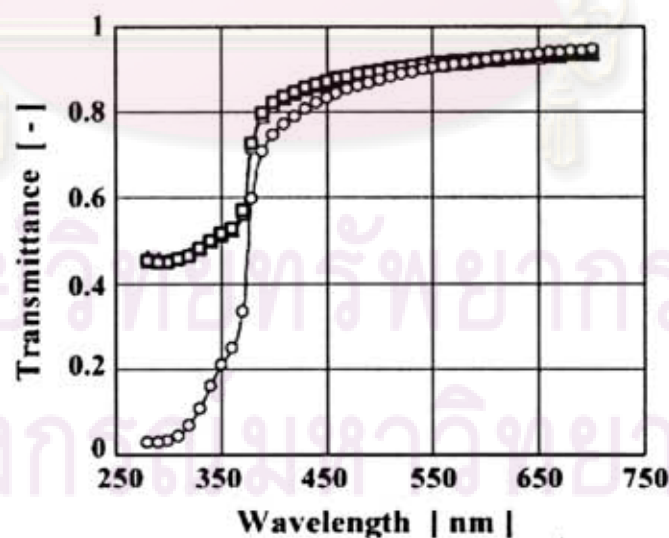
รูปที่ 2.26 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มีโครงสร้างตัวแบบ linear (AB)<sub>n</sub> (○)  $\text{TiO}_2$  (■)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 50/50$  (◆)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 25/75$  และ (△)  $\text{ZnO}^{[22]}$

และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการวัดค่าการยอมให้แสงส่องผ่าน (transmittance) ของสารแขวนลอยด้วย และพบว่าสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อซิงค์ออกไซด์ ในอัตราส่วน 25 ต่อ 75 ยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นส่องผ่านได้มากแต่ยอมให้แสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตผ่านได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.27

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคและความเสถียรของสารแขวนลอย และยังไม่ได้อธิบายโดยละเอียดในเรื่องเคมีพื้นผิวและกระบวนการแยกอนุภาคโดยสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ ตัวกลางที่ใช้ และสารช่วยกระจายตัวในระบบ จึงเป็นสิ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปสู่การอธิบายกระบวนการการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนและความเสถียรของสารแขวนลอย



รูปที่ 2.26 พฤติกรรมการไหลตัวของสารช่วยกระจายตัวที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายที่มีโครงสร้างตัวแบบ linear (ABA) (○)  $\text{TiO}_2$  (■)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 50/50$  (◆)  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 25/75$  และ (△)  $\text{ZnO}$ <sup>[22]</sup>



รูปที่ 2.27 ค่าการยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของสารแขวนลอยเจือจาง  $\text{TiO}_2/\text{ZnO} = 25/75$  ที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัว 10 wt.% ที่มีโครงสร้างแบบ (△) branch (□) linear  $(\text{AB})_n$  และ (○) linear  $(\text{AB})$ <sup>[22]</sup>

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

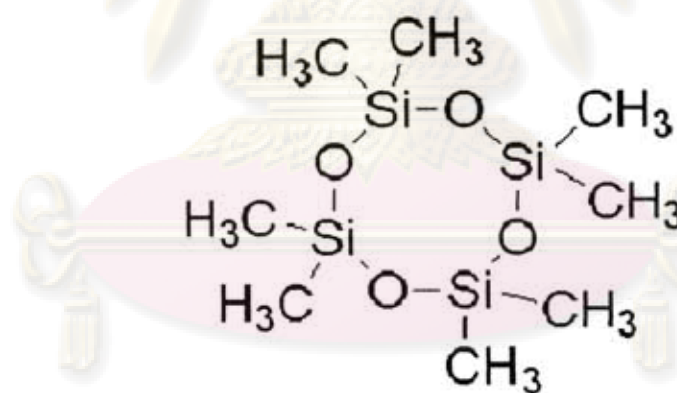
#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 โทเทเนียมไดออกไซด์

ผงโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงโทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตร (K37277308 719 , Merck KGaA , Germany) โดยสมบัติของผงโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ก

##### 3.1.2 น้ำมันซิลิโคน

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันซิลิโคนที่เลือกใช้ คือ Octamethylcyclotetrasiloxane ของบริษัท Fluka ที่มีโครงสร้างโมเลกุล คือ  $(C_8H_{24}O_4Si_4)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสมบัติอื่นๆ ของน้ำมันซิลิโคนชนิดนี้แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

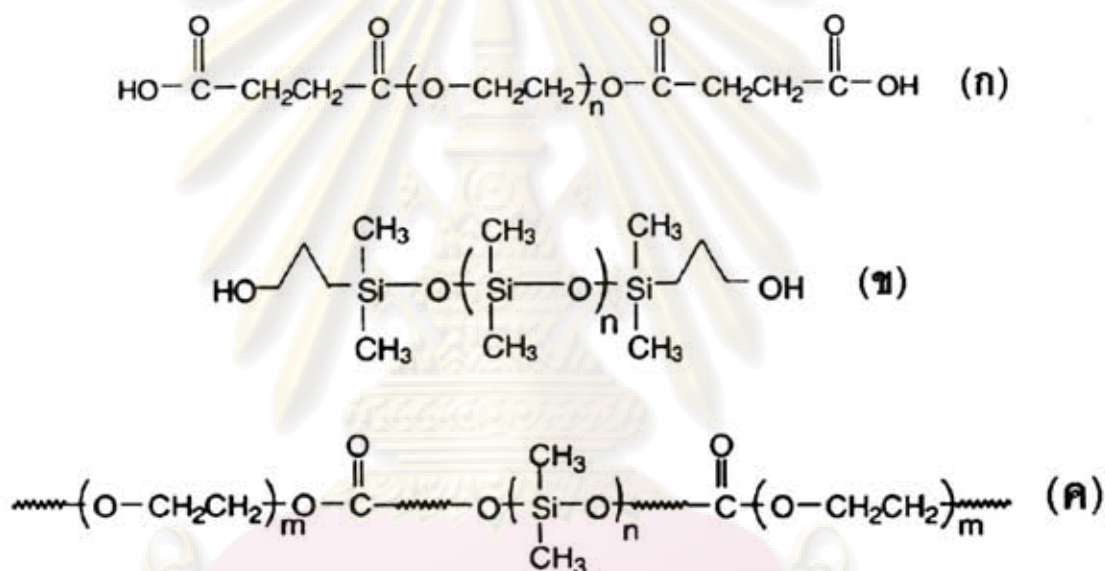


รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของน้ำมันซิลิโคน Octamethylcyclotetrasiloxane

##### 3.1.3 สารช่วยกระจายตัว

สารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer หรือ (PEG-PDMS-PEG) ซึ่งมาจากการทำ copolymerization ระหว่าง PEG diacid (รูป 3.2 ก) และ PDMS diol (รูป 3.2 ข) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.3.1 เนื่องจาก Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene

glycol) triblock copolymer ชนิดนี้มีน้ำมันซิลิโคนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง (polydimethyl siloxane (PDMS)) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ค) ซึ่งจะทำให้สารช่วยกระจายตัวนี้สามารถรวมตัวกับตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาเนื่องจากเป็นสารชนิดเดียวกัน นอกจากนี้ส่วนปลายทั้งสองด้านของสารช่วยกระจายตัวยังมีความเป็นขั้วสูงซึ่งคาดว่าจะสามารถเกาะบนผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีประจุได้ดี โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 4 แบบ โดยแบ่งตาม degree of polymerization (ค่า m และ n ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค) คือ มีค่า (PEG:PDMS:PEG) เป็น 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ (ก) PEG diacid (ข) PDMS diol และ (ค) PEG-PDMS-PEG triblock copolymer.

### 3.2 สมบัติทางกายภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 3.2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (Bruker AXS) โดยใช้มุม  $2\theta$  จาก 10 ถึง 80 องศา แล้วนำกราฟดิฟแฟร็กโตแกรมและค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟดิฟแฟร็กโตแกรมและข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลของ JCPDS file (Joint Committee on Power Diffraction Standard file) ในการวิเคราะห์เฟสของสาร

### 3.2.2 ขนาดของอนุภาคเดี่ยว

นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาศึกษาขนาดอนุภาคเดี่ยวและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ด้วยเทคนิค Transmission electron microscopy (JEM-2100) โดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มากระจายตัวในน้ำกลั่นโดยการ stirred แล้วนำไปหยดลงบนกริด จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งใน desiccator แล้วนำไปศึกษาขนาดอนุภาคเดี่ยว

### 3.3 กระบวนการเตรียมสารแขวนลอย

ทำการเตรียมสารแขวนลอยของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนด้วยปริมาณความเข้มข้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5.00 wt% และใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20 1.40 และ 5.00 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียม ดังนี้

1. คำนวณและชั่งส่วนผสมระหว่าง ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ น้ำมันซิลิโคน และสารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers โดยกำหนดที่ปริมาณของน้ำมันซิลิโคนให้เท่ากับ 15 กรัม ใช้ปริมาณความเข้มข้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5.00 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
2. ผสมน้ำมันซิลิโคนกับสารช่วยกระจายตัวโดยใช้แท่งแก้ว จากนั้นนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที
3. เติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในน้ำมันซิลิโคนและสารช่วยกระจายตัวที่ผ่านการ stirred จากนั้นนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที
4. นำสารแขวนลอยไป ultrasonic ด้วยเครื่อง ultrasonic ชนิด probe (Ultrasonic liquid processors , Vibra-Cell™ VC 505) ที่แอมพลิจูดเท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 4 นาที
5. นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ศึกษาพฤติกรรมกลศาสตร์ ศึกษาสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอน และศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมในการเตรียมสารแขวนลอย

ความเข้มข้นของสาร ช่วยกระจายตัว (wt%)	TiO <sub>2</sub> (กรัม)	Silicone oil (กรัม)	สารช่วยกระจายตัว (กรัม)
0.00	0.75	15.00	0.0000
0.20	0.75	15.00	0.0015
0.40	0.75	15.00	0.0030
0.60	0.75	15.00	0.0045
0.80	0.75	15.00	0.0060
1.00	0.75	15.00	0.0075
1.20	0.75	15.00	0.0090
1.40	0.75	15.00	0.0105
5.00	0.75	15.00	0.0375

### 3.4 สมบัติของสารแขวนลอย

ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ใน  
ตัวกลางน้ำมันซิลิโคน ที่ใช้สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-  
ethylene glycol) triblock copolymers ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันและความเข้มข้นแตกต่างกัน  
โดยศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.4.1 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวโดยการวัดค่าความหนืดด้วย  
เครื่อง Brookfield Viscometer (Model RVDVE 230 PV-E) โดยใช้ small sample adapter  
และเข็มรูปทรงกระบอกเบอร์ 21 ที่ความเร็วรอบในการวัดเท่ากับ 10, 20, 50, 60 และ 100  
รอบต่อนาที เพื่อศึกษาลักษณะการไหลตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ โดยทำการวัดทันที  
หลังจากการ ultrasonic และวัดซ้ำเมื่อเวลาผ่านไป 7 15 30 และ 45 วัน สำหรับการวัดซ้ำจะ  
ทำการ re-dispersed สารแขวนลอยที่ตั้งทิ้งไว้ด้วยการกวนโดยใช้แท่งแก้วให้สารแขวนลอยเกิด  
การกระจายตัวในเบื้องต้นก่อน แล้วนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยไป  
ทำการ ultrasonic ด้วยเครื่อง ultrasonic แบบ bath เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาวัดค่า  
ความหนืด

### 3.4.2 สมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติการส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Analytik Jena AG Analytical Solutions, Specord® S100 Bio-Bradford Assay) โดยดูดสารแขวนลอยที่เตรียมได้ประมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงใน quartz cuvette แล้วนำไปวัดค่าการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยวัดค่า % Transmittance (%T) ที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 200 – 800 นาโนเมตร ใช้เวลา intergration time เท่ากับ 15.00 มิลลิวินาที และใช้ quartz cuvette เป็น blank test ในการวัด โดยทำการวัดค่า %T ของสารแขวนลอยที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 70 80 และ 90 นาที หลังจากการ ultrasonic ด้วย ultrasonic bath เพื่อศึกษาอัตราการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

### 3.4.3 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอน โดยดูดสารแขวนลอยใส่ในหลอดทดลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และปิดหลอดทดลองให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำมันซิลิโคน แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อดูลักษณะการตกตะกอนและวัดค่าความสูงของตะกอนที่เวลาต่าง ๆ คือ วันที่ 1 3 5 7 และ 10 วัน ตามลำดับ

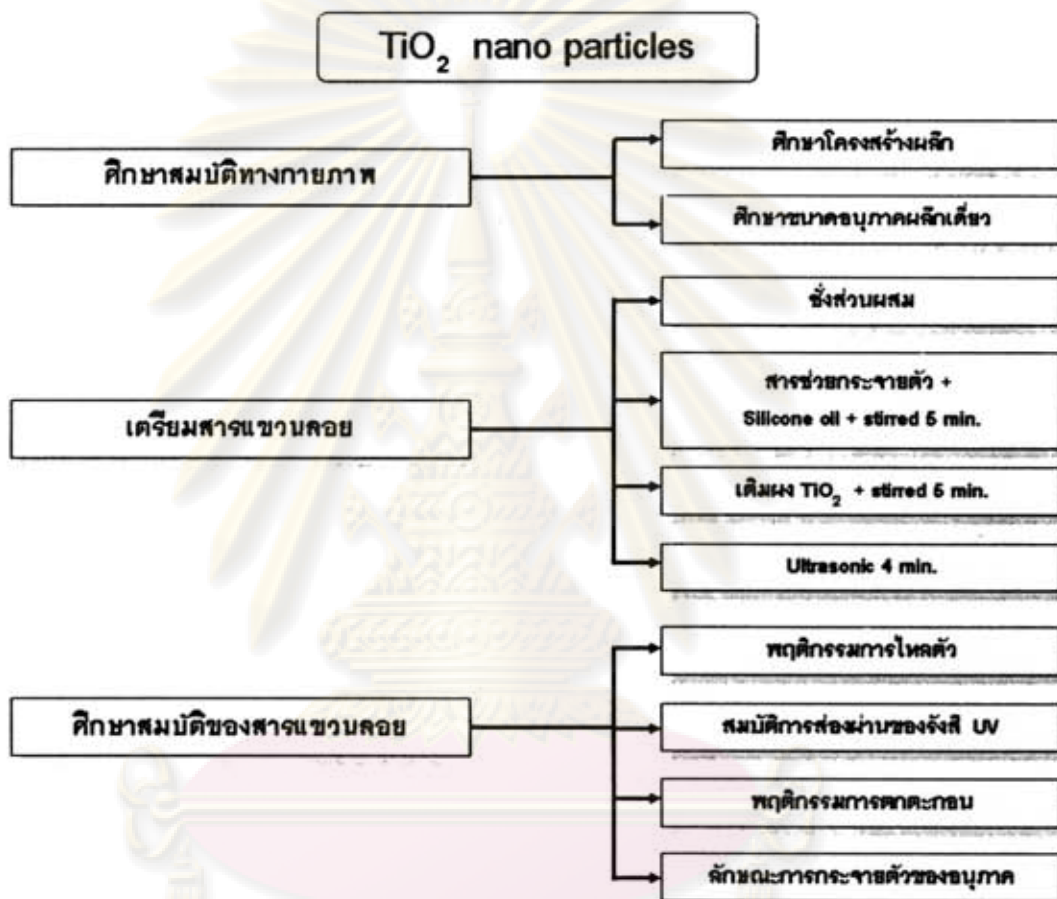
เนื่องจากสารแขวนลอยทั้งหมดที่ทำการศึกษาก่อนโดยสมบูรณ์ภายใน 1 วัน จึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการ re-dispersed สารแขวนลอยโดยใช้แท่งแก้วกวนให้สารแขวนลอยเกิดการกระจายตัวในเบื่องต้นก่อน แล้วนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยไปทำการ ultrasonic ด้วยเครื่อง ultrasonic แบบ bath เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยใส่ในหลอดทดลองพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร แล้ววัดค่าความสูงของตะกอนและถ่ายรูปที่เวลา 0 10 20 30 40 50 60 70 80 และ 90 นาที ตามลำดับ

### 3.4.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย

นำสารแขวนลอยที่ผ่านการ re-dispersed แล้วมาทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยด้วยกล้อง Optical Microscope (OLYMPUS BH-2-UMA) นำสารแขวนลอยหยดลงบนกระจกสไลด์แล้วปิดทับด้วย cover slide แล้วนำไปถ่ายรูปด้วยกล้อง Optical Microscope แบบแสงส่องผ่านโดยใช้กำลังขยาย 20 และ 50 เท่า

จากนั้นศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (JEOL JSM 6400) โดยนำสารแขวนลอยที่ผ่านการ re-dispersed หยดลงบนกระจกสไลด์แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปฉาบผิวด้วยทองคำแล้วนำไปถ่ายภาพที่กำลังขยาย 100 10,000 และ 30,000 เท่า

ขั้นตอนในการศึกษาสมบัติของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีการและขั้นตอนในการเตรียมสารแขวนลอย รวมทั้งขั้นตอนในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารแขวนลอยแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของผงไทเทเนียมไดออกไซด์  
ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยและการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารแขวนลอย

### 3.5 วิธีการแยกอนุภาคระดับนาโนในสารแขวนลอย

ในการเตรียมสารแขวนลอยด้วยวิธีการใช้เครื่อง ultrasonic ชนิด probe ultrasonic นั้น แม้ว่าจะสามารถทำให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดี แต่พบว่ายังมีอนุภาคบางส่วนที่ยังไม่สามารถกระจายตัวได้ทั้งหมด จึงทำให้ในสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีทั้งอนุภาคใน



ระดับนาโนและอนุภาคที่จับกลุ่มรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ๆ จึงต้องหาวิธีคัดแยกอนุภาคในสารแขวนลอยเพื่อให้ได้เฉพาะอนุภาคในระดับนาโนกระจายตัวอยู่ในน้ำมันซิลิโคน

วิธีการแยกอนุภาคระดับนาโนในสารแขวนลอยในงานวิจัยนี้ ทำโดยการนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาทำการ re-dispersed จากนั้นนำไปคัดแยกอนุภาค ด้วยเครื่อง centrifuge โดยใช้ระยะเวลาในการ centrifuge ที่เวลาต่าง ๆ คือ 1 2 3 4 และ 5 นาที และใช้ค่าความเร็วรอบในการ centrifuge ที่ 1,000 2,000 3,000 4,000 5,000 และ 6,000 รอบต่อนาที เพื่อหาระยะเวลาและค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมในการ centrifuge สำหรับการคัดแยกอนุภาคในสารแขวนลอยเพื่อให้ได้อนุภาคในระดับนาโน จากนั้นนำสารส่วนลอย (supernatant) ที่ได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ

### 3.6 สมบัติของสารส่วนลอย (Supernatant)

จากการศึกษาพบว่าค่าความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการ centrifuge ที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคในสารแขวนลอยจนได้เป็นสารส่วนลอยที่ใสและคาดว่ามีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนกระจายตัวอยู่ในสารส่วนลอย คือ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นสารส่วนลอยที่ได้มาศึกษาสมบัติการส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยดูดสารส่วนลอยประมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงใน quartz cuvette แล้วนำไปวัดค่า % Transmittance ที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 200 – 800 นาโนเมตร ใช้เวลา intergration time เท่ากับ 15.00 มิลลิวินาที และใช้ quartz cuvette เป็น blank test

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

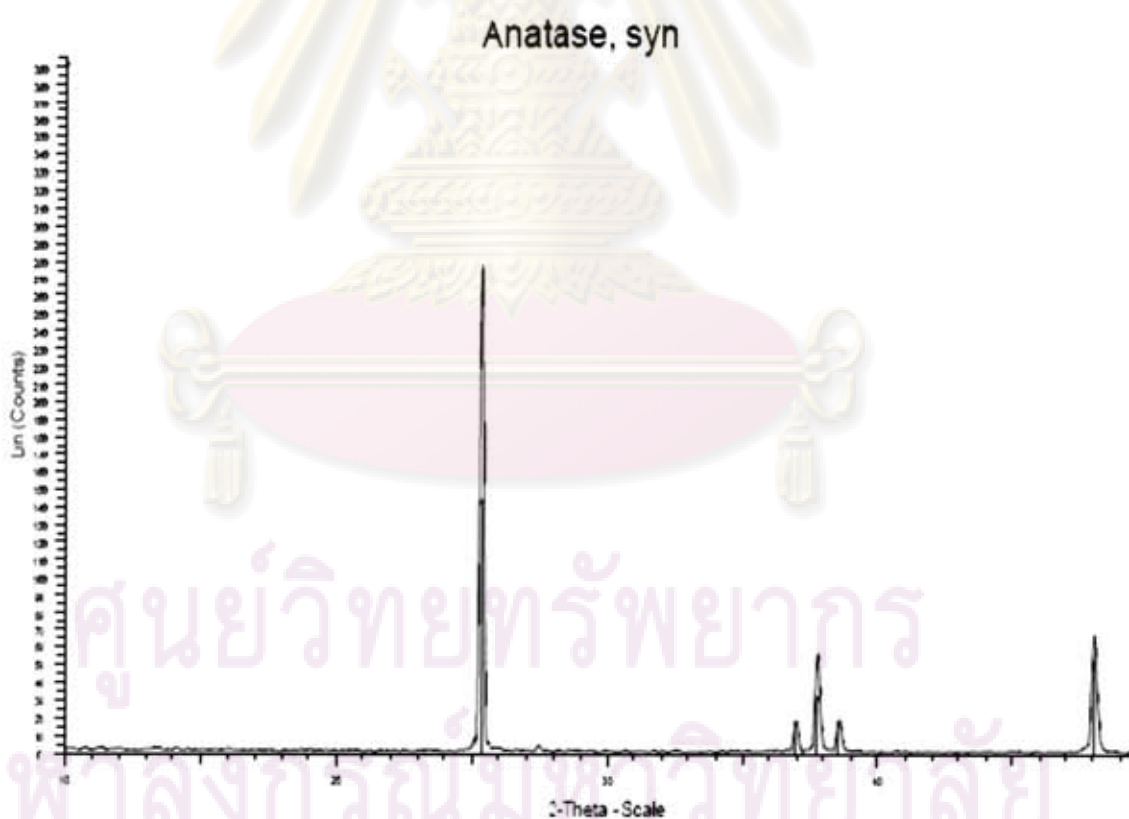
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 4.1.1 โครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (Bruker AXS) พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Anatase มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ tetragonal ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบเปรียบเทียบกับดิฟแฟรกโตแกรมและข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลของ JCPDS file (Joint Committee on Power Diffraction Standard file) ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

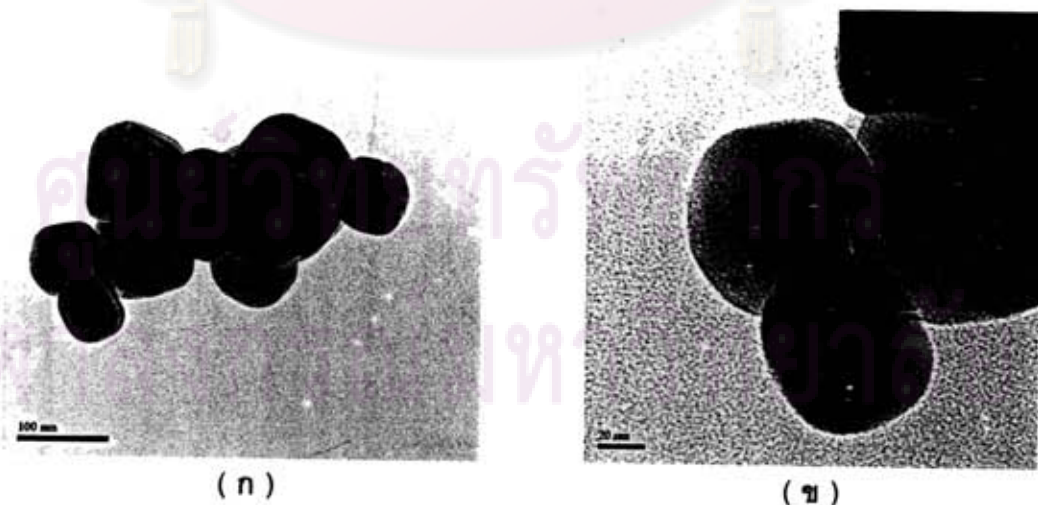
### ตารางที่ 4.1 JCPDS (21-1272) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด anatase

21-1272		Wavelength: 1.54056										
TiO <sub>2</sub>		2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l	
Titanium Oxide												
		25.281	100	1	0	1	118.434	4	2	1	9	
		36.946	10	1	0	3	120.099	2	2	2	8	
		37.80	20	0	0	4	121.720	<2	4	1	3	
Anatase, syn												
Rad.:	$\lambda$ :	Filter:	d-sp:									
				38.575	10	1	1	2	122.331	2	4	0
				48.049	35	2	0	0	131.029	2	4	2
				53.890	20	1	0	5	135.991	<2	3	2
				55.060	20	2	1	1	137.384	4	4	1
				62.119	4	2	1	3	143.879	2	3	0
				62.688	14	2	0	4	150.028	4	4	2
				68.760	6	1	1	6	152.622	2	0	0
				70.309	6	2	2	0				
				74.029	<2	1	0	7				
				75.029	10	2	1	5				
				76.017	4	3	0	1				
				80.725	<2	0	0	8				
				82.136	2	3	0	3				
				82.659	6	2	2	4				
				83.147	4	3	1	2				
				93.217	2	2	1	7				
				94.178	4	3	0	5				
				95.139	4	3	2	1				
				98.315	2	1	0	9				
				99.801	2	2	0	8				
				101.218	2	3	2	3				
				107.444	4	3	1	6				
				108.959	4	4	0	0				
				112.836	<2	3	0	7				
				113.857	2	3	2	5				
				114.904	2	4	1	1				
Sys.: Tetragonal S.G.: I4 <sub>1</sub> /amd (141)												
a:	3.7852	b:		c:	9.5139	A:		C:	2.5134			
$\alpha$ :		$\beta$ :		$\gamma$ :		Z:	4	mp:				
Ref: Ibid.												
Dx:	3.893	Dm:		SS/FOM: F <sub>30</sub> = 74(.0116, 35)								
Color: Colorless												
Pattern taken at 25 C. Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA. Anatase and another polymorph, brookite (orthorhombic), are converted to rutile (tetragonal) by heating above 700 C. Pattern reviewed by Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. O2 Ti type. PSC: U12. Validated by calculated pattern. See ICSD 9852 (PDF 71-1186), Vol. 79.90, Volume[CD]: 136.31.												

© 2003 JCPDS - International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
ICPDFWIN v. 2.4

#### 4.1.2 ขนาดของอนุภาคเดี่ยว

จากการนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาศึกษาขนาดอนุภาคเดี่ยวและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (JEM-2100) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลม และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร และพบว่าอนุภาคมีการจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มและมีบางส่วนของอนุภาคเกิดการหลอมจนเชื่อมติดเป็นอนุภาคเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) กำลังขยายเท่ากับ 50,000 เท่า และ (ข) กำลังขยายเท่ากับ 200,000 เท่า

## 4.2 สมบัติของสารแขวนลอย

นำสารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มี degree of polymerization ต่างกัน ที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ มาศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

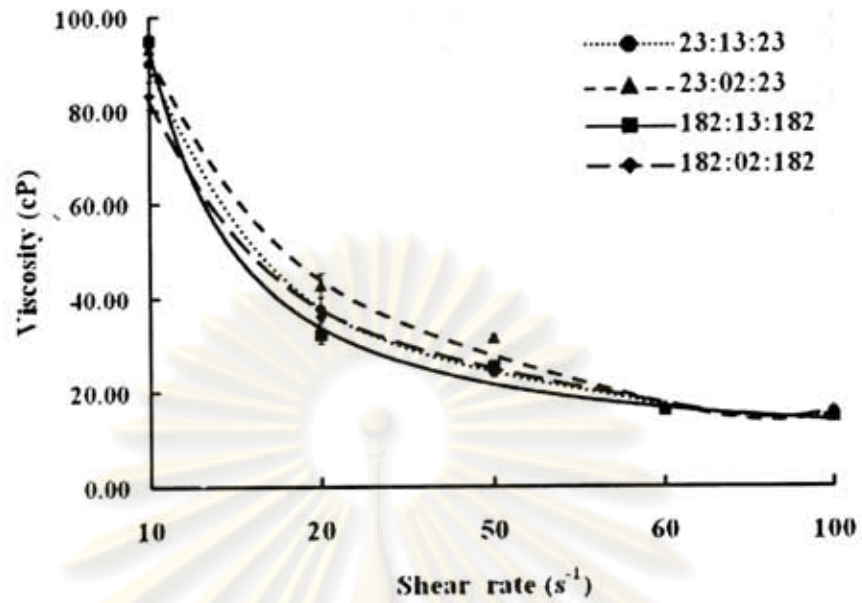
### 4.2.1 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยโดยการวัดค่าความหนืดที่ shear rate ต่าง ๆ ตั้งแต่ 10 – 100 รอบต่อวินาที พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันในปริมาณความเข้มข้นที่เท่ากัน จะมีพฤติกรรมการไหลตัวที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.5 สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทำการการวัดค่าความหนืดทันทีหลังจาก ultrasonic ด้วย ultrasonic probe

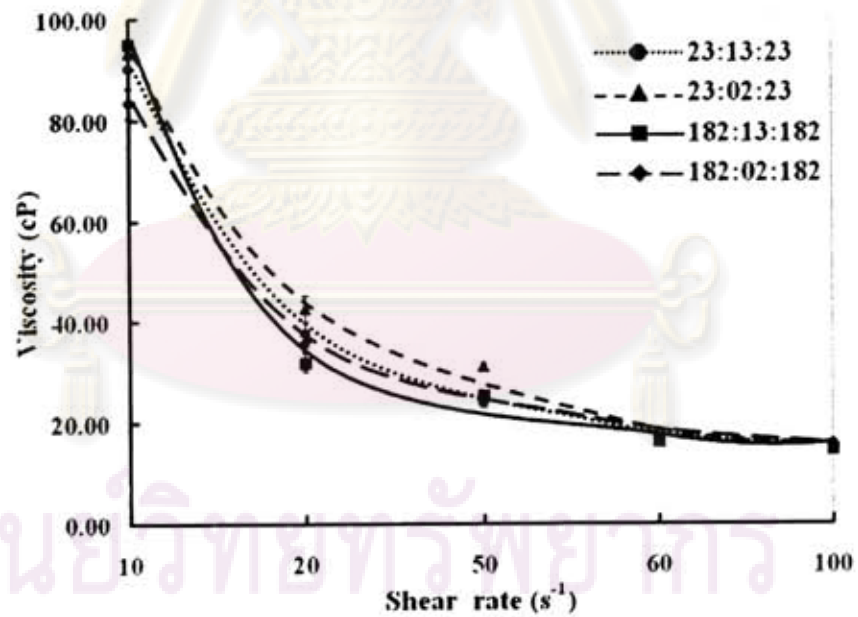
จากรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ ๆ คือร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าสารแขวนลอยทั้งหมดมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ shear thinning และมีระดับความเป็น shear thinning ที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ มีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ newtonian และมีค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

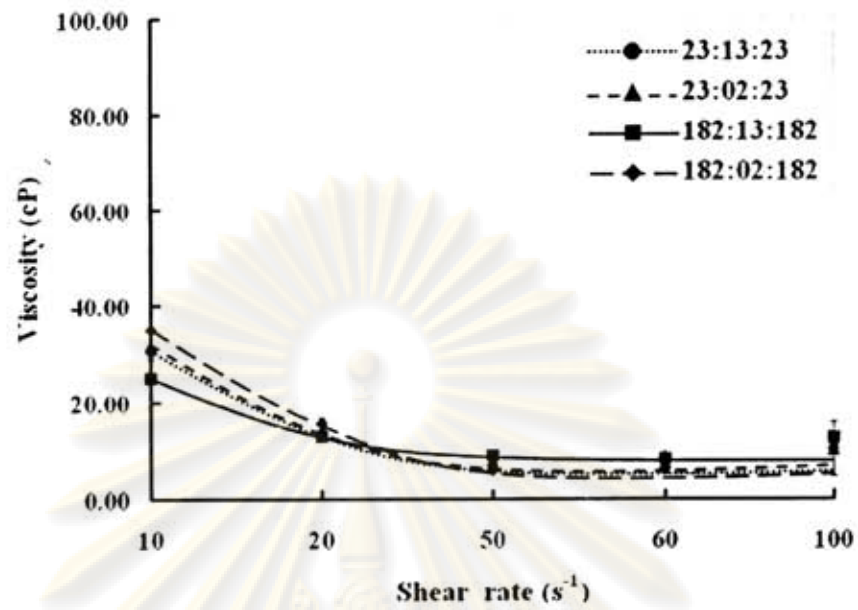
เมื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยโดยเปรียบเทียบการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบเดียวกันแต่ใช้ปริมาณความเข้มข้นที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.9 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะส่งผลให้สารแขวนลอยมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ shear thinning ซึ่งแสดงว่าสารแขวนลอยนั้นมีพฤติกรรมเสมือนเป็นของแข็ง (solid-like behavior) ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) จะมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ newtonian ซึ่งเป็นพฤติกรรมเสมือนของเหลว (liquid-like behavior)



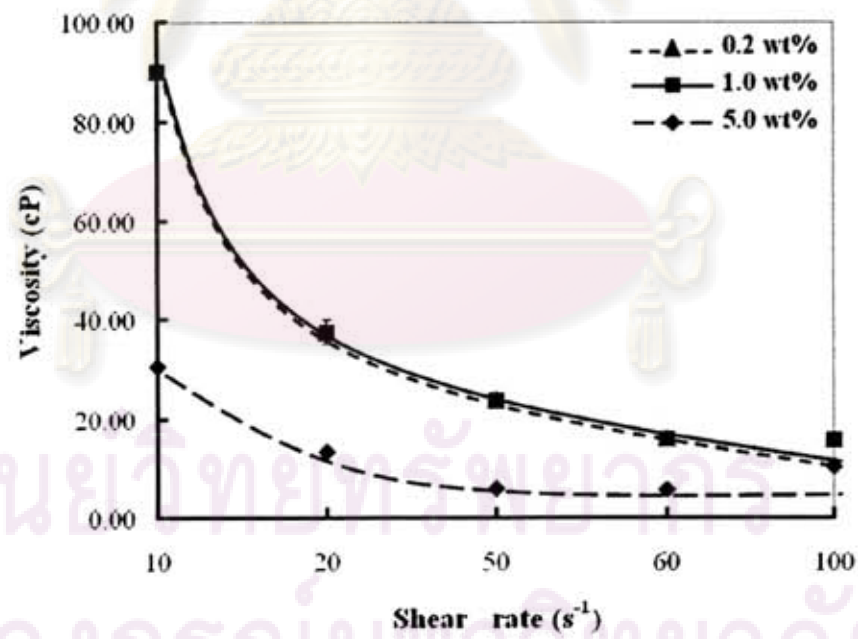
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก



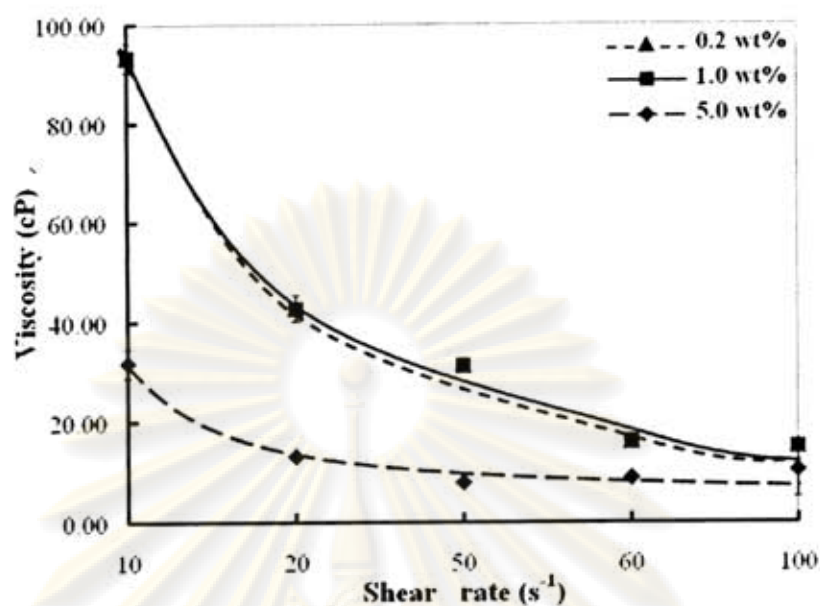
รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก



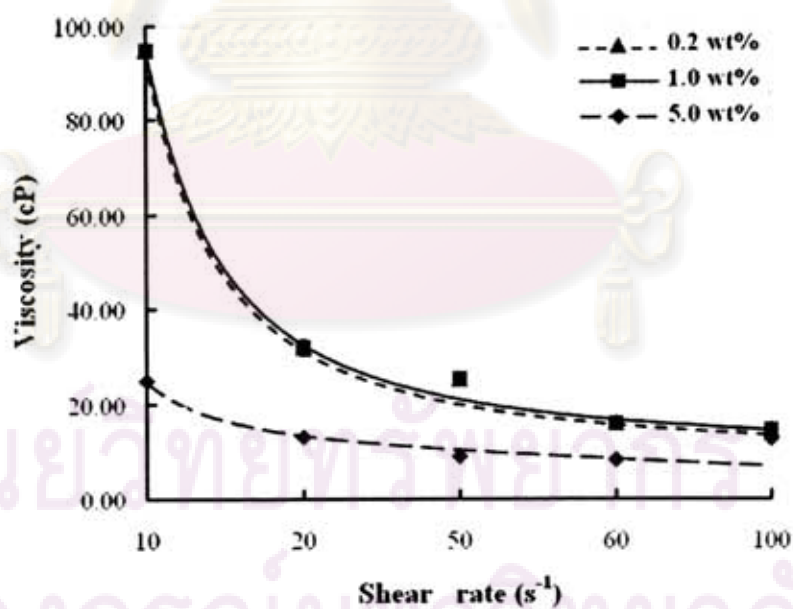
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก



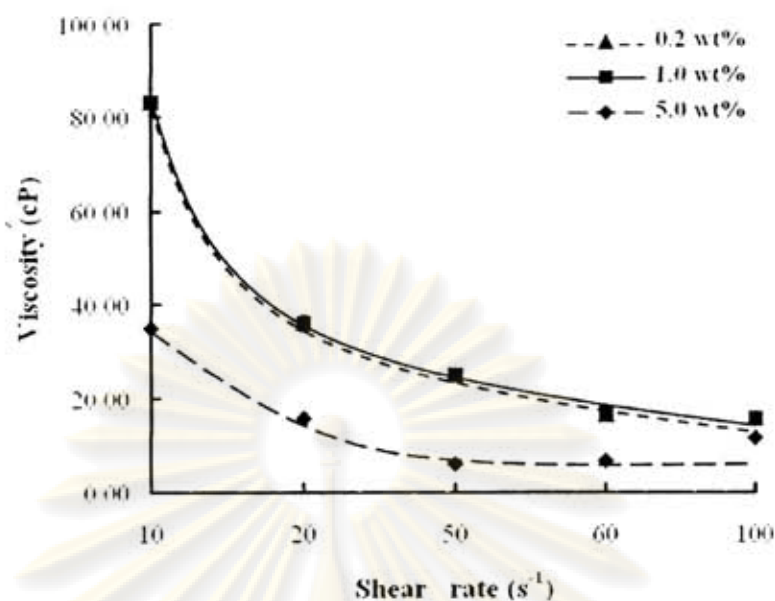
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23



รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182



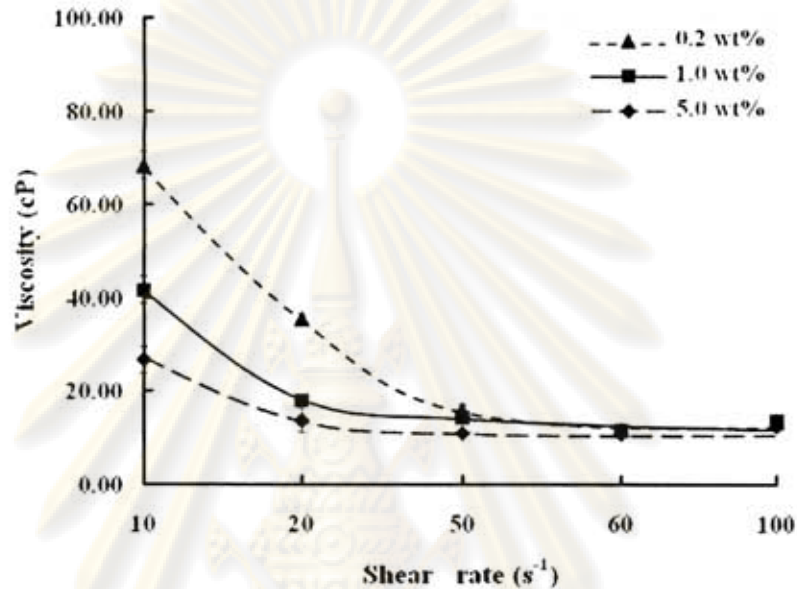
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182

จากผลการศึกษาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย โดยการวัดค่าความหนืดทันทีหลังจาก ultrasonic ด้วย ultrasonic probe พบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 ที่ปริมาณความเข้มข้นเท่า ๆ กัน ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย แต่การใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกัน จะส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย โดยการเติมสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะทำให้สารแขวนลอยมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ shear thinning ซึ่งค่าความเป็น shear thinning ของสารแขวนลอยจะบ่งบอกถึงความเป็น solidly หรือการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคมาก ซึ่งมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคในสารแขวนลอย ในขณะที่การเติมสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง ๆ จะส่งผลทำให้สารแขวนลอยมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ newtonian ซึ่งความเป็น newtonian ของสารแขวนลอยจะบ่งบอกถึงความเป็น liquidly หรืออนุภาคมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันน้อยส่งผลให้สารแขวนลอยนั้นมีพฤติกรรมเสมือนเป็นของเหลว

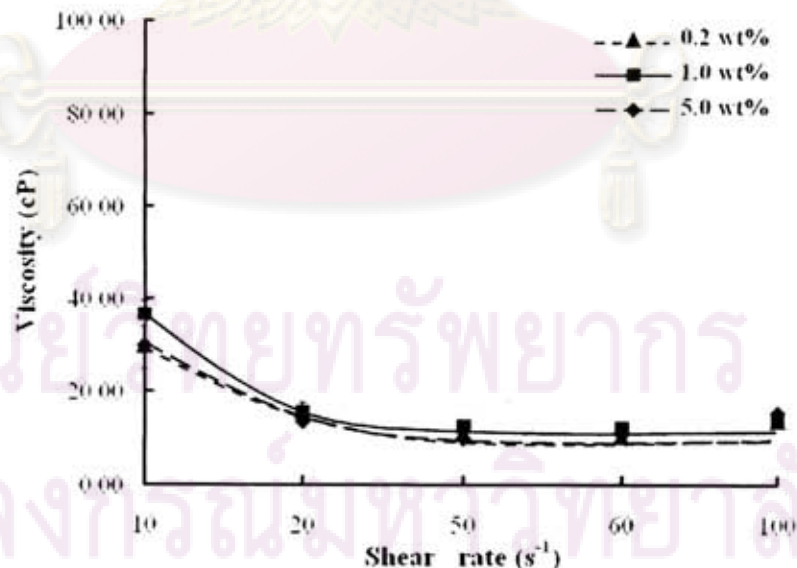
ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่ผ่านการ re-dispersed เมื่อเวลาผ่านไป 7 15 30 และ 45 วัน พบว่าสำหรับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 ได้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มแบบเดียวกัน คือ ในสารแขวนลอยที่เติมสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (ที่ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) โดยในการวัดทันทีหลังจาก ultrasonic ด้วย ultrasonic probe ในวัน



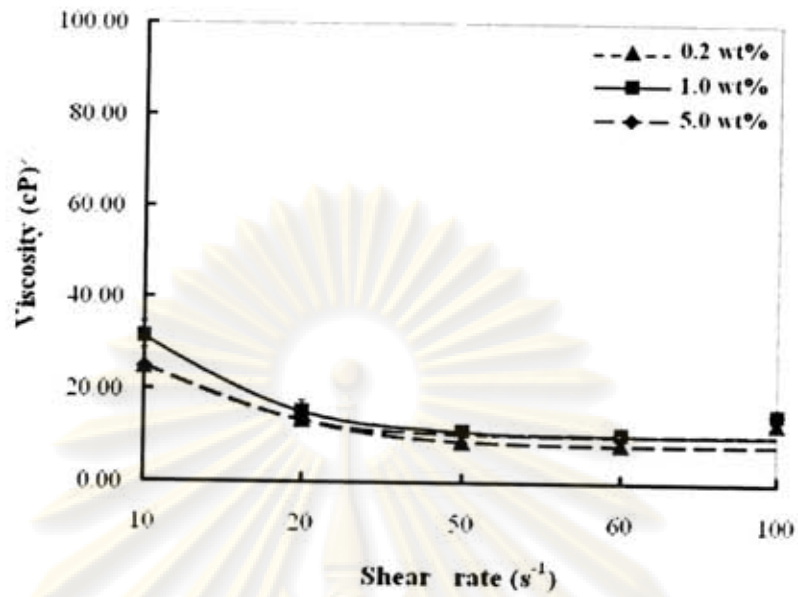
แรกจะมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ shear thinning ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นพบว่าระดับความเป็น shear thinning ของสารแขวนลอยดังกล่าวลดลงแล้วเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.25 ส่วนในสารแขวนลอยที่เติมสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความหนืดของสารแขวนลอยคงที่และพฤติกรรมการไหลตัวยังคงเป็นแบบ newtonian เหมือนในวันแรก



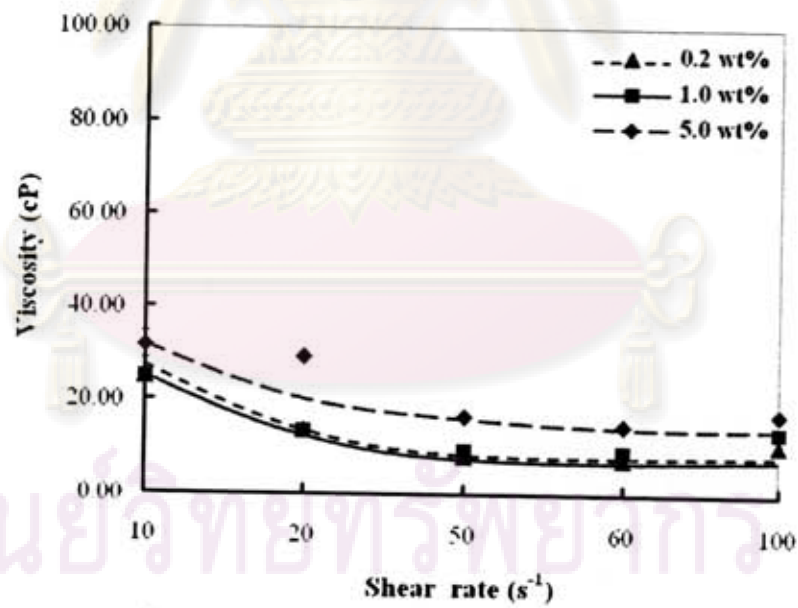
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน



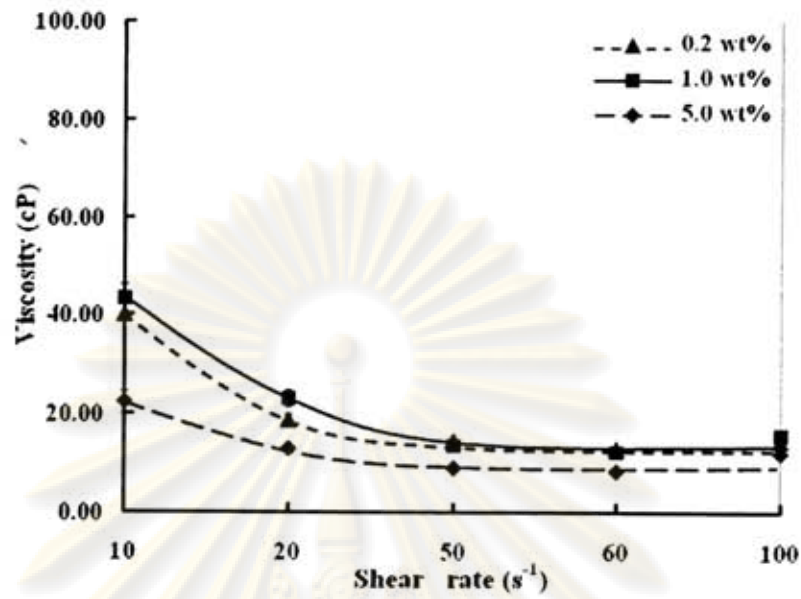
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 15 วัน



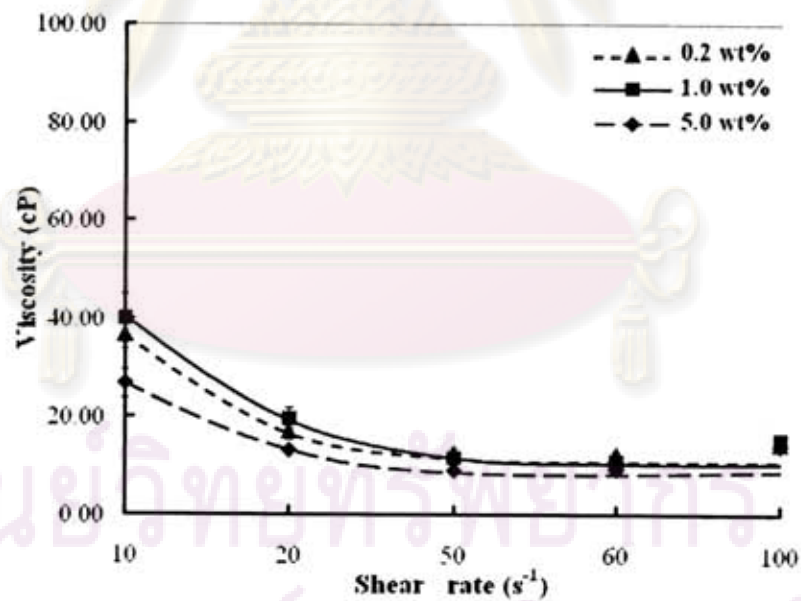
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน



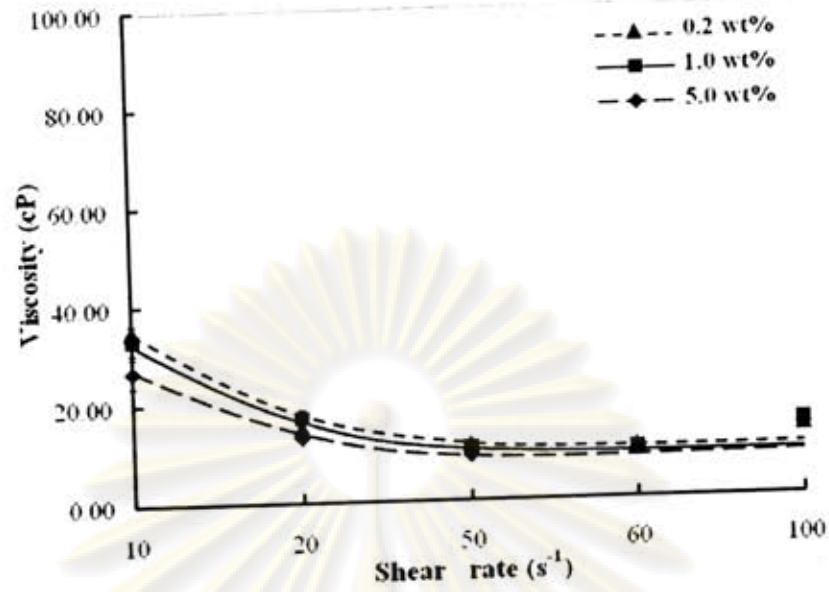
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 หลังจากเวลาผ่านไป 45 วัน



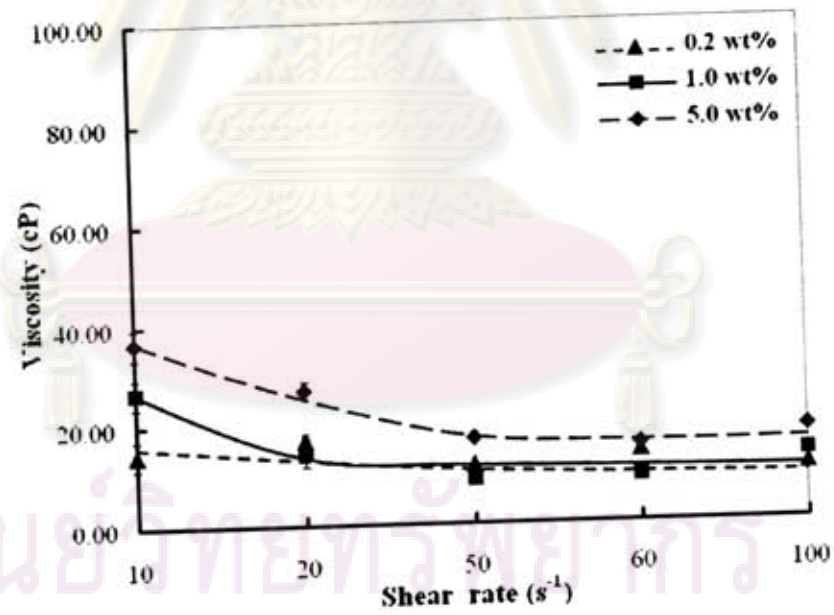
รูปที่ 4.14 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23 หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน



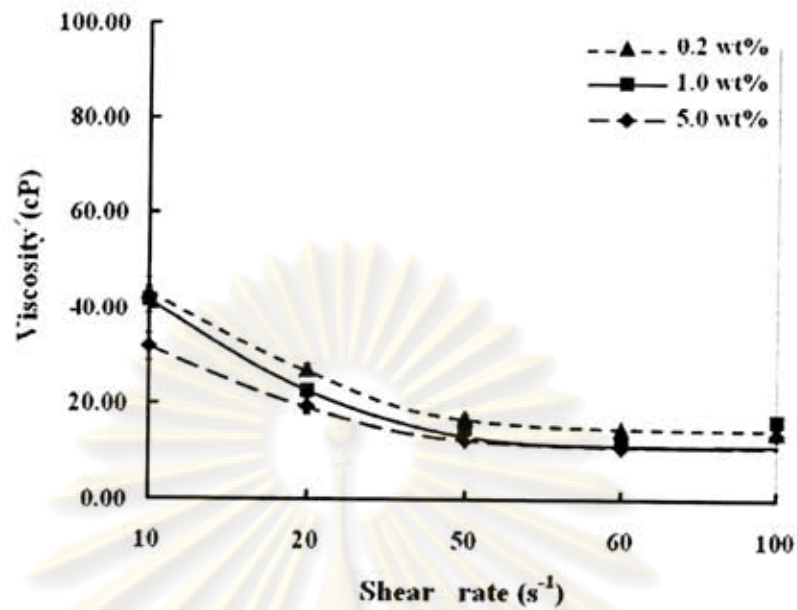
รูปที่ 4.15 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23 หลังจากเวลาผ่านไป 15 วัน



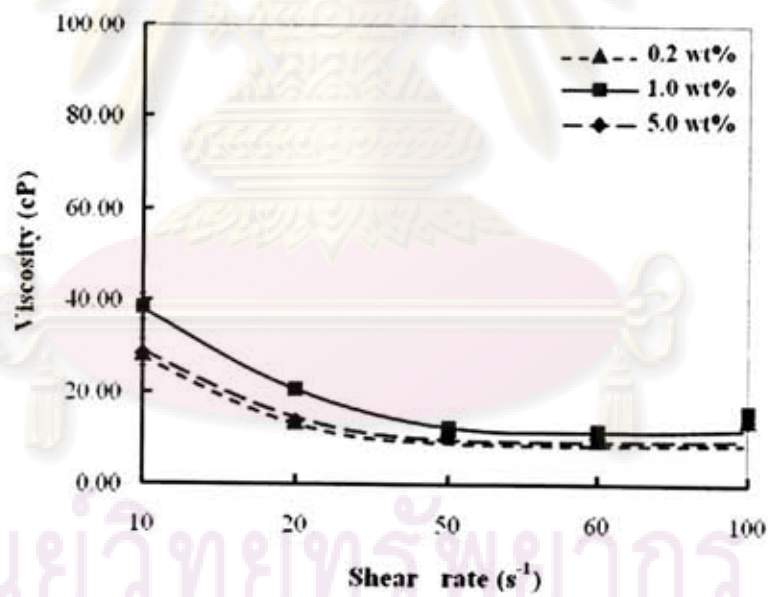
รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23 หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน



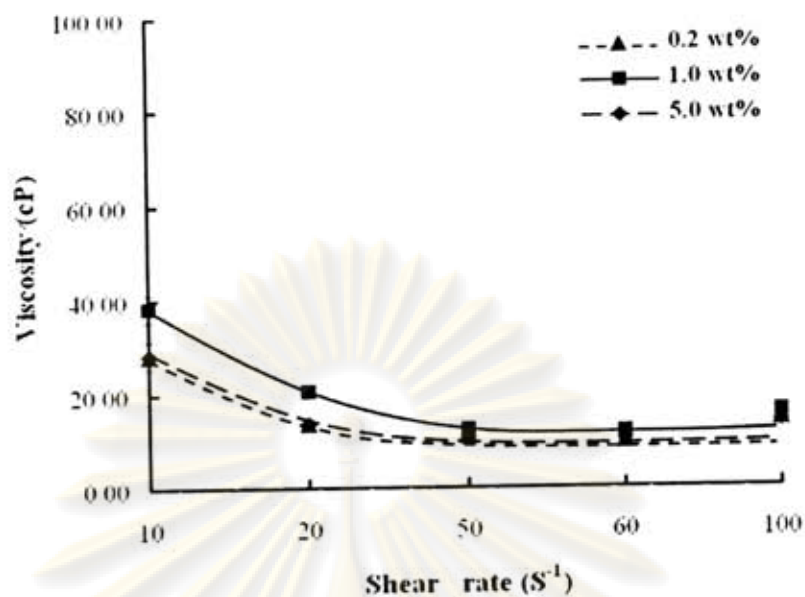
รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23 หลังจากเวลาผ่านไป 45 วัน



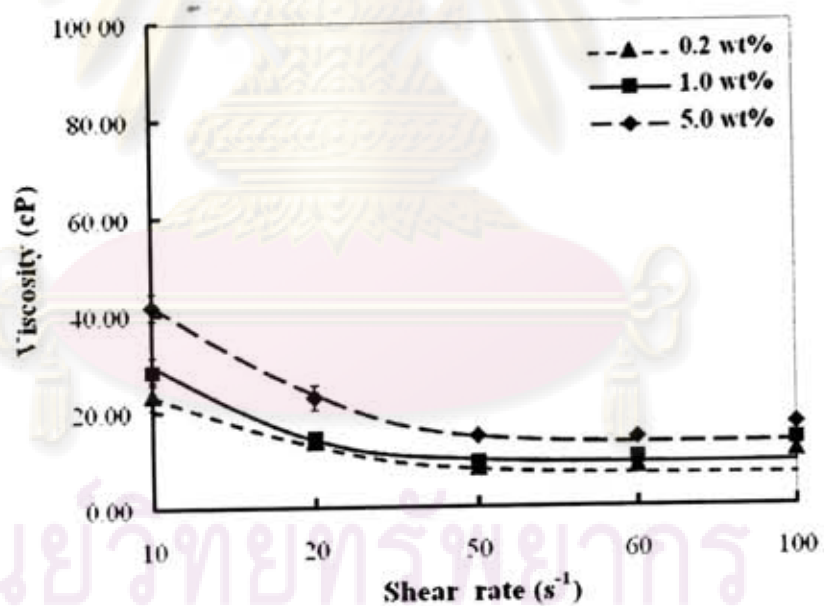
รูปที่ 4.18 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182 หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน



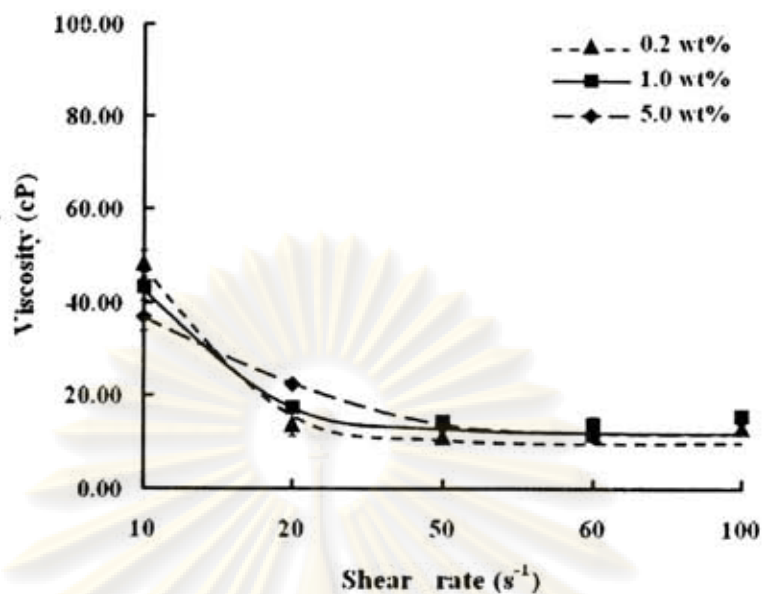
รูปที่ 4.19 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182 หลังจากเวลาผ่านไป 15 วัน



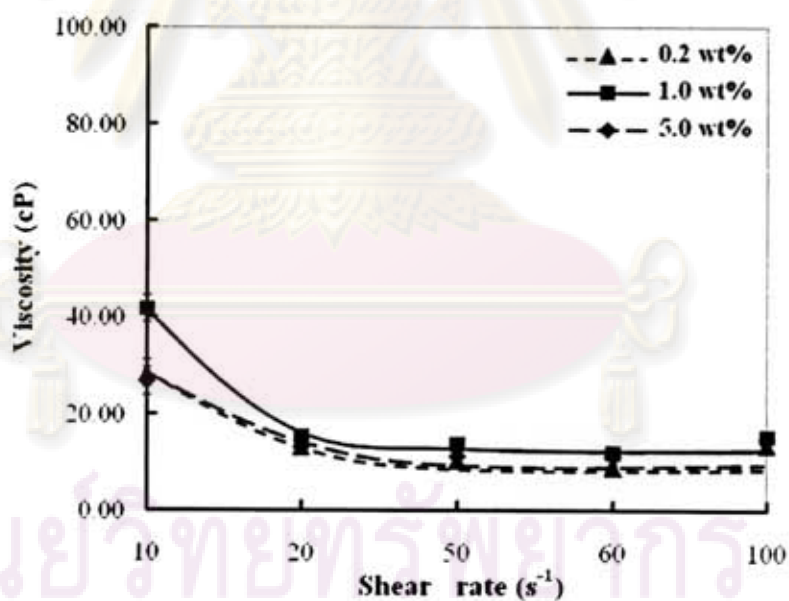
รูปที่ 4.20 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182 หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน



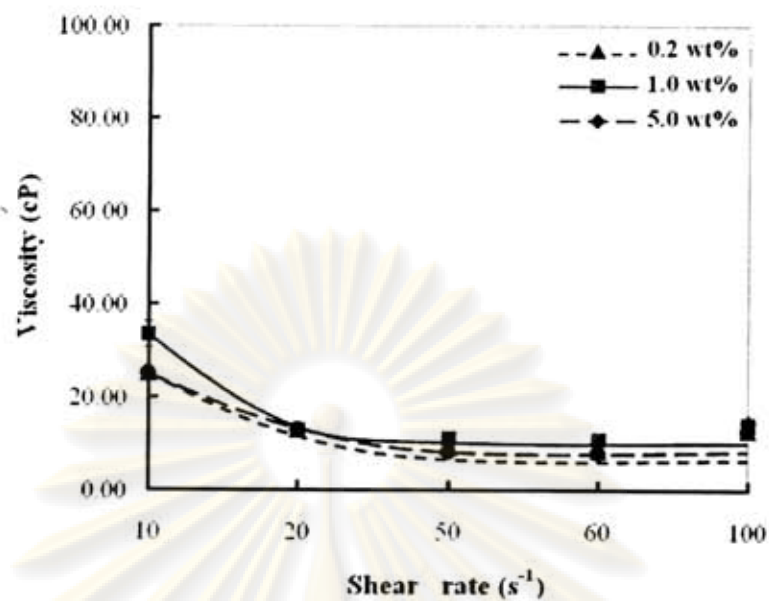
รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182 หลังจากเวลาผ่านไป 45 วัน



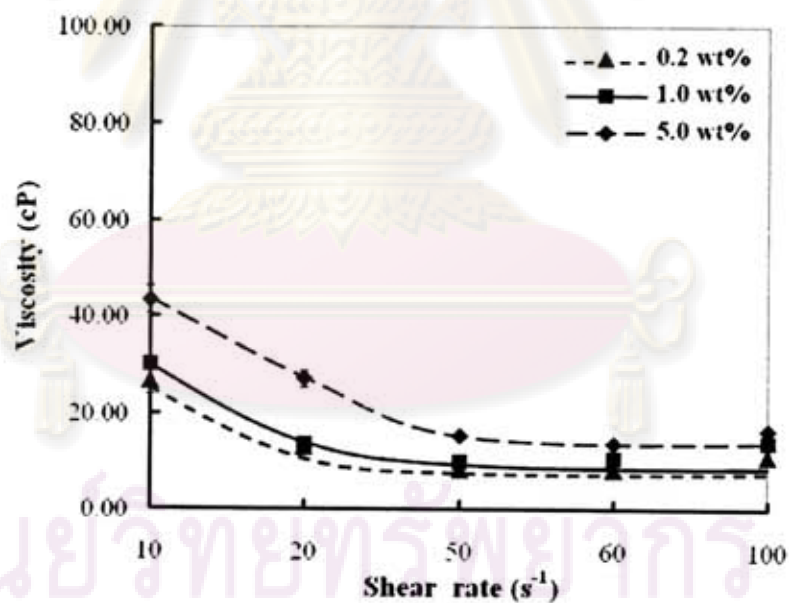
รูปที่ 4.22 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182 หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน



รูปที่ 4.23 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182 หลังจากเวลาผ่านไป 15 วัน



รูปที่ 4.24 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182 หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน



รูปที่ 4.25 พฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182 หลังจากเวลาผ่านไป 45 วัน



จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยทั้งหมด พบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อสมบัติของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ในน้ำมันซิลิโคน โดยจะเห็นได้จากเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่มีโครงสร้างแบบเดียวกันที่ปริมาณความเข้มข้นที่ใช้เท่ากันจะมีค่าความหนืดและรูปแบบของพฤติกรรมในการไหลตัวที่ไม่แตกต่างกันเมื่อทำการวัดที่เวลาต่าง ๆ

แต่ในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติของสารแขวนลอยที่ทำการศึกษา คือ เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) พบว่าเมื่อทำการวัดค่าความหนืดของสารแขวนลอยทันทีหลังจาก ultrasonic ด้วย ultrasonic probe สารแขวนลอยจะมีระดับความเป็น shear thinning ที่สูง เมื่อเวลาผ่านไประดับความเป็น shear thinning จะลดลงจนเปลี่ยนเป็นแบบ newtonian เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 วัน และหลังจากนั้นพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ newtonian และระดับความเป็น newtonian จะมีค่าคงที่ตั้งแต่ทำการวัดครั้งแรกหลังจาก ultrasonic ด้วย ultrasonic probe

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในปริมาณน้อยทำให้ระบบต้องใช้เวลาประมาณ 15 วัน เพื่อให้สารช่วยกระจายตัวที่ใช้ถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์และระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ส่วนการใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในปริมาณมาก ระบบสามารถเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ทันที เนื่องจากในสารแขวนลอยนั้นมีปริมาณของสารช่วยกระจายจำนวนมากเกินพอ ทำให้สามารถถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคได้อย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาอันสั้นและยังอาจมีส่วนที่เหลือกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอยอีกด้วย

#### 4.2.2 สมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ในงานวิจัยนี้ได้นำการศึกษาสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเทคนิค UV Spectrophotometry มาใช้ในการศึกษาความเสถียรของสารแขวนลอย ที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกันที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน ในการศึกษาสมบัติดังกล่าวทำโดยนำสารแขวนลอยที่เข้าสู่ภาวะสมดุลมาทำการ re-dispersed จากนั้นทำการวัดค่า %T ทันทีหลังจาก re-dispersed และเมื่อตั้งสารแขวนลอยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 10 ถึง 90 นาที

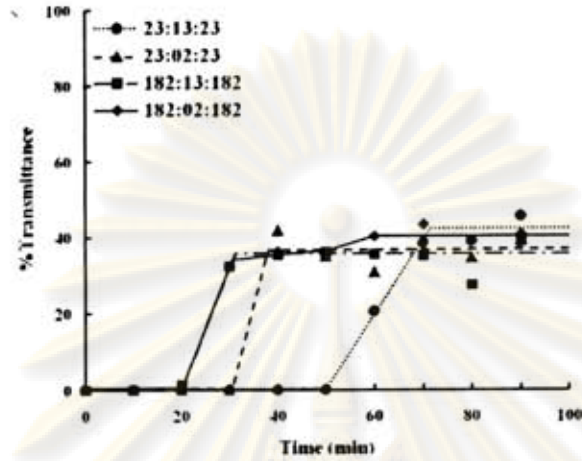
แล้วนำค่า %T ที่วัดที่ความยาวคลื่น 250.14 270.15 และ 300.13 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาวิเคราะห์เทียบกับเวลา

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 จะช่วยให้สารแขวนลอยมีความเสถียรมากที่สุด ดังจะเห็นได้จากการที่สารแขวนลอยเริ่มตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไป 50 นาที คือ มีการยอมให้แสงส่องผ่านมากขึ้น และสารแขวนลอยตกตะกอนสมบูรณ์หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 70 นาที คือ %T มีค่าสูงสุดและคงที่ ส่วนสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 จะเริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 นาที สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 และ 182:02:182 มีความเสถียรที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 และ 23:02:23 โดยจะเริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปเพียง 20 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที

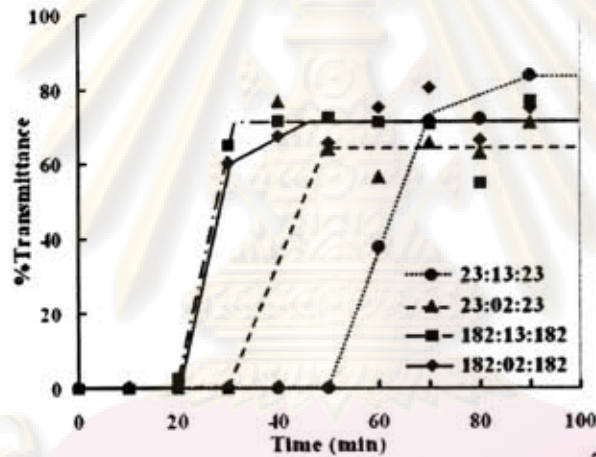
รูปที่ 4.27 แสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ จะเห็นว่าในกรณีนี้สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 จะมีความเสถียรมากที่สุดโดยจะเริ่มตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 50 นาที สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 จะมีความเสถียรต่ำกว่าเล็กน้อยโดยจะเริ่มตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 40 นาที ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 และ 182:02:182 มีค่าความเสถียรที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23 และ 23:02:23 โดยในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX:182 จะเริ่มตกตะกอนภายในเวลาประมาณ 20 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที

รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ พบว่าสารแขวนลอยตกตะกอนเร็วกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ โดยสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 จะเริ่มตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที และตกตะกอนสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ส่วนสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 จะตกตะกอนสมบูรณ์ภายใน

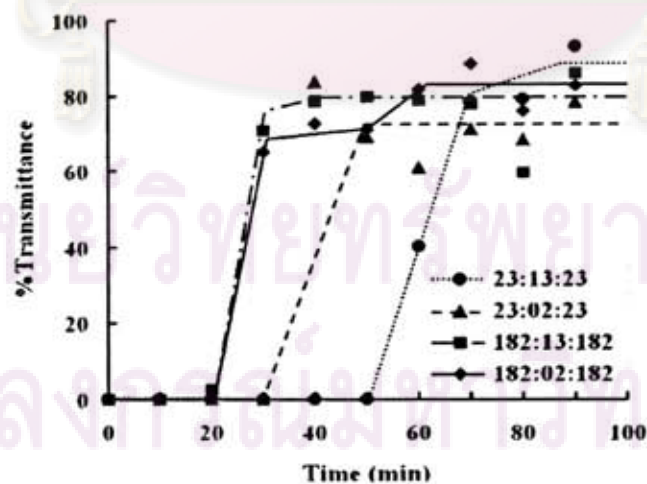
เวลา 20 นาที และสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX:182 จะตกตะกอนสมบูรณ์ภายในเวลา 10 นาที



(ก)

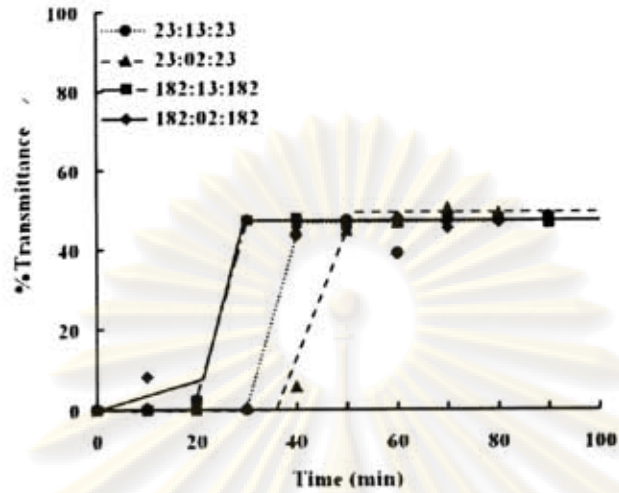


(ข)

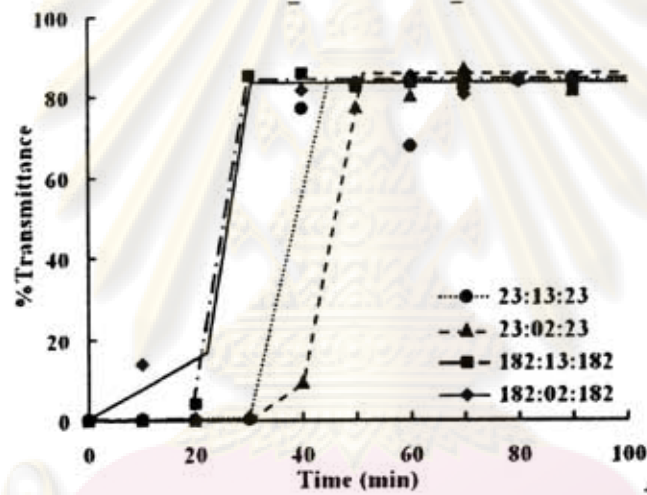


(ค)

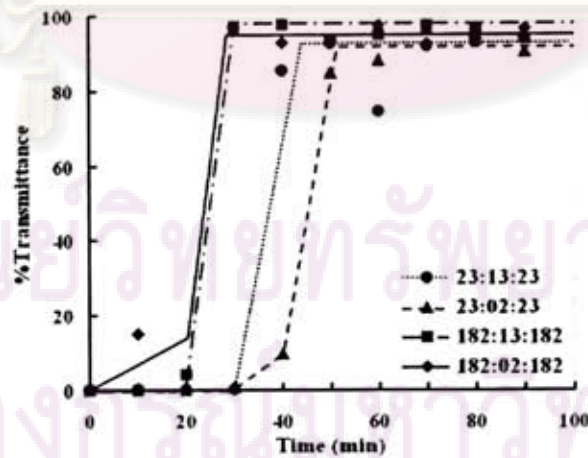
รูปที่ 4.26 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ที่ค่าความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร



(ก)

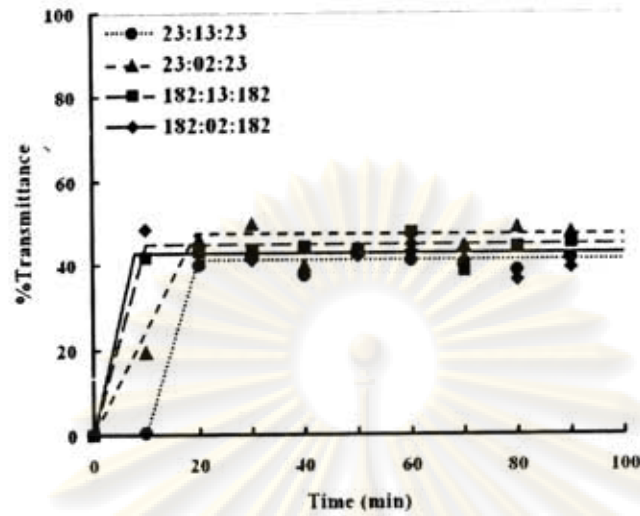


(ข)

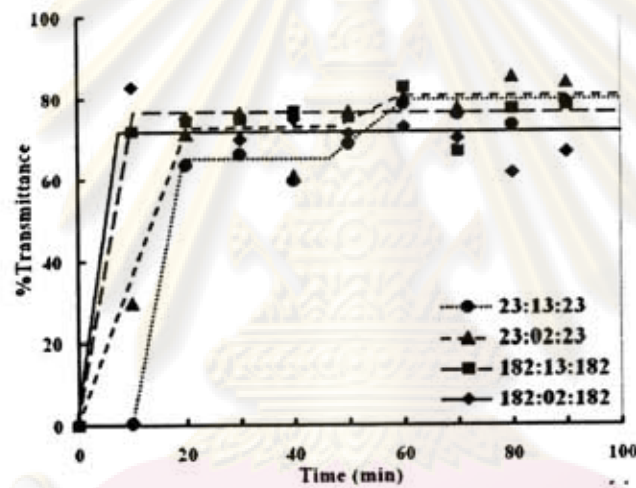


(ค)

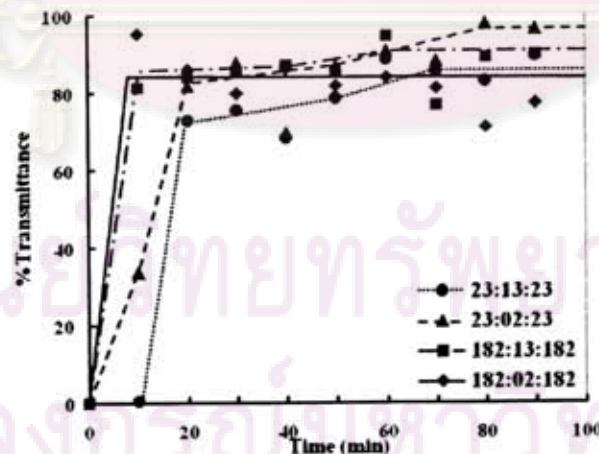
รูปที่ 4.27 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่ค่าความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร



(ก)



(ข)



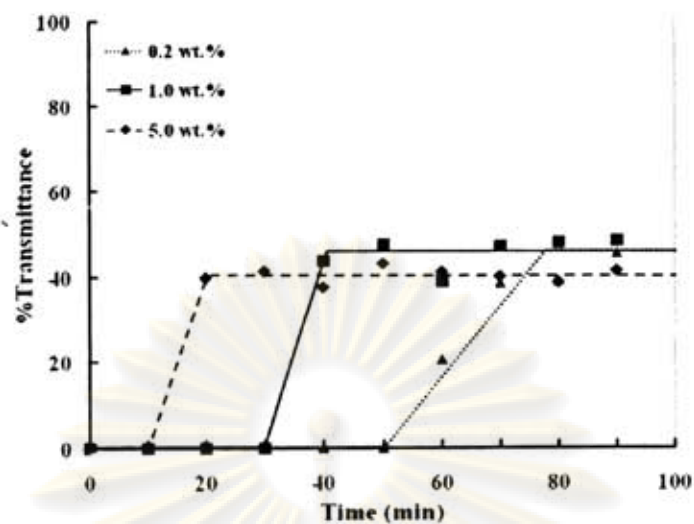
(ค)

รูปที่ 4.28 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ที่ค่าความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร

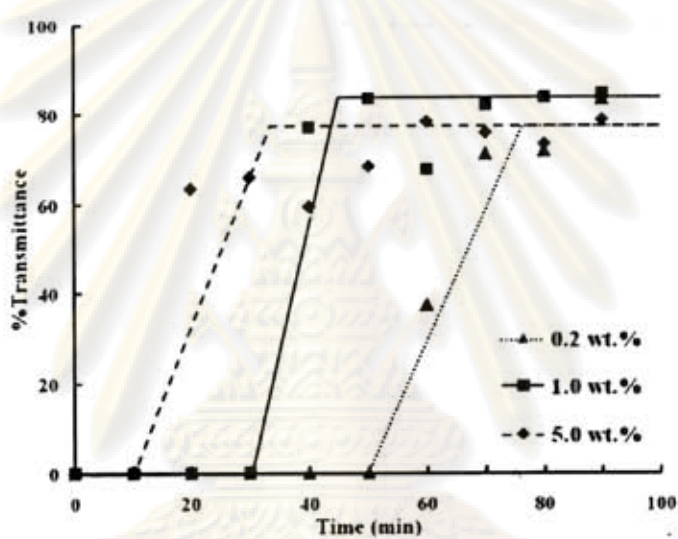
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะตกตะกอนช้ากว่าหรือมีความเสถียรมากกว่าสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) โดยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 จะให้สารแขวนลอยที่มีความเสถียรมากกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX:182 เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณความเข้มข้นที่เท่ากัน

เมื่อนำผลการศึกษาของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่างกันมาวิเคราะห์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า %T เทียบกับเวลาของสารแขวนลอยเป็นดังรูปที่ 4.29 ถึง รูปที่ 4.32 ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิด สำหรับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน โดยพบว่าสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ส่วนสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 และ 182:02:182 เมื่อใช้ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จะให้ประสิทธิภาพในการช่วยกระจายตัวของอนุภาคได้ดีใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณการใช้ที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าในสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในปริมาณร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะมีการตกตะกอนเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากเกินไป หรือ over deflocculation โดยสารช่วยกระจายตัวที่มีปริมาณมากเกินไปนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่จึงทำให้ตกตะกอนเร็ว

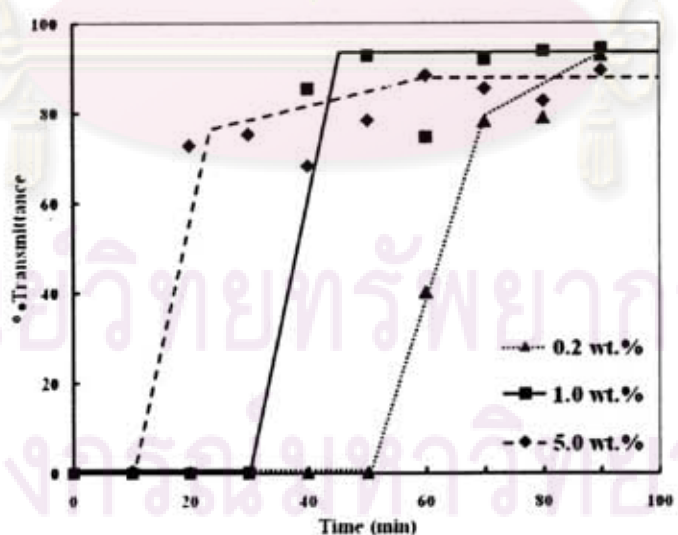
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

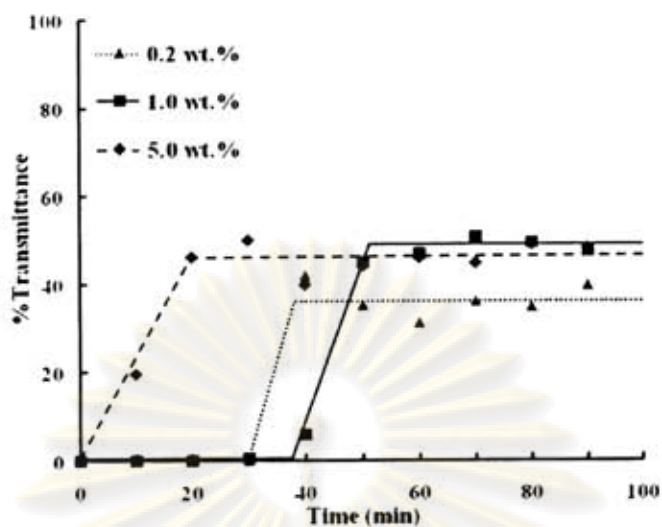


(ข)

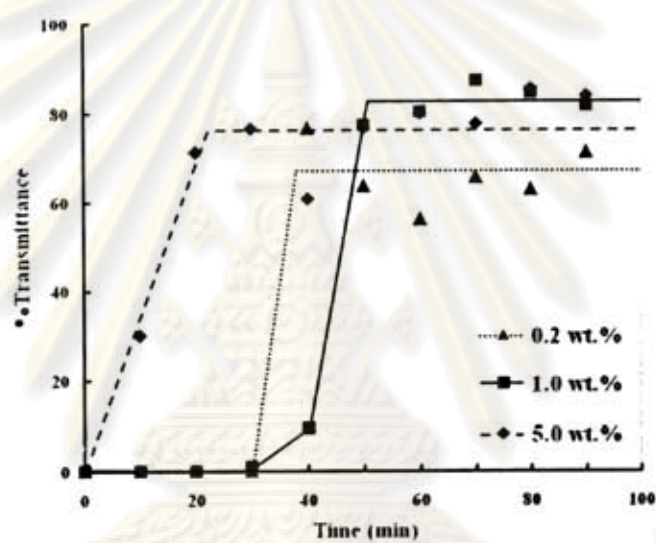


(ค)

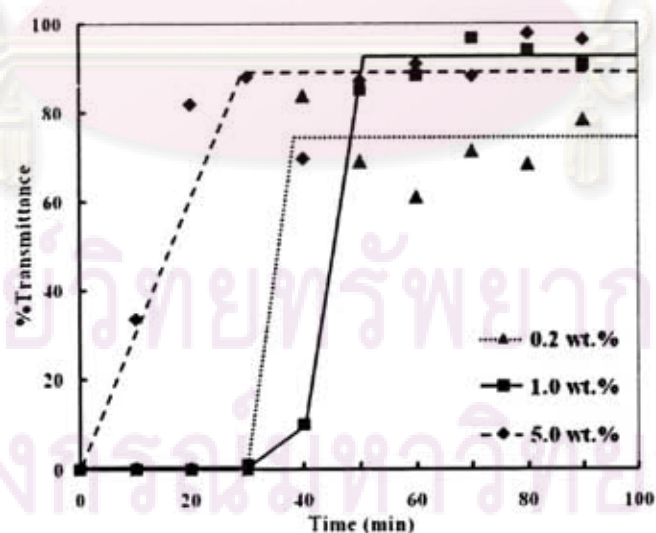
รูปที่ 4.29 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 ที่ความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร



(ก)



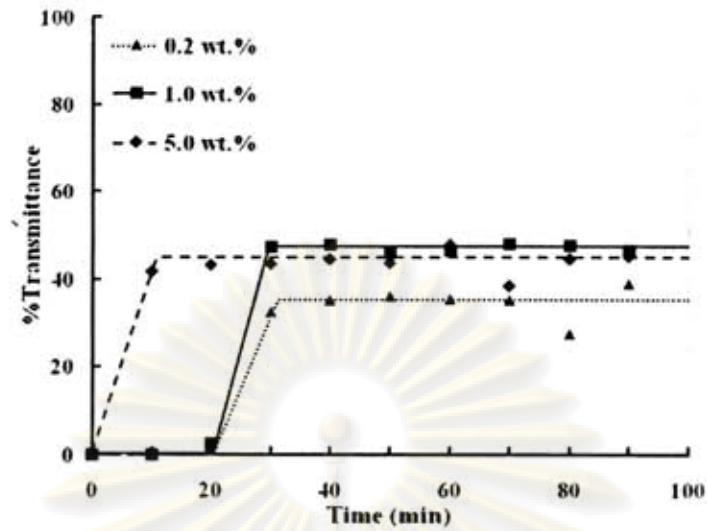
(ข)



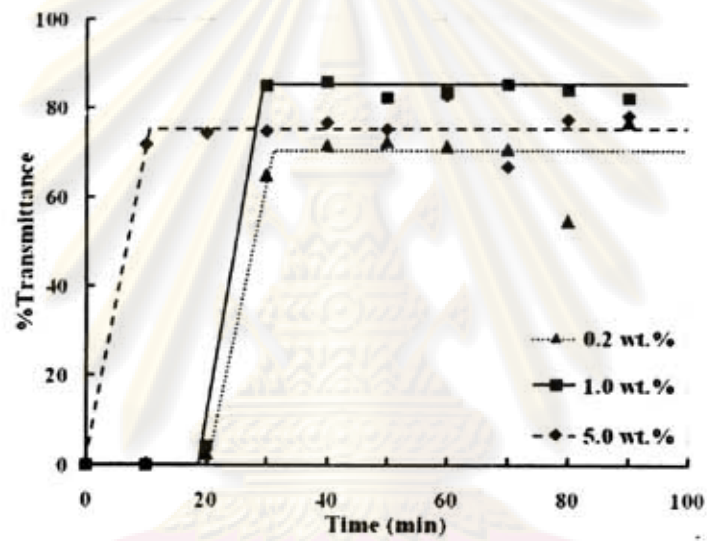
(ค)

รูปที่ 4.30 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 ที่ความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร

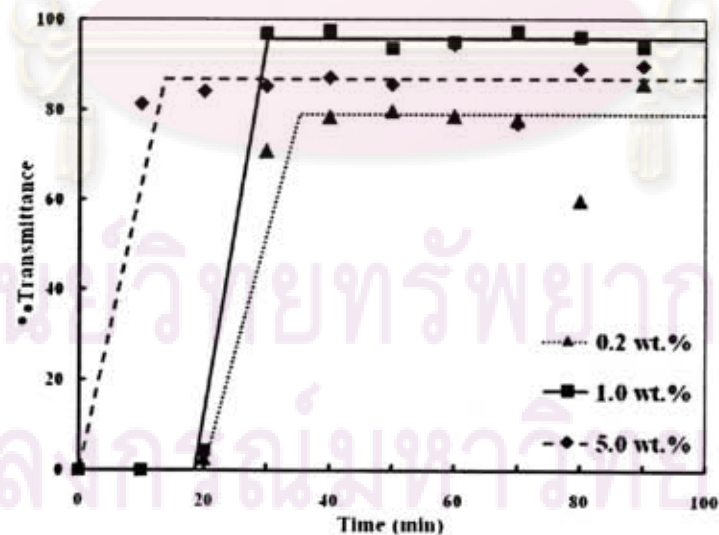




(ก)

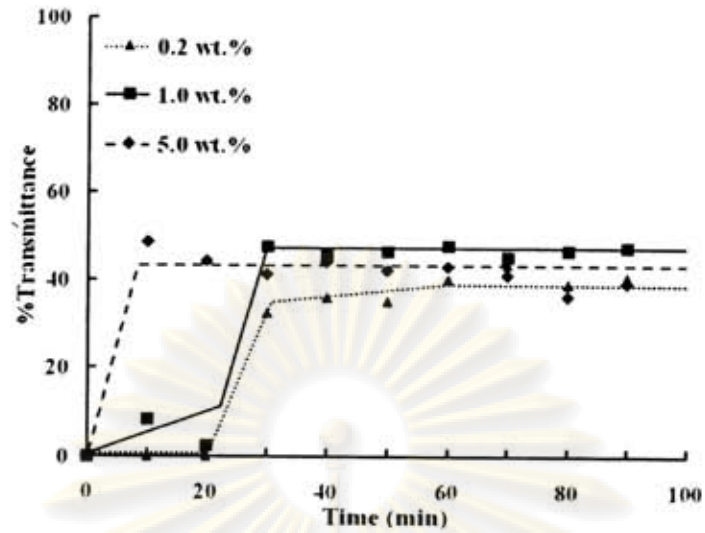


(ข)

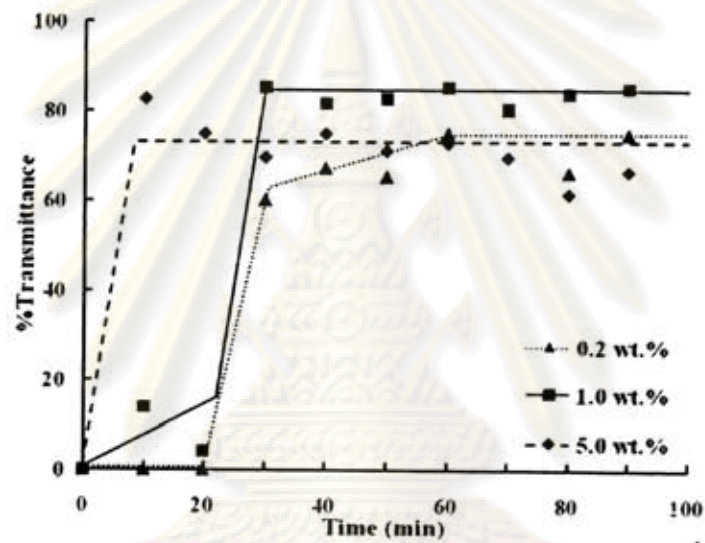


(ค)

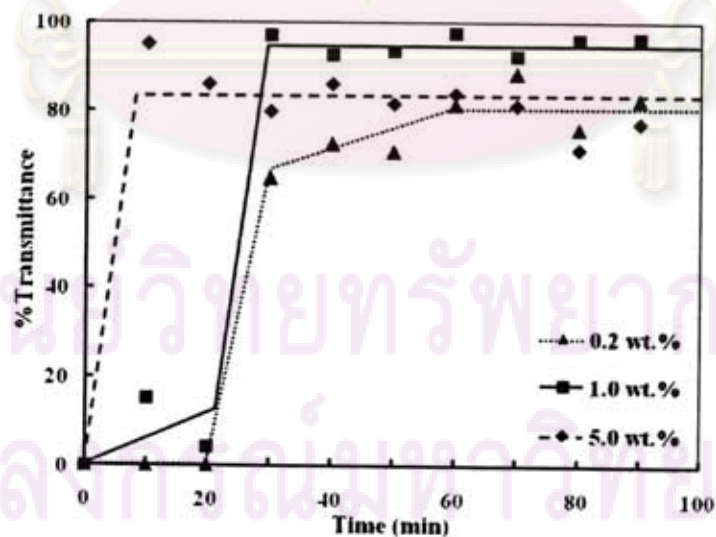
รูปที่ 4.31 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 ที่ความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

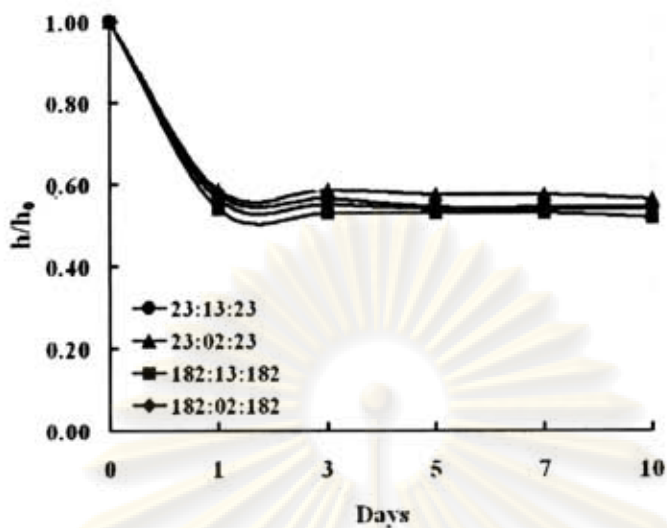
รูปที่ 4.32 สมบัติการส่องผ่านรังสี UV ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182 ที่ความยาวคลื่น (ก) 250.14 (ข) 270.15 และ (ค) 300.13 นาโนเมตร

### 4.2.3 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย

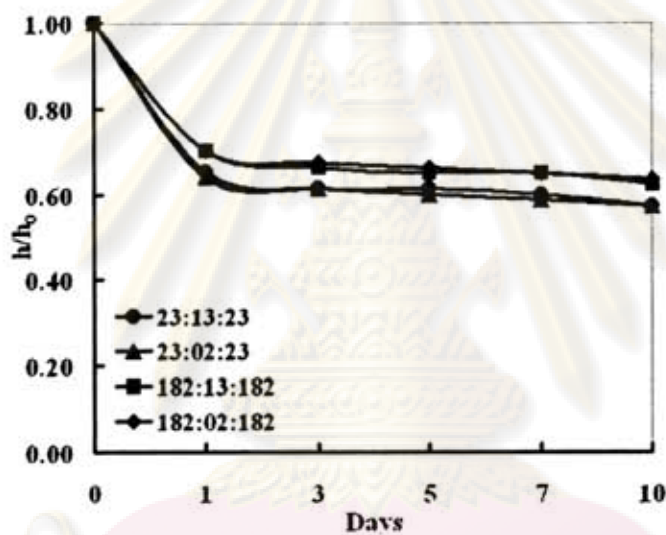
จากการนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอน โดยการวัดค่าความสูงของตะกอนที่ตกลงมาหลังจากเวลาผ่านไป ( $h$ ) เทียบกับความสูงของสารแขวนลอยตั้งต้น ( $h_0$ ) แล้วเปรียบเทียบค่า  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยค่า  $h/h_0$  จะแสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อสารแขวนลอยตกตะกอน หากค่า  $h/h_0$  ที่วัดได้มีค่าน้อยแสดงว่าอนุภาคในสารแขวนลอยมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบความสูงของตะกอนจึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าอนุภาคในสารแขวนลอยมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบจะส่งผลให้ความสูงของตะกอนมีค่ามากและ  $h/h_0$  มีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งค่า  $h/h_0$  นี้จะขึ้นกับรูปร่างของอนุภาคและกลุ่มอนุภาคในสารแขวนลอยด้วย

จากรูปที่ 4.33 พบว่าสารแขวนลอยทั้งหมดตกตะกอนโดยสมบูรณ์ภายใน 1 วัน โดยสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะมีค่า  $h/h_0$  ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) จะมีค่า  $h/h_0$  ต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่า เมื่อพิจารณาความแตกต่างด้านโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ พบว่าไม่ส่งผลชัดเจนต่อพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยเนื่องจากสารแขวนลอยทั้งหมดมีการตกตะกอนที่สมบูรณ์ภายใน 1 วัน จึงทำการทดลองซ้ำโดยนำสารแขวนลอยที่เข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วมาทำการ re-dispersed แล้ววัดค่าความสูงของตะกอนทุก ๆ 10 นาที โดยเริ่มจาก 0 ถึง 90 นาที พบว่าสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะมีอัตราการตกตะกอนที่ช้ากว่าสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวสูงที่ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในลักษณะเดียวกันสำหรับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ

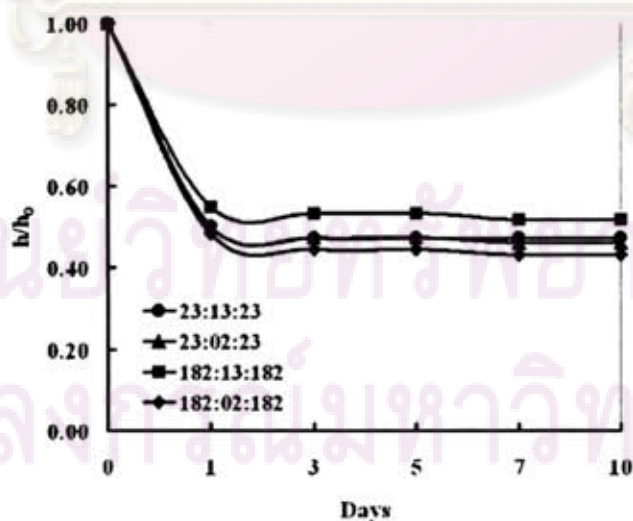
รูปที่ 4.34 ถึง รูปที่ 4.37 แสดงถึงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 ที่เวลาต่าง ๆ จะเห็นว่าสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก มีอัตราการตกตะกอนของอนุภาคที่เร็วมาก โดยเริ่มตกตะกอนในทันทีและเกิดการตกตะกอนของอนุภาคอย่างสมบูรณ์ให้ supernatantใส ไม่มีสี เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 20 นาที เท่านั้น ซึ่งมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่มากกว่าสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบค่า  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะมีค่า  $h/h_0$  ต่ำกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่มีระเบียบมากกว่าในขณะตกตะกอน



(ก)

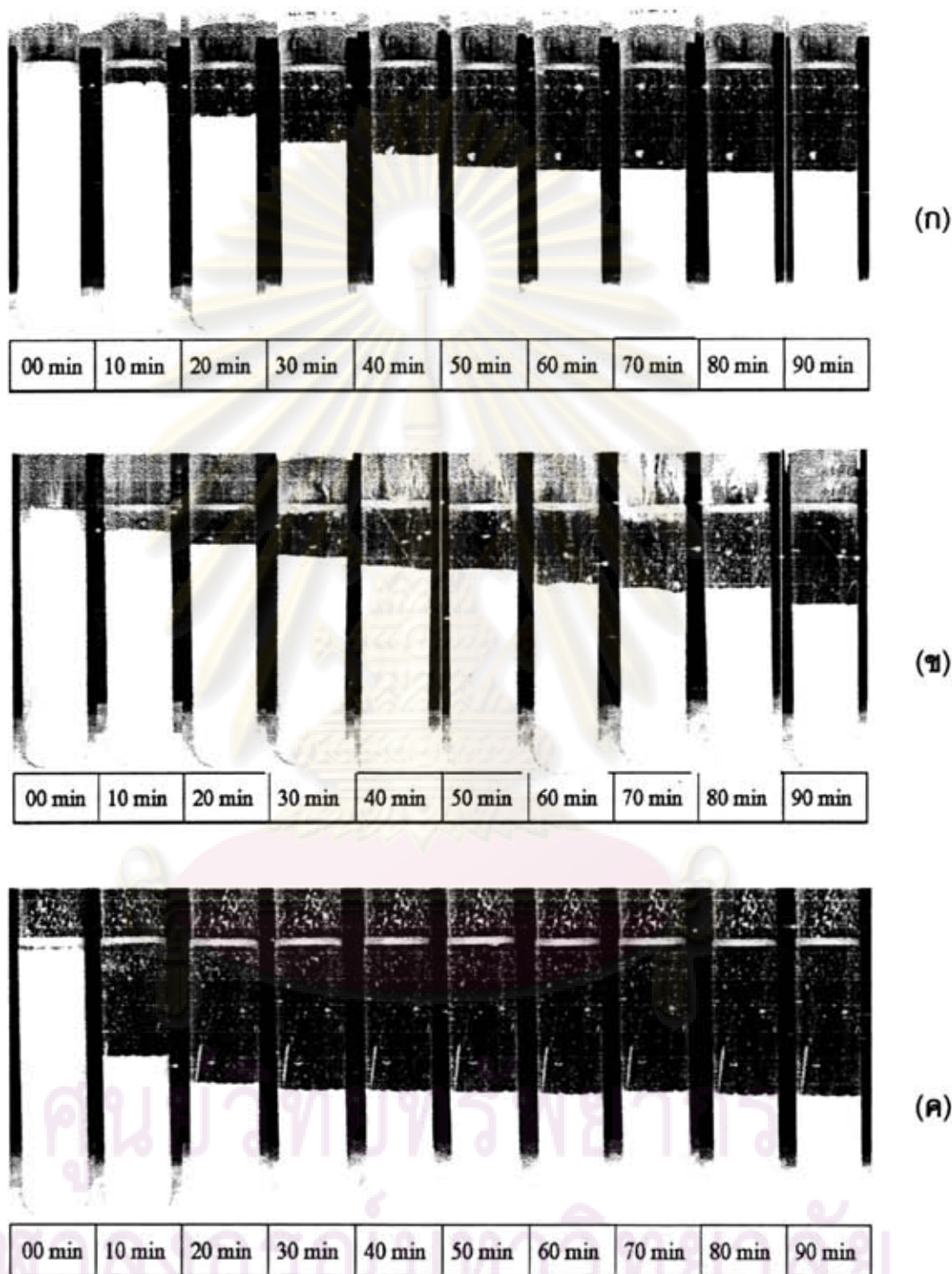


(ข)

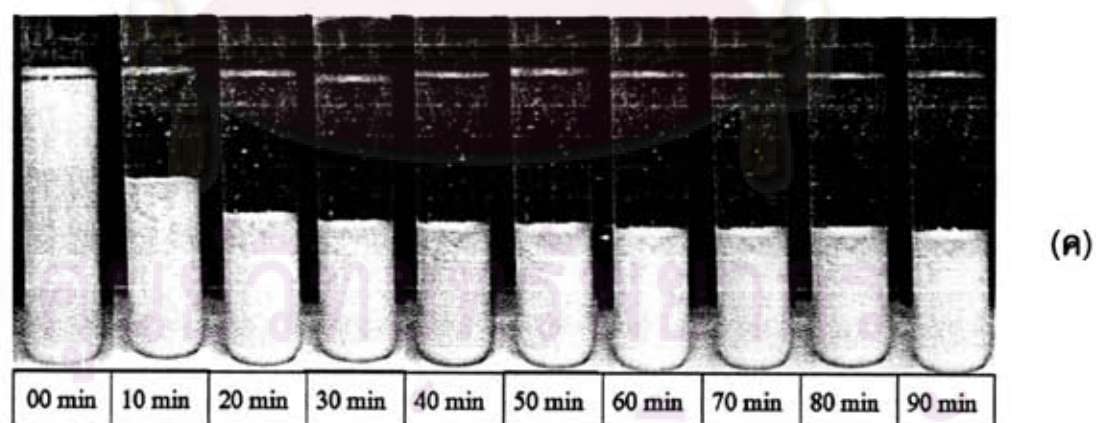
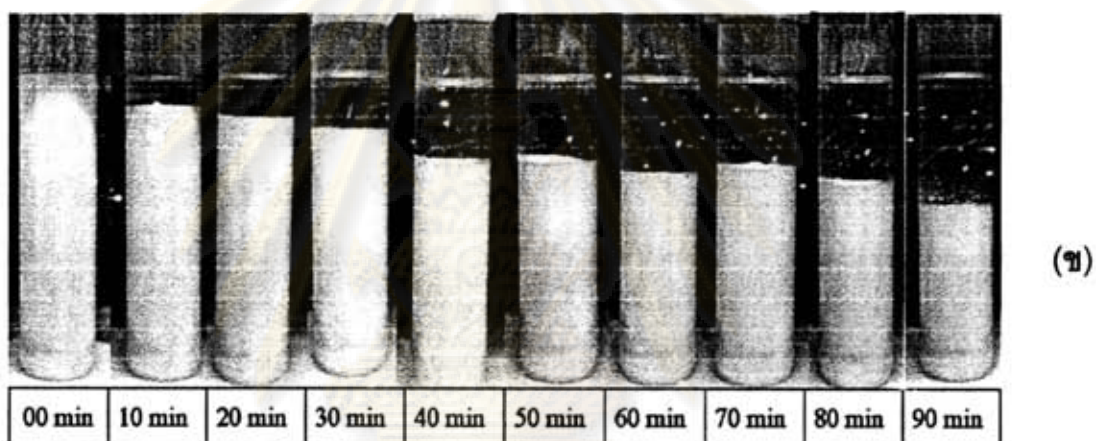
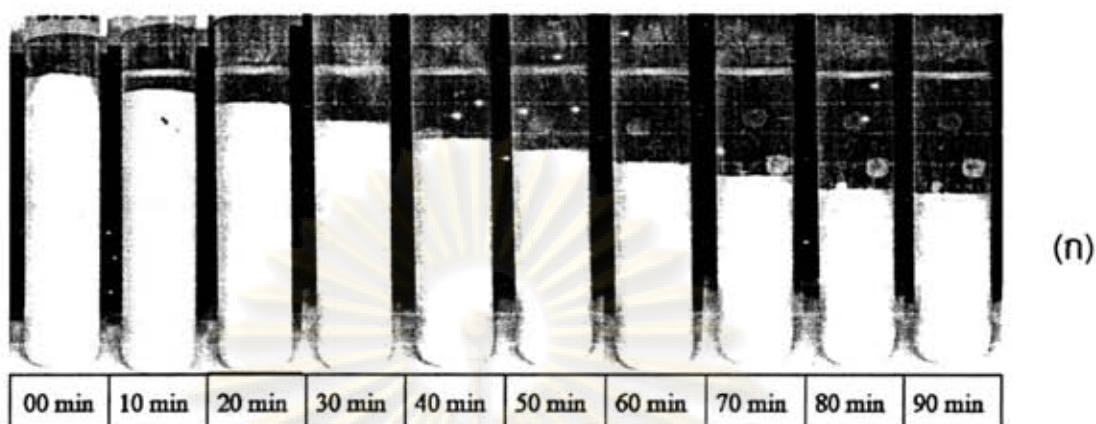


(ค)

รูปที่ 4.33 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt%

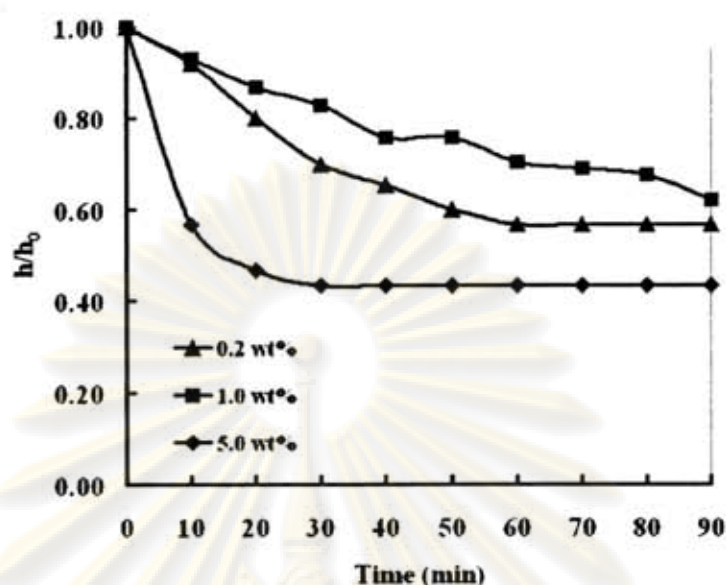


รูปที่ 4.34 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัว โครงสร้างแบบ 23:13:23 ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt%

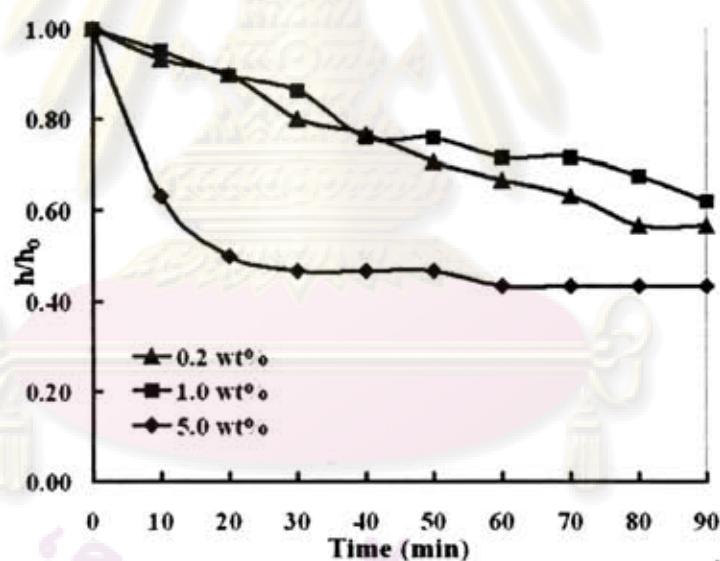


รูปที่ 4.35 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัว

โครงสร้างแบบ 23:02:23 ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt%



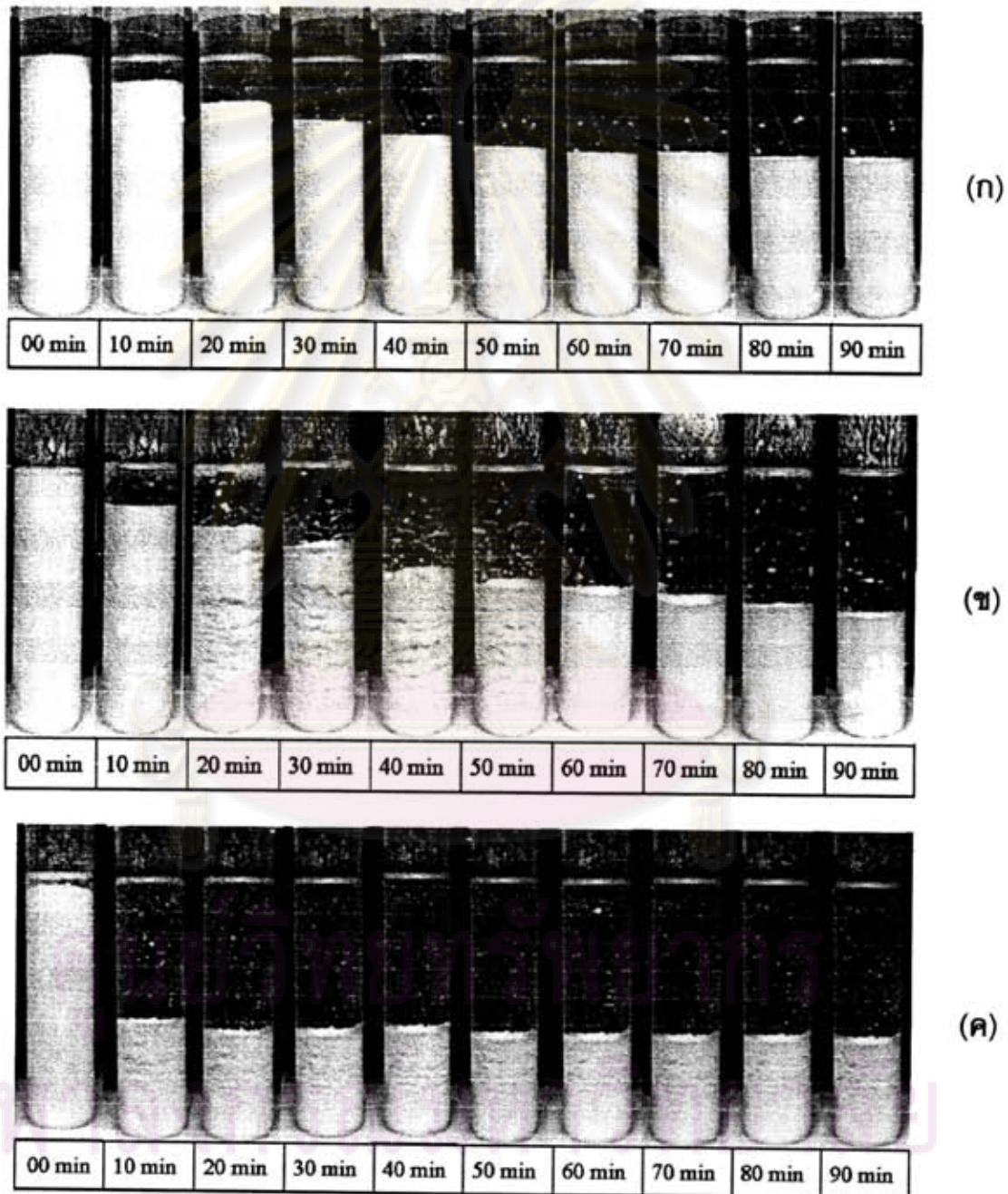
รูปที่ 4.36 อัตราส่วน  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23



รูปที่ 4.37 อัตราส่วน  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23

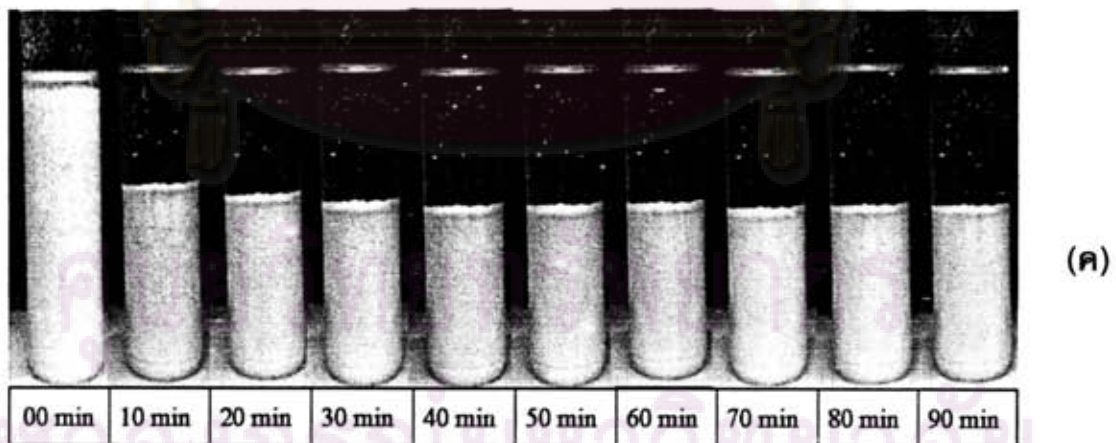
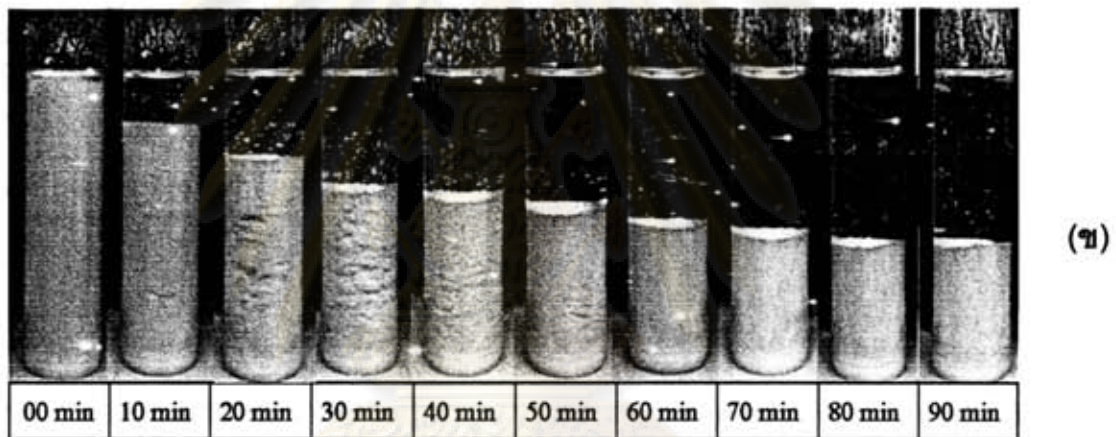
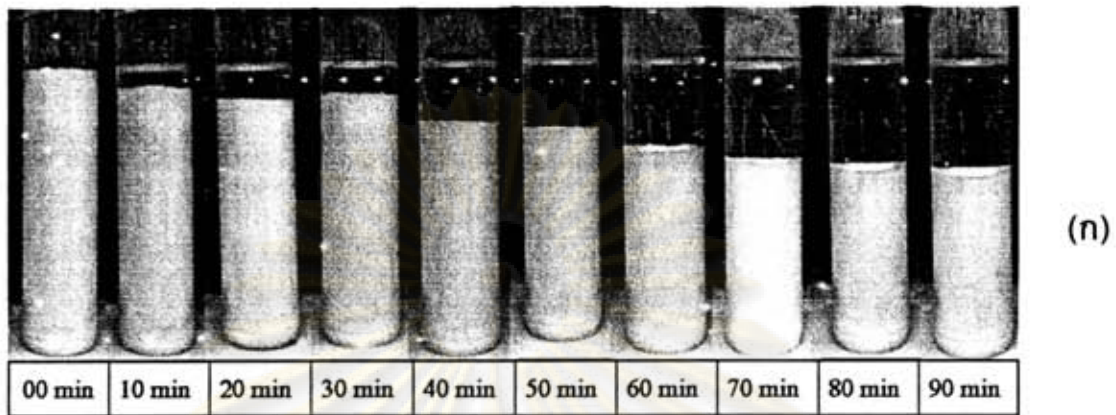
รูปที่ 4.38 ถึง รูปที่ 4.41 แสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวโครงสร้างแบบ 182:XX:182 ที่เวลาต่าง ๆ จะเห็นว่าสารแขวนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะมีการตกตะกอนของอนุภาคที่เร็วมาก โดยเริ่มตกตะกอนในทันทีและเกิดการตกตะกอนของอนุภาคแบบสมบูรณ์ให้ supernatantใสไม่มีสีเมื่อเวลาผ่านไปเพียง 10 นาที และมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่มากกว่าสารแขวนลอยที่ใช้

ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก และเร็วกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวโครงสร้างแบบ 23:XX:23 ที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่า  $h/h_0$  ที่เวลา 90 นาที ซึ่งสารแขวนลอยตกตะกอนโดยสมบูรณ์แล้ว พบว่าสารแขวนลอยทั้งหมดมีค่า  $h/h_0$  ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182

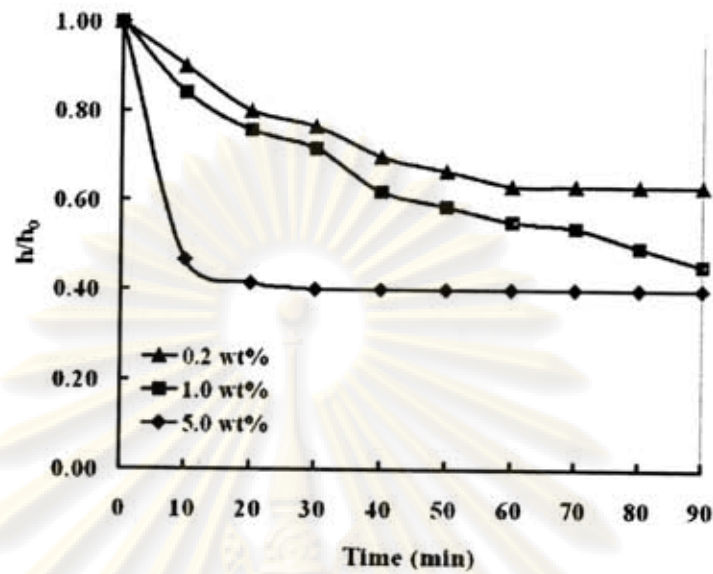


รูปที่ 4.38 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัว โครงสร้างแบบ 182:13:182 ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt%

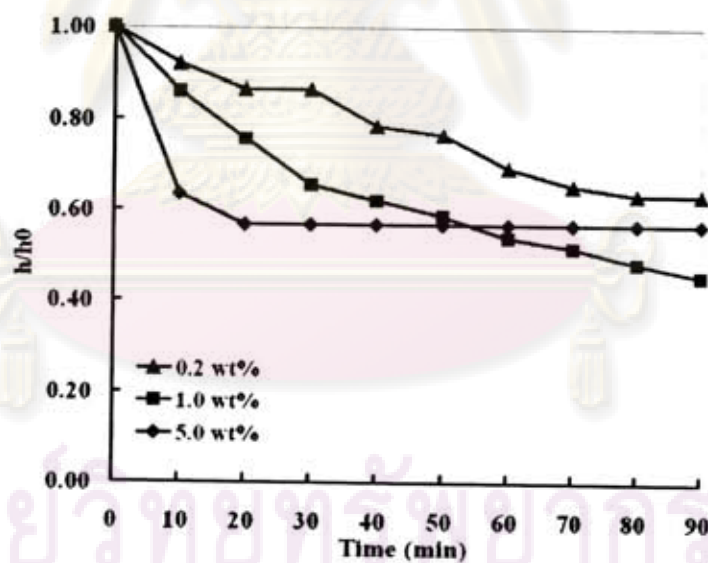




รูปที่ 4.39 พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัว  
โครงสร้างแบบ 182:02:182 ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt%



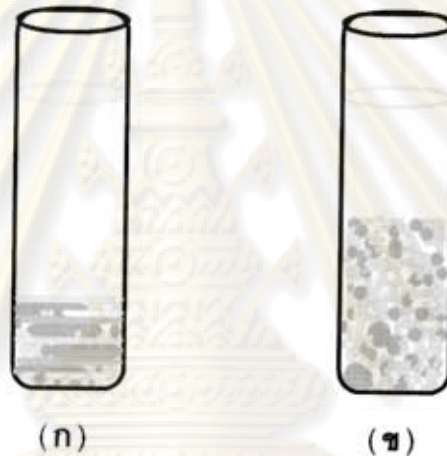
รูปที่ 4.40 อัตราส่วน  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182



รูปที่ 4.41 อัตราส่วน  $h/h_0$  ของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182

สำหรับค่า  $h/h_0$  ที่มีค่าที่แตกต่างกันของสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) และที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) นั้นสามารถอธิบายได้จากการจับกลุ่มรวมกันของอนุภาคเป็น agglomerate ที่มีลักษณะที่ต่างกัน โดยจากการสังเกตลักษณะของ agglomerate ในสารแขวนลอยด้วยตา

เปล่า พบว่าในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ลักษณะกลุ่มของ agglomerate จะจับตัวกันเป็นแผ่น ๆ จึงสันนิษฐานว่าเมื่ออนุภาคเกิดการตกตะกอนจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบซ้อนทับกันได้ดี มีช่องว่างระหว่างกลุ่มของอนุภาคด้วยตนเองน้อยส่งผลให้ค่าความสูงของตะกอนมีค่าต่ำ ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) ไม่สามารถสังเกตลักษณะของกลุ่ม agglomerate ได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า แต่จากค่า  $h/h_0$  ที่สูงกว่า แสดงให้เห็นว่าลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เป็นระเบียบ มีช่องว่างระหว่างกลุ่มของอนุภาคมากส่งผลให้ค่าความสูงของตะกอนมีค่ามากกว่า โดยแบบจำลองแสดงลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคและการจัดเรียงตัวในขณะตกตะกอน แสดงดังรูปที่ 4.42



**รูปที่ 4.42** ลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอย  
(ก) อนุภาคจับตัวกันเป็นแผ่นสามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเมื่อตกตะกอน  
และ (ข) อนุภาคที่จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเมื่อตกตะกอน

การศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่เวลา 0 ถึง 90 นาที ด้วยภาพถ่ายและการวัดค่าความสูงของตะกอนนี้ ได้ผลที่สอดคล้องและเป็นการยืนยันผลการศึกษาที่ได้จากการใช้เทคนิค UV Spectrophotometry ว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวในปริมาณร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จะให้สารแขวนลอยที่มีความเสถียรมากกว่าการใช้สารแขวนลอยในปริมาณสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) ซึ่งทำให้เกิด overdeflocculation และอนุภาคตกตะกอนเร็ว ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณสารช่วยกระจายตัวต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) มีการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยดีกว่าในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก

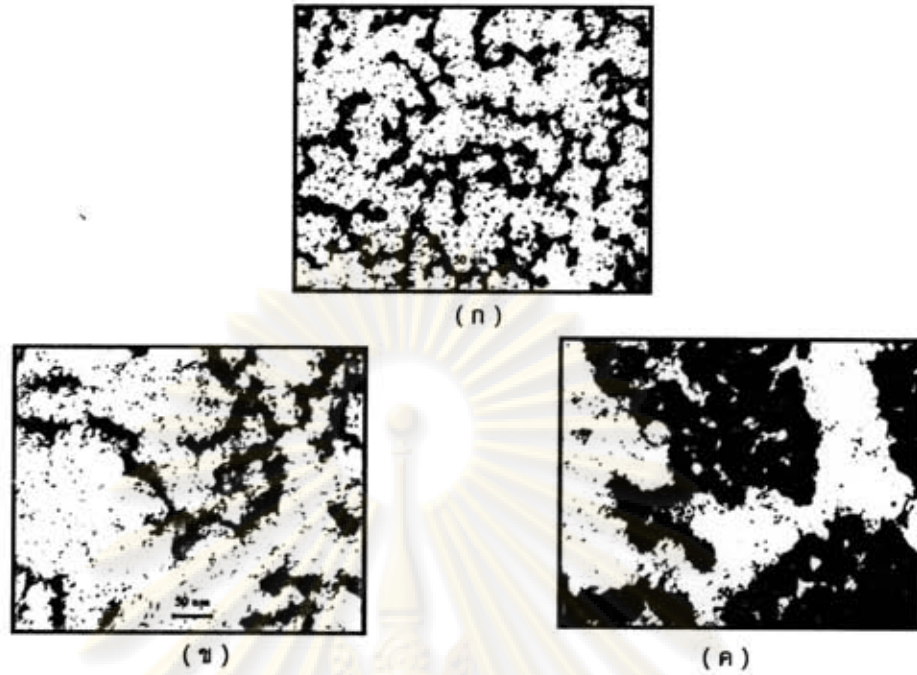
#### 4.2.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย

เพื่อศึกษาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้เทคนิค Optical Microscopy (OM) และ Scanning Electron Microscopy (SEM) และได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

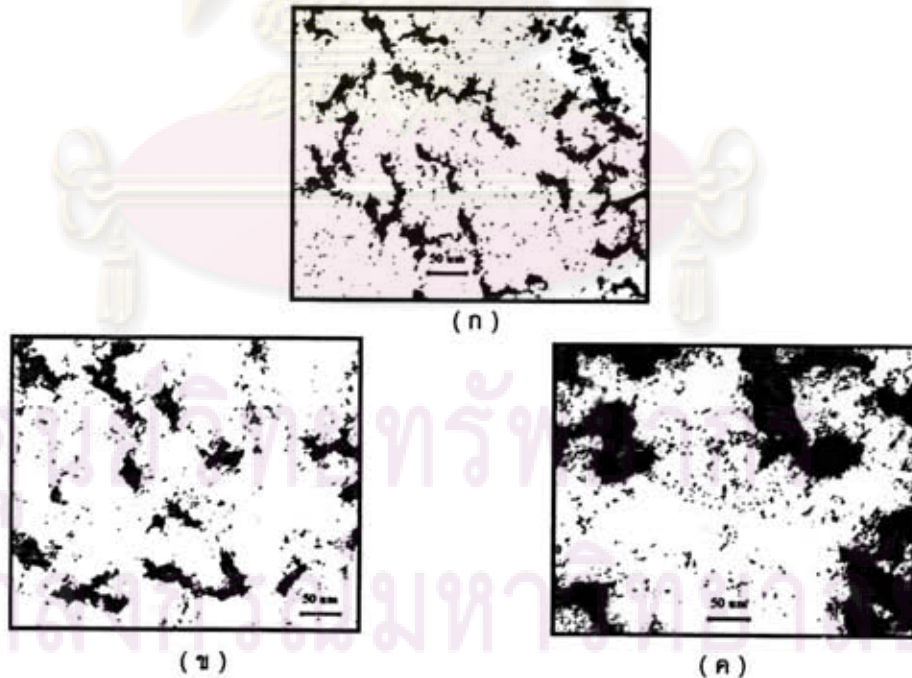
จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 ด้วยกล้อง Optical Microscope ที่กำลังขยาย 20 เท่าพบว่าการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคมีการกระจายตัวได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.43 (ก และ ข) และ รูปที่ 4.44 (ก และ ข) โดย mode ที่ใช้เป็นแบบ transmitted mode ดังนั้นกลุ่มของอนุภาคจะแสดงเป็นกลุ่มสีดำ ซึ่งจะเห็นว่าอนุภาคมีการกระจายตัวที่ดี มีบางส่วนที่จับกลุ่มกันเป็น agglomerate ขนาดเล็กและมีอนุภาคเล็ก ๆ กระจายแทรกอยู่ในตัวกลางโดยทั่วไป ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าอนุภาคมีการจับกลุ่มกันเป็น agglomerate ที่มีขนาดใหญ่ และกลุ่มอนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายอยู่ในตัวกลางก็มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ค และ รูปที่ 4.44 ค

สำหรับลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:XX:182 มีลักษณะเช่นเดียวกันกับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 คือ ในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยตัวร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าในสารแขวนลอยที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46

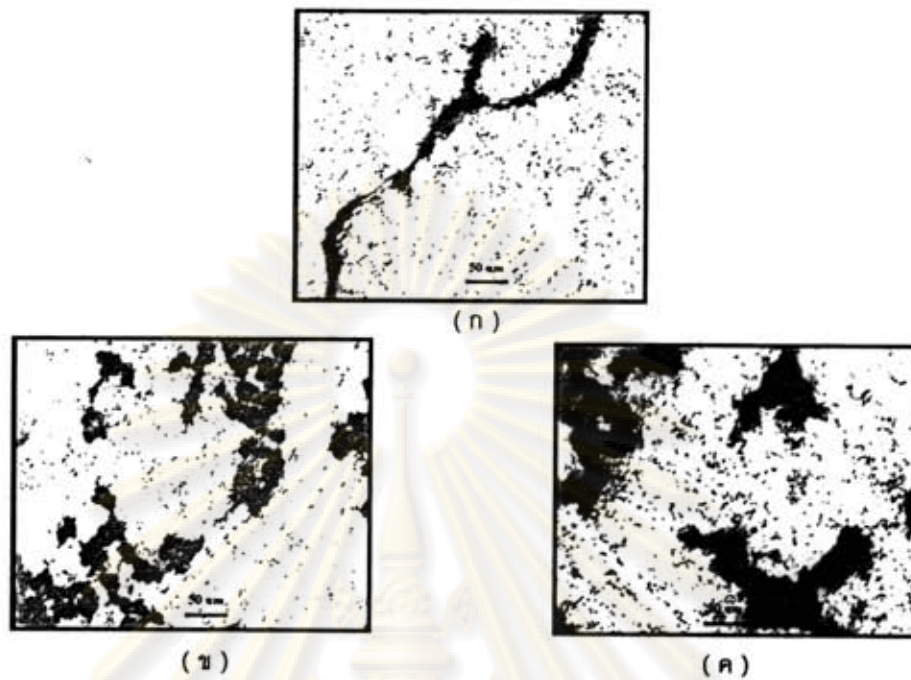
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



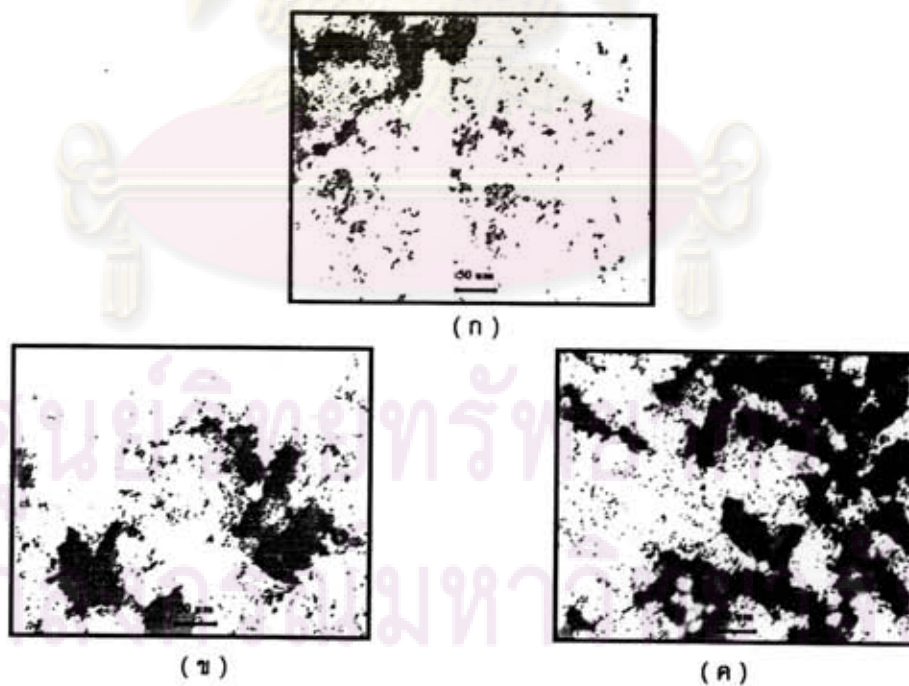
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt% (ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายจากกล้อง OM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 20 เท่า

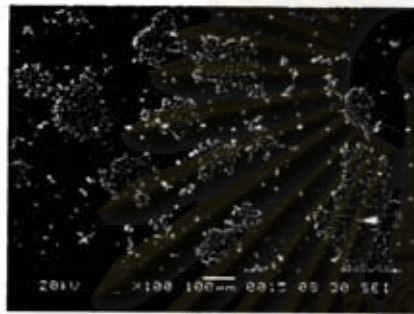
เมื่อนำสารแขวนลอยไปทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าสำหรับสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ การใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคมีการกระจายตัวได้ดีกว่าในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก โดยจากรูปจะเห็นว่ากลุ่มอนุภาคสีขาวมีการจับกลุ่มกันเป็น agglomerate ขนาดเล็ก ๆ และมีส่วนของอนุภาคอิสระกระจายแทรกอยู่ในตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.50 (ก และ ข) ส่วนในสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าอนุภาครวมกลุ่มกันเป็น agglomerate ขนาดใหญ่และไม่พบกลุ่มของอนุภาคอิสระกระจายอยู่ในตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ถึง รูปที่ 4.50 (ค)

จากลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค Optical Microscopy และ Scanning Electron Microscopy นี้ ได้ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ศึกษาด้วย UV Spectrophotometry และ ผลจากการคำนวณค่า  $h/h_0$  นั่นคือ สารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำจะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี ส่งผลให้อนุภาคในสารแขวนลอยตกตะกอนช้าและสารแขวนลอยมีความเสถียรสูง ส่วนสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเกิดการ overdeflocculation ทำให้เกิดการรวมกันของอนุภาคเป็นกลุ่มใหญ่ อนุภาคในสารแขวนลอยจึงตกตะกอนเร็วส่งผลให้สารแขวนลอยมีความเสถียรต่ำ

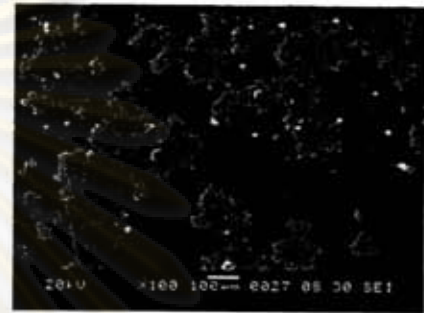
ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาความเสถียรของสารแขวนลอยและการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย Polyethyleneglycol (PEG) และ Polydimethylsiloxane (PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 4.51 โดยมี degree of polymerization ของ PEG:PDMS:PEG เป็น 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 ซึ่งส่วนที่เป็น PEG นั้นมีสมบัติ hydrophilic และมีความเป็นขั้วสูง ในขณะที่ส่วนที่เป็น PDMS มีสมบัติ hydrophobic ดังนั้นส่วนปลายทั้งสองข้างของสารช่วยกระจายตัว (ส่วน PEG) จึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับบนผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี และส่วนกลางของโครงสร้างสารช่วยกระจายตัว (ส่วน PDMS) มีแนวโน้มที่จะยื่นห่างจากพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมาในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน ซึ่งลักษณะการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนสามารถแสดงได้ดังแบบจำลองในรูปที่ 4.51



(ก)

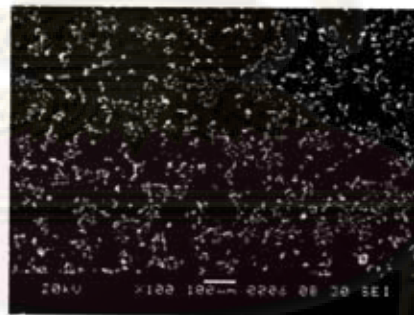


(ข)

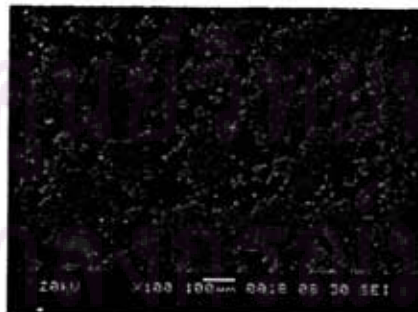


(ค)

รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)



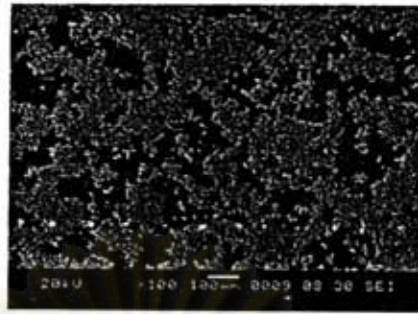
(ข)



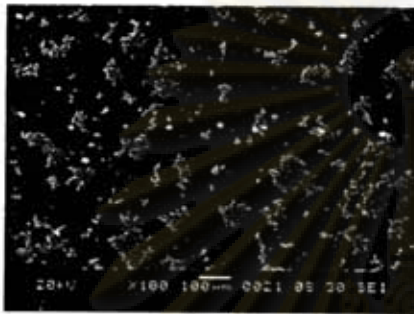
(ค)

รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

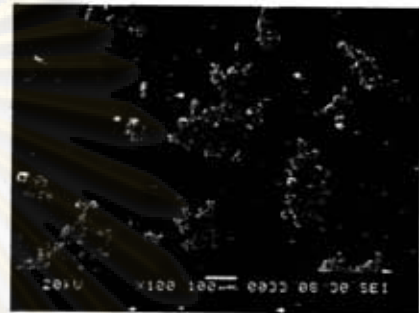




(ก)

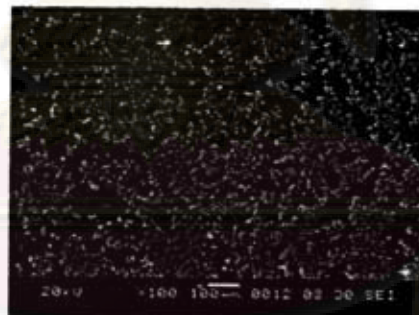


(ข)

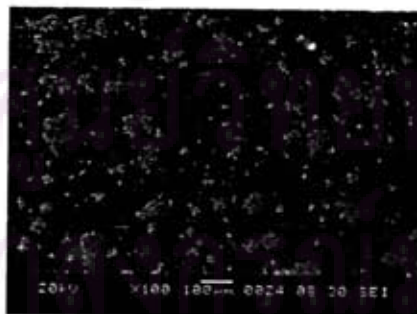


(ค)

รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)

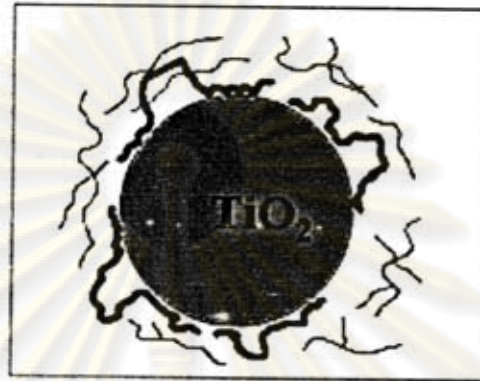
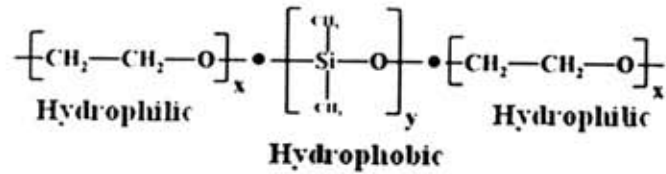


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย  
ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:02:182 ที่ความเข้มข้น (ก) 0.2 wt%  
(ข) 1.0 wt% และ (ค) 5.0 wt% ที่กำลังขยาย 100 เท่า

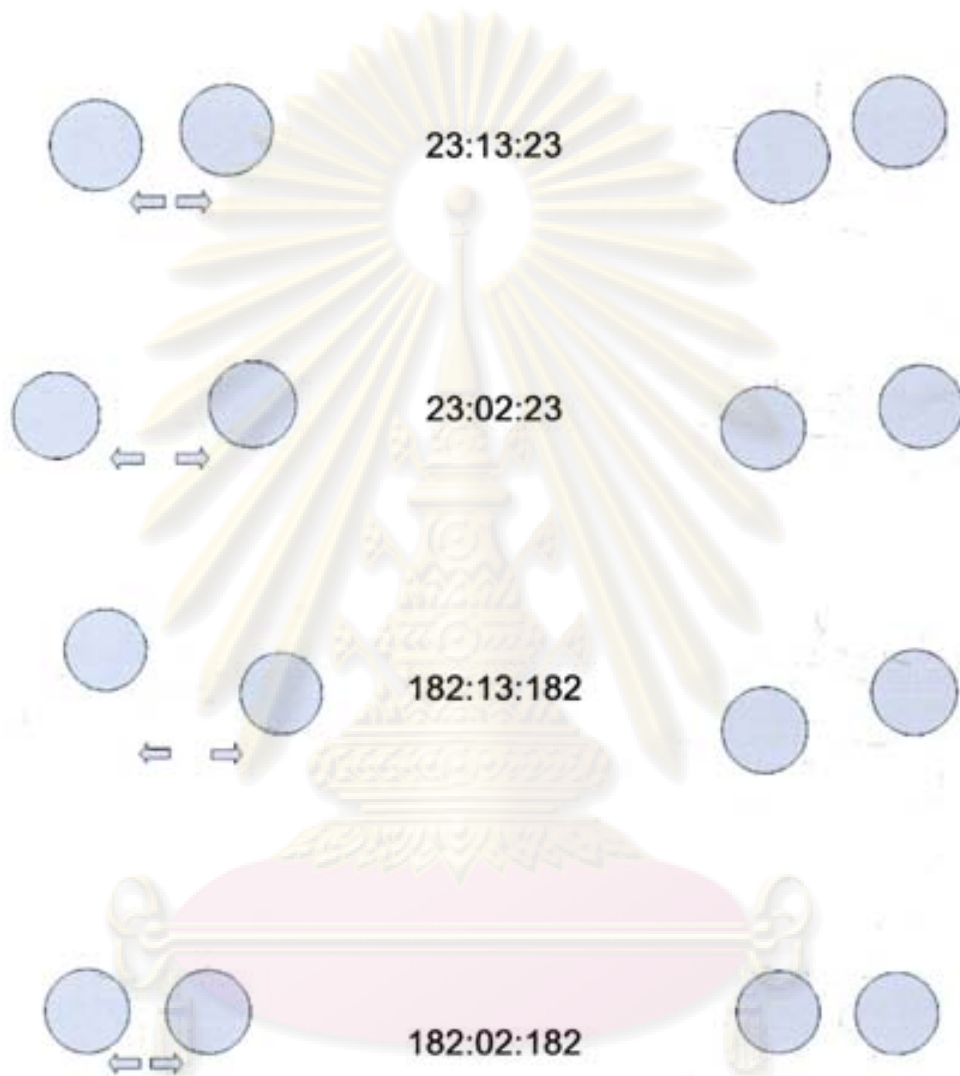


รูปที่ 4.51 แสดงโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer และการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน

เมื่อพิจารณาจาก degree of polymerization ของสารช่วยกระจายตัวจะสามารถแสดงลักษณะการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวทั้ง 4 แบบ ได้ดังแบบจำลองในรูปที่ 4.52 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.52 ก จะเห็นว่าสารช่วยกระจายตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคด้วยปลายของ PEG และยื่น loop ของ PDMS ออกมาในตัวกลาง ช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคกระจายตัวออกจากกันและเสถียรอยู่ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.52 ข ปริมาณสายโซ่พอลิเมอร์ของสารช่วยกระจายตัวที่มากขึ้นทำให้เกิด polymer bridging ดึงอนุภาคมารวมกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ดังผลการทดลองที่แสดงในรูป OM และ SEM ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะมีความเสถียรสูงกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ในการทดลองยังพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX182 จะตกตะกอนเร็วกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวแบบ 182:XX182 มีส่วนปลายที่เป็น PEG ที่ยาวกว่า เมื่อดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคซึ่งมีขนาดเล็ก

แล้วอาจมีส่วนที่เคลื่อนออกมาในตัวกลางหรือไปดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียง จึงมีแนวโน้มที่จะดึงอนุภาคมารวมกันเป็นกลุ่มโดยการเกิด polymer bridging



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.52 แบบจำลองลักษณะการดูดซับของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$

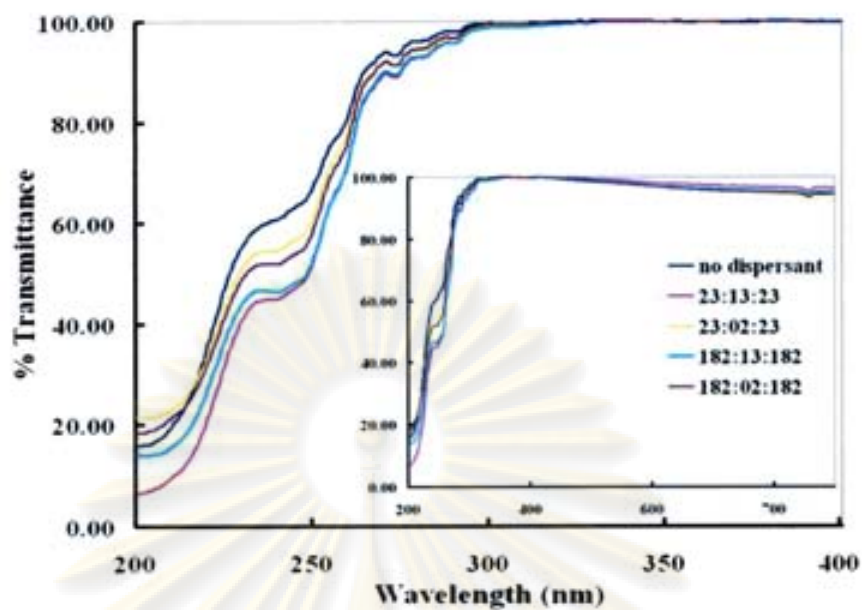
(ก) ความเข้มข้นต่ำ (0.2 และ 1.0 wt%) และ (ข) ความเข้มข้น 5.0 wt%

#### 4.3 สมบัติของสารส่วนลอย

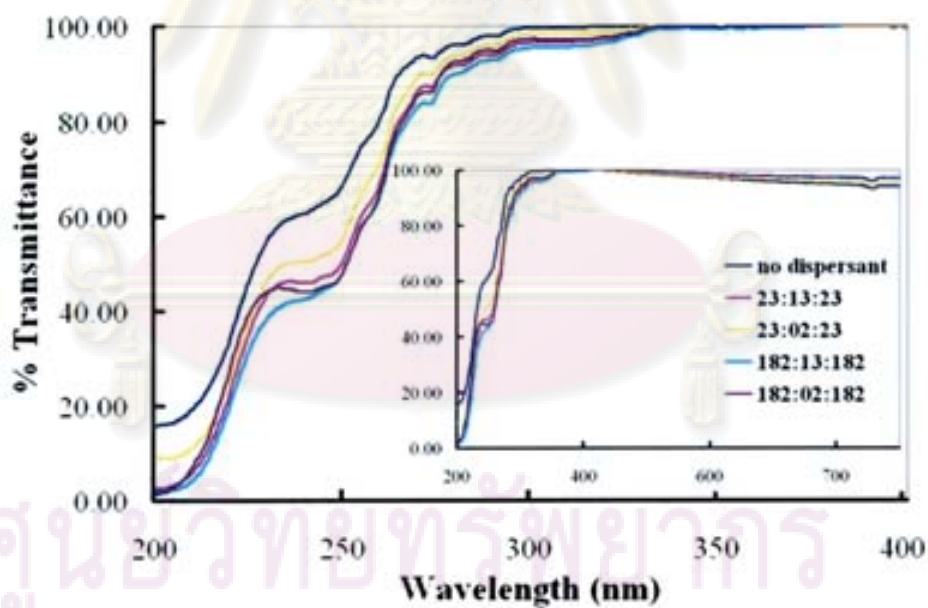
จากการศึกษาสมบัติของสารส่วนลอยที่ได้จากการแยกอนุภาคของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 เปรียบเทียบกับสารส่วนลอยที่ได้จากการแยกอนุภาคของสารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว โดยการวัดค่า % Transmittance (%T) ของสารส่วนลอยพบว่าสารส่วนลอยที่ได้จากการ centrifuge มีลักษณะใสและไม่มีสี ซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงในช่วง Visible light แสงสามารถส่องผ่านสารส่วนลอยได้เกือบทั้งหมดโดยดูได้จากค่า % T มีค่าที่ใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต สารส่วนลอยที่นำมาวัดสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสารส่วนลอยที่มีลักษณะใสและไม่มีสีนั้นมีอนุภาคของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนกระจายตัวอยู่ และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนนั้นเป็นตัวทำหน้าที่ป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต

เมื่อพิจารณาสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารส่วนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 400 นาโนเมตร) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด และเมื่อเปรียบเทียบกับสารส่วนลอยที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวพบว่าสารส่วนลอยที่มีสารช่วยกระจายตัวสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้มากกว่า ซึ่งดูได้จากการที่ % T มีค่าต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.53 ถึงรูปที่ 4.55

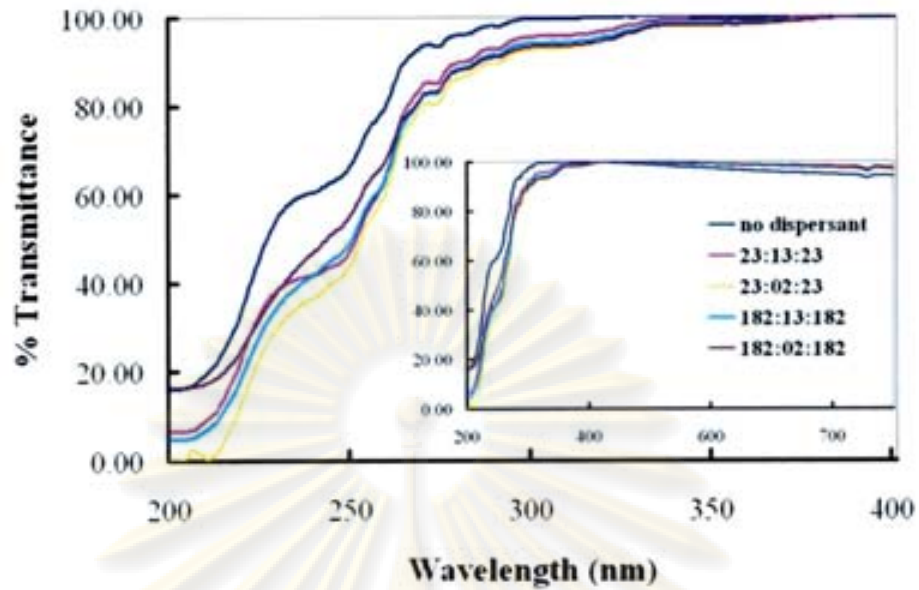
เมื่อพิจารณาสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของสารส่วนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 และ 23:02:23 ที่ความเข้มข้นต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.56 และ รูปที่ 4.57 พบว่ามีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่าส่วนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว ซึ่งสังเกตได้จากค่า % T ที่ต่ำกว่า และสารส่วนลอยที่ใช้ปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก มีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในสารส่วนลอยที่ปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่ามีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีที่สุด โดยผลการศึกษาดังกล่าวสามารถเห็นได้ชัดเจนในสารส่วนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23



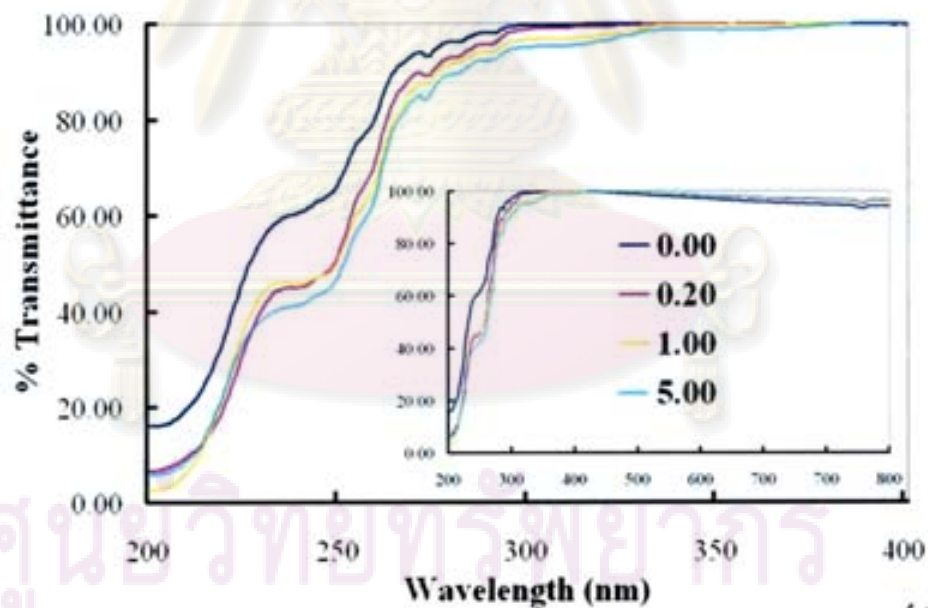
รูปที่ 4.53 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอย ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก



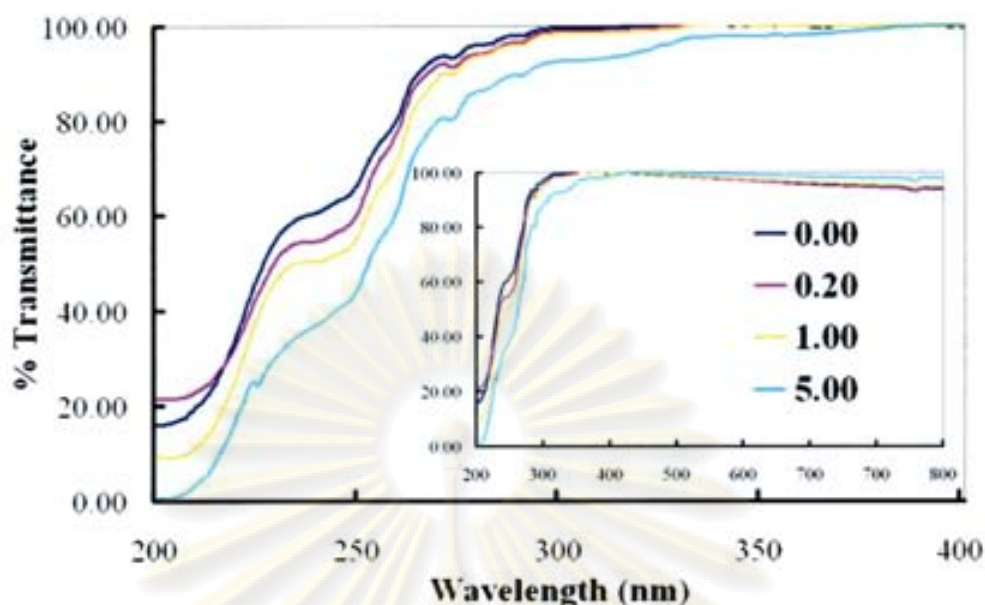
รูปที่ 4.54 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอย ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.55 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารส่วนลอยที่ได้จากสารแขวนลอย ที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.56 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:13:23

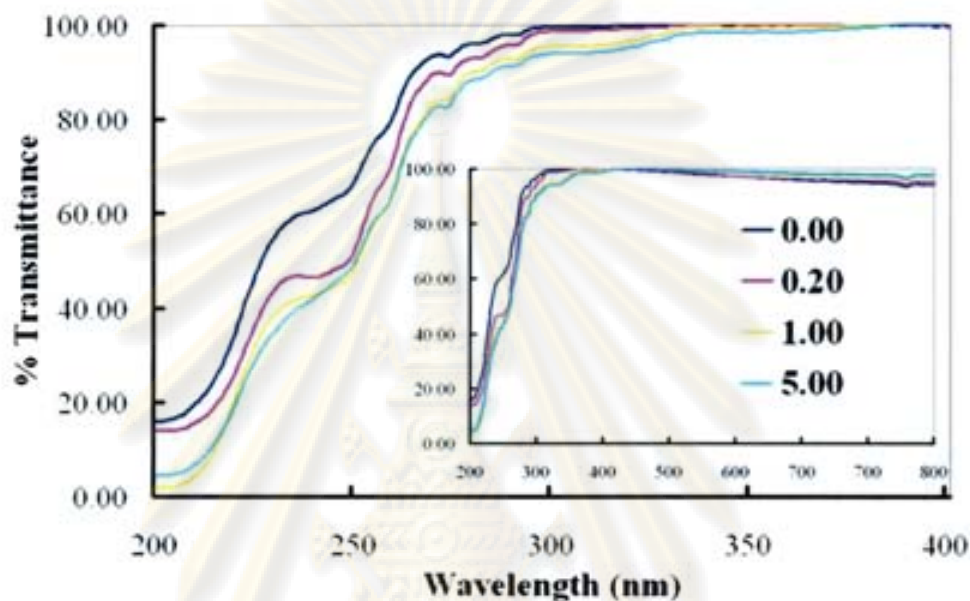


รูปที่ 4.57 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 23:02:23

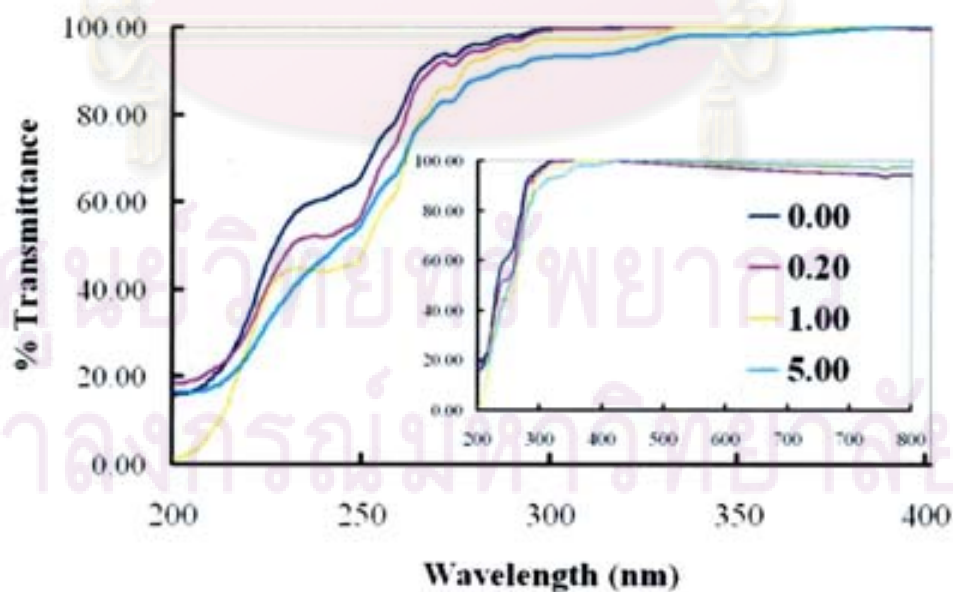
สำหรับสารส่วนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:13:182 และ 182:02:182 พบว่ามีสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่าสารส่วนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว และในสารส่วนลอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก สามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ใกล้เคียงกันทุกตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.58 และ รูปที่ 4.59

สมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารส่วนลอยสามารถแสดงถึงปริมาณของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารส่วนลอย กล่าวคือ หากสารส่วนลอยสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้มาก แสดงว่าในสารส่วนลอยนั้นมีปริมาณของอนุภาคนาโนในกระจายตัวอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer ที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 มีส่วนช่วยให้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่วนหนึ่งในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนที่ถูกแยกจากกันด้วยแรง ultrasonic ในกระบวนการเตรียมสารแขวนลอย สามารถอยู่แยกกันเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ กระจับนาโนโดยไม่รวมกลุ่มกันเป็น agglomerate เนื่องจากสารช่วยกระจายตัวที่ดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาค ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค อนุภาคจึงแยกห่างออกจากกัน และกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอย เมื่อนำสารแขวนลอยไปทำการ centrifuge เพื่อแยกอนุภาค และกลุ่มอนุภาคนาโนใหญ่ให้ตกตะกอน จึงพบว่ามีอนุภาคนาโนในระดับนาโนเหลืออยู่ในสารส่วน

ลอยในปริมาณที่มากกว่าสารส่วนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว ซึ่งในกรณีหลังนี้อนุภาคที่ถูกแยกออกจากกันด้วยแรง ultrasonic จะกลับมารวมกลุ่มกันเป็น agglomerate ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าระดับนาโนเมตรและตกตะกอนเมื่อทำการ centrifuge แยกขนาดอนุภาค ทำให้ปริมาณของอนุภาคในระดับนาโนที่เหลืออยู่ในสารส่วนลอยมีน้อยกว่า ซึ่งดูได้จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีค่าน้อยกว่า หรือมี % T ที่ต่ำกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.58 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:13:182



รูปที่ 4.59 สมบัติการส่องผ่านของรังสี UV ของสารแขวนลอยหลังจากทำการ centrifuge ที่ใช้สารช่วยกระจายตัวแบบ 182:02:182



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน ที่เตรียมด้วยสารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer ที่มีโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 4 แบบ คือ 23:13:23 23:02:23 182:13:182 และ 182:02:182 พบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันที่ความเข้มข้นเท่ากันไม่ส่งผลชัดเจนต่อพฤติกรรมในการไหลตัวของสารแขวนลอย แต่ในการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติของสารแขวนลอย คือ เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) สารแขวนลอยจะใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลนานกว่าการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก)

5.1.2 จากการศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่ำ ๆ (ร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก) จะมีความเสถียรมากกว่าสารแขวนลอยที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) และสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:XX:23 จะให้สารแขวนลอยที่มีความเสถียรมากกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX:182 ที่ความเข้มข้นเท่ากัน

5.1.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดในการเตรียมสารแขวนลอยผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำมันซิลิโคน คือ ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก สำหรับสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:13:23 และ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก สำหรับสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 23:02:23 ส่วนสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ 182:XX:182 ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก

5.1.4 สารแขวนลอยเกิด over deflocculation เนื่องจาก polymer bridging เมื่อใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก)

5.1.5 การใช้สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer มีส่วนช่วยให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรกระจายตัวได้อย่างเสถียรในน้ำมันซิลิโคนได้ดีกว่าการไม่เติมสารช่วยกระจายตัว ดังแสดงจากผลการศึกษาสมบัติการป้องกันรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ตของสารส่วนลอย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัว Poly (ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer ในการเตรียมสารแขวนลอยของโลหะออกไซด์ในน้ำมันซิลิโคน โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะออกไซด์และน้ำมันซิลิโคน

5.2.2 ศึกษากระบวนการเตรียมสารแขวนลอยที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกกลุ่มอนุภาคเพื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] P. Katangur, P.K. Patra and S.B. Wamer. Nanostructured ultraviolet resistant polymer coatings. Polymer Degradation and Stability, 91 (2006): 2437-2442.
- [2] T. Maier and H.C. Korting. Sunscreens - Which and What for?. Skin Pharmacol Physiol, 18 (2005): 253-262.
- [3] L. Stryker. Titanium Dioxide : Toxic or Safe [online]. Available from: [www.theorganicmakeupcompany.com/CA/titnaniumdioxide.asp](http://www.theorganicmakeupcompany.com/CA/titnaniumdioxide.asp).(2007).
- [4] J. Smyth's Mineral. Mineral Structure and Property Data TiO<sub>2</sub> Group [online]. Available from: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>.(2008).
- [5] อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์). ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [6] S. Tungprapa, I. Jangchud, P. Ngamdee, M. Rutnakompituk and P. Supaphol. ultra fine electrospun poly(ethylene glycol)–polydimethylsiloxane–poly (ethylene glycol) triblock copolymer/poly(ethylene oxide) blend fibers. Materials letters, 60 (2006): 2920–2924.
- [7] M. Rutnakompituk, P. Ngamdee and P. Phinyocheep. Synthesis, characterization and properties of chitosan modified with poly(ethylene glycol)–polydimethylsiloxane amphiphilic block copolymers. Polymer, 46 (2005) : 9742–9752.
- [8] T. Rusu, S. Ioan and S. Corneliu Buraga. Amphiphilic copolymers as water delivery systems. European Polymer Journal, 37 (2001): 2005–2009.
- [9] ไตโรที. อนุภาคนาโน [online]. แหล่งที่มา: <http://www.noknoi.com/magazine/article.php?t=1475>.(2549).
- [10] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] J.S. Reed. Introduction to the principles of Ceramic Processing. New York: State College of Ceramic Alfred University, 1989.
- [12] เล็ก สีคง. Engineering ceramic. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545.

- [13] S. Srilomsak. Stabilization of Ceramic Slip I and II. Suranaree J. Sci. Technol. 13(3) (2006): 259–270.
- [14] M.M. Rieger and L.D. Rhein. Surfactants in Cosmetics 2<sup>nd</sup> Surfactant Science Series V.68. New York: Maccel Dekker, 1997.
- [15] R. Kelsall, I. Hamley and M. Geoghegan. Nanoscale Science and Technology. England: John Wiley & Sons, 2005.
- [16] William D. Callister, JR. Materials Science and Engineering an Introduction. New York: John Willey & Sons, 1999.
- [17] ม้วน อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ต เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์, 2544.
- [18] W.F. Smith. Foundations of Materials Science and Engineering. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [19] S.C. Liufu, J.N. Xiao and Y.P. Li. Effect of MA-Na copolymer adsorption on the colloidal stability of nano-sized ZnO suspension. Materials Letters, 59 (2005): 3494-3497.
- [20] F. Tang, T. Uchikoshi, K. Ozawa and Y. Sakka. Effect of polyethylenimine on the dispersion and electrophoretic deposition of nano-sized titania aqueous suspensions. Journal of the European Ceramic Society, 26 (2006): 1555-1560.
- [21] A. Nasu and Y. Otsubo. Rheology and UV protection properties of suspensions of fine titanium dioxides in a silicone oil. Journal of the European Ceramic Society, 296 (2006): 558-564.
- [22] A. Nasu and Y. Otsubo. Rheology and UV-protecting properties of complex suspensions of titanium dioxides and zinc oxides. Journal of the European Ceramic Society, 310 (2007): 617-623.



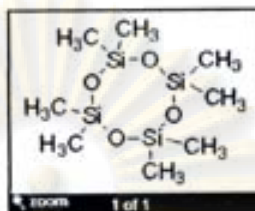
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ตารางแสดง Certificate of Analysis ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (K37277308  
719 , Merck KGaA , Germany)

M	79.90 g/mol
Assay (cerimetric)	98.0 – 100.5 %
Assay (cerimetric,calculated on dried substance)	≥ 99.0 %
Identity	Passes test
Appearance of solution	Passes test
Substances soluble in water	≤ 0.5 %
Substances soluble in dilute hydrochloric acid	≤ 0.5 %
Acidity or alkalinity	Passes test
As (Arsenic)	≤ 0.0005 %
Fe (Iron)	≤ 0.005 %
Acid-soluble barium	Passes test
Sb (Antimony)	≤ 0.01 %
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.002 %
Loss on drying (105°C ; 3 h)	≤ 0.5 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ตารางแสดง Certificate of Analysis ของน้ำมันซิลิโคน (MFCD00003269, Fluka chemika , Switzerland)



Octamethylcyclotetrasiloxane

Molecular formula	$[-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}-]_4$
Molecular weight	296.62
CAS Number	556-67-2
Beilstein registry number	1787074
MDL number	MFCD00003269
PubChem substance ID	24886726
EG/EC number	209-136-7
Vapor density	1 (vs air)
Grade	purum
Assay	$\geq 99.0\%$ (GC)
Form	liquid
Refractive index	$n_{20/D}$ 1.396
Boiling point	175-176 °C
Melting point	17-18 °C
Density	0.956 g/ml at 25 °C
Flash point	56 °C

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี เกิดเมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 บิดาชื่อ นายพีระวัฒน์ ตุ่มมี อาชีพรับราชการครู ปัจจุบันดำรงตำแหน่งครูชำนาญการพิเศษ โรงเรียนโกมลวิทยาคาร อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย มารดาชื่อ นางซูชีพ ตุ่มมี อาชีพรับราชการครู ปัจจุบันดำรงตำแหน่งครูชำนาญการพิเศษ โรงเรียนบ้านอุ่มเย็น อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย

ประวัติด้านการศึกษา สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านอุ่ม อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย เมื่อปีการศึกษา 2538 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนท่าบ่อ อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย เมื่อปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าบ่อ อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย เมื่อปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2548 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษา ในปีการศึกษา 2551

### ผลงานตีพิมพ์

Surachet Toommee, Nisanart Traiphol, Metha Rutnakornpituk and Rakchart Traiphol, Dispersion of titanium dioxide nanoparticles in silicone oil using poly(ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymer as dispersants, วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ฉบับพิเศษ, 657-661

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย