



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ ๒  
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)  
มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๗

โครงการวิจัย การสังเคราะห์ออกไซด์ผสมคอปเปอร์ อลูมินา ขนาดนาโน และศึกษา  
การกระจายตัวของอนุภาคในน้ำ

Synthesis of  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Nano-Particles and Study of its  
dispersion in water

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. เอกรัตน์ วงษ์แก้ว  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบนาโนฟลูอิด โดยการกระจายตัวของอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ โลหะคอปเปอร์ออกไซด์เตรียมด้วยวิธีการไมโครอิมัลชัน ขนาดอนุภาคและสัญญาณวิทยาของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM ผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ถึง 19 นาโนเมตร คิดเป็นร้อยละ 42.1 ของปริมาณทั้งหมด โดยที่อนุภาคของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงกลมและกระจายตัวได้ดีในน้ำ สำหรับการรักษาเสถียรภาพของนาโนฟลูอิด ทำการตรวจสอบด้วยการแขวนลอยของอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำความเข้มข้น 0.15%wt ด้วยการปรับค่าความเป็นกรดต่างต่างกันและเวลาอัลตราโซนิก 30 นาที พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมเท่ากับ 11 ซึ่งสารตัวอย่างมีความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำสูงที่สุด

คำสำคัญ : นาโนฟลูอิด, คอปเปอร์ขนาดอนุภาคนาโน, การกระจายตัว, เสถียรภาพ, ไมโครอิมัลชัน

## Abstract

This objective of this research is to study the dispersion of copper oxide nanoparticles in water as a nanofluid system. Copper oxide nanoparticles were prepared by micro-emulsion method. Particle size and Morphology of copper oxide was analyzed by TEM. The results showed that 42.1% of copper oxide has an average particle size of copper oxide in the ranges of 10 to 19 nm as well as copper oxide particle has a spherical shape and is well dispersed in water. The stability of nanofluid was examine by dispersion of 0.15 %wt of copper oxide in DI water. The pH of water was varied until the good dispersion of copper oxide was achieved with 30 min of sonication time. The results showed that the best stability of nanofluid system was obtained at pH 11.

Keywords: Nanofluids, Copper nanoparticles, Dispersion, Stability, microemulsion

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๗ ตามสัญญาเลขที่ ๑๑๓/๒๕๕๗ โครงการวิจัย เรื่อง การสังเคราะห์ออกไซด์ผสมคอปเปอร์ อลูมินา ขนาดนาโน และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำ” ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่มีระยะเวลาดำเนินงาน ๒ ปี โดยรายงานนี้เป็นผลงานวิจัยในปีที่ ๒ และได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ UV-Visible Spectrophotometer จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณมา ณ. ที่นี้ด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการทำงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ของไหลนาโน (Nanofluids)	5
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสถียรของนาโนฟลูอิด	8
2.3 กระบวนการที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโน	9
2.4 อิมัลชัน	12
2.5 การเพิ่มความเสถียรของนาโนฟลูอิด	14
2.5.1 วิธีทางกล (Mechanical method)	14
2.5.2 วิธีทางเคมี (Chemical method)	15
2.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)	17
2.7 ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluid)	19
2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของนาโนฟลูอิด	20
2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน	22
2.4.3 pH Meter	24
2.8.4 UV-Visible spectrophotometer	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 สารเคมี	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	32
3.3 วิธีการทดลอง	33
3.3.1 วิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ผสม	33
3.3.2 ขั้นตอนการกระจายโลหะออกไซด์ผสมในน้ำ และการศึกษาความเสถียรของการคงอยู่ของโลหะออกไซด์ในน้ำ	34
3.4 แผนการทดลอง	34
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	
4.1 คุณสมบัติของอนุภาคโลหะออกไซด์	35
4.2 ความเสถียรในการคงตัวอยู่ของการกระจายตัวคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ	39
<b>บทที่ 5 ผลการสรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
<b>บทสรุปผู้บริหาร</b>	45
<b>บรรณานุกรม</b>	46
<b>ภาคผนวก</b>	49

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการทดลองในงานวิจัย	34
ตารางที่ 4.1 ภาพแสดงการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ ที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน	40

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 Bicontinuous structure ของไมโครอิมัลชันที่มีสัดส่วนของน้ำ และน้ำมันใกล้เคียงกัน	13
รูปที่ 2.2 ศักย์ซีต้าของอนุภาค	16
รูปที่ 2.3 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว	17
รูปที่ 2.4 รูปแบบอย่างง่ายของไมเซลล์ และตำแหน่งของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในไมเซลล์	18
รูปที่ 2.5 การทำงานของ SEM	21
รูปที่ 2.6 เครื่อง TEM (Transmission Electron Microscope)	23
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM	24
รูปที่ 2.8 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	24
รูปที่ 2.9 อนุภาคนาโนออกไซด์ของสังกะสีหรือซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	24
รูปที่ 2.10 แถบสีกาความเป็นกรดต่าง	26
รูปที่ 2.11 UV-Vis spectrum	26
รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	27
รูปที่ 2.13 Double beam spectrophotometer	28
รูปที่ 4.1 สันฐานวิทยาของ (ก) คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ และ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์	36
รูปที่ 4.2 ร้อยละของปริมาณของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์	37
รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 200 ถึง 700 นาโนเมตร ของตัวอย่างสารทั้ง 5 ตัวอย่าง	38
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ ที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน	41
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้น	42



## บทที่ 1

### 1.1 บทนำ

ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) หรือระบบทำความเย็น เป็นหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตของโรงงาน และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการจัดการการแลกเปลี่ยนทางความร้อนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก การเลือกใช้ตัวนำความร้อนที่ดีในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ถือเป็นอีกวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยตัวกลางที่นิยมใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น น้ำ เอธิลีนไกลคอล น้ำมัน เป็นต้น แต่ของเหลวเหล่านี้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องการพัฒนาตัวกลางเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพในการนำความร้อนให้ดีขึ้น ในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการนำความร้อนสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคของแข็งกระจายลงในของเหลวที่เป็นตัวกลาง หรือที่เรียกว่า นาโนฟลูอิด (Nanofluid) ซึ่งอนุภาคของแข็งเหล่านี้จะเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและเพิ่มความจุความร้อนของระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องปรับแต่งอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิม

ในการเตรียมนาโนฟลูอิดนั้นแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีขั้นตอนเดียว (Single step method) และวิธีสองขั้นตอน (Two step method) สำหรับวิธีขั้นตอนเดียวนั้นจะสามารถเตรียมนาโนฟลูอิดได้ในขั้นตอนเดียว ข้อดีคือมีความเสถียรในการคงตัวของอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลางสูง ส่งผลให้การรวมตัวและตกตะกอนของอนุภาคของแข็งมีค่าต่ำ แต่ปัญหาคือยากต่อการขยายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับวิธีสองขั้นตอนนั้น ขั้นแรกเป็นการเตรียมอนุภาคของแข็ง ขั้นที่สองจะเป็นการกระจายอนุภาคของแข็งลงในของเหลวตัวกลาง ซึ่งวิธีนี้ในเชิงอุตสาหกรรมง่ายต่อการขยายขนาดการผลิต แต่ข้อเสียคืออนุภาคของแข็งมีพลังงานพื้นผิวสูงทำให้อนุภาคของแข็งที่กระจายตัวในของเหลวตัวกลางเกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องการพัฒนาและศึกษาความเสถียรในการคงอยู่ของอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบมีประสิทธิภาพที่ดี รวมถึงการทำงานที่ยาวนานขึ้น

สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสถียรในการคงอยู่ของอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง (Stability of nanofluid) มีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งแขวนลอยในของเหลว โดยพิจารณาจากกฎของ Stoke ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{2R^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L)g$$

เมื่อ  $V$  คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง

$\mu$  คือความหนืดของระบบ

$\rho_p, \rho_L$  คือความหนาแน่นของอนุภาคของอนุภาคของแข็งและของเหลว ตามลำดับ

$g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

จากสมการข้างต้นพบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งมีค่าน้อย ความหนืดของระบบมีค่ามาก รวมถึงผลต่างของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งและของเหลวมีค่าน้อย จะส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งแขวนลอยในของเหลวมีค่าน้อยลง ซึ่งวิธีการเตรียมอนุภาคให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยนั้น จึงถือเป็นตัวแปรที่จะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของความคงตัวในสารแขวนลอยให้มีความเสถียรที่ดีขึ้น อันจะส่งผลต่อค่าความเสถียรของการนำไฟฟ้าต่อไป นั่นก็คือวิธีการ ไมโครอิมัลชัน ซึ่งวิธีการนี้ อาศัยสารลดแรงตึงผิวเข้ามาเกี่ยวข้องในการจำกัดขนาดของอนุภาค โดยการรวมตัวกันของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเกิดเป็นไมเซลล์ ขณะที่ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุภาคเกิดขึ้นที่ภายในไมเซลล์ ส่งผลให้ได้ขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร (Margarita และคณะ, 2012) นอกจากนี้การสั่นสะเทือนของอัลตราโซนิค (Ultrasonic vibration) ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง หรือแม้แต่การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งลงในของเหลวที่เป็นตัวกลาง ยังถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความเสถียรในการคงอยู่ของอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลางด้วยเช่นกัน (Li และคณะ, 2008)

โดยการรักษาความเสถียรในการคงอยู่ของอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลางมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ วิธีเชิงกล (Mechanical method) เป็นการใช้อัลตราโซนิคช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในของเหลวให้ดียิ่งขึ้น แต่หากเวลาที่ทำการอัลตราโซนิคเกินเวลาที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคของแข็งและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีที่สองคือ วิธีเชิงเคมี (Chemical method) โดยปกตินิยมเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคของแข็งที่ไม่ชอบน้ำให้เป็นอนุภาคของแข็งที่ชอบน้ำสำหรับระบบที่มี

ตัวกลางเป็นน้ำ และอาศัยแรงผลักกันระหว่างอนุภาคของแข็งสำหรับระบบที่มีตัวกลางเป็นน้ำมัน เพื่อให้แขวนลอยได้ดีในของเหลวอื่นๆ แต่ข้อจำกัดของการเติมสารลดแรงตึงผิวคือเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่า 60 องศาเซลเซียส พันธะที่ยึดระหว่างสารลดแรงตึงผิวและอนุภาคของแข็งจะถูกทำลาย ทำให้ความเสถียรลดลงจนไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในของเหลวและตกตะกอนในที่สุด

การปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ก็เป็นหนึ่งวิธีที่น่าสนใจ ซึ่งจะทำการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งดีขึ้น โดยการเพิ่มความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวอนุภาค (Surface charge density) ให้มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่า Zeta potential โดยความเสถียรในการแขวนลอยที่ดีนั้นนั้น ค่า Zeta potential ต้องมีค่าสูงหรือต่ำกว่า  $\pm 30$  มิลลิโวลต์ จากงานวิจัยของ Lee และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับการปรับค่าความเป็นกรดต่างของนาโนฟลูอิดของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ (CuO-water) ด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับค่าความเป็นกรดต่าง ซึ่งโดยปกติค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่มีเท่ากับ 7 จากการทดลองพบว่าคอปเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรในการคงอยู่ในน้ำได้ดีและมีค่าการนำความร้อนที่ดีเช่นกัน เพราะค่าความเป็นกรดต่างของนาโนฟลูอิดมีค่าห่างจากจุด Isoelectric point (Zeta potential = 0) มากนั่นเอง

เมื่ออนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวตัวกลางมีความเสถียรก็จะทำให้ค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิดมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ตัวกลางที่เป็นของเหลวเพียงอย่างเดียว ซึ่งปัจจัยที่จะสามารถจัดการให้ค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นได้ เช่น ขนาด รูปร่าง เศษส่วนโดยปริมาตร ความหนืดของนาโนฟลูอิด เป็นต้น

สำหรับอนุภาคของแข็งที่นิยมนำมาเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้แก่ โลหะ (เช่น Cu, Ag, Au และ Fe) โลหะออกไซด์ (เช่น CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ TiO<sub>2</sub>) หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) เป็นต้น เมื่อพิจารณาในเชิงของการรวมตัวตะกอนนั้นโลหะออกไซด์พลังงานพื้นผิวจะต่ำกว่าโลหะ ทำให้แนวโน้มในการรวมตัวของตะกอนลดลง เป็นการเพิ่มการกระจายตัวของของแข็งในฟลูอิด ส่งผลต่อเสถียรภาพและค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิด (Anandam และคณะ, 2012) นอกจากนี้ขนาดผลึกของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน โดยขนาดผลึกในระดับนาโนจะทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น (Saterlie และคณะ, 2011)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยการตกตะกอน และทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนองวิธีไมโครอิมัลชัน เนื่องจากเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ให้อนุภาคของโลหะ

ออกไซด์ในระดับนาโนเมตร ทำให้เพิ่มโอกาสในการกระจายตัวได้ดีในน้ำและเพิ่มค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิดได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิกควบคู่กันอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมโลหะออกไซด์
2. ศึกษาวิธีการกระจายตัวของโลหะในน้ำด้วยวิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และวิธีอัลตราโซนิก
3. ศึกษาวิธีการวัดการกระจายตัว และความเสถียรของนาโนฟลูอิดที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตการทำงานวิจัย

1. เตรียมโลหะออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอน และไม่โครอิมัลชัน
2. ศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารก่อนตะกอนที่เหมาะสม
3. ศึกษาสถานะในการเตรียมโลหะออกไซด์ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความหนาแน่นต่ำ
4. ศึกษาวิธีการทำให้อนุภาคของแข็งที่เตรียมได้มีการกระจายตัวที่ดีในของเหลว ได้แก่วิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และวิธีการอัลตราโซนิก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลเรื่องนาโนฟลูอิดให้กับผู้สนใจ
2. พัฒนางานวิจัยนาโนฟลูอิดเพื่อใช้กับงานอุตสาหกรรมในอนาคต
3. ทราบวิธีการกระจายตัวของโลหะในน้ำด้วยวิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และวิธีอัลตราโซนิกที่เตรียมได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนทฤษฎี ซึ่งประกอบไปด้วยนิยามของนาโนฟลูอิด การเตรียมโลหะออกไซด์ที่ใช้ในระบบนาโนฟลูอิดด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ความหมายของอิมัลชัน ตัวแปรที่ส่งผลต่อความเสถียรและการรักษาความเสถียรของนาโนฟลูอิด ค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิด วิธีการทดสอบความเสถียรและการนำความร้อนของนาโนฟลูอิด ในส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการโดยในแต่ละหัวข้อจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

#### 2.1 ของไหลนาโน (Nanofluids)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงนาโนเทคโนโลยีกันอย่างกว้างขวางทั้งมีการพัฒนาในส่วนหนึ่งของไหลที่เรียกว่า “ของไหลนาโน” กันมากขึ้นโดยของไหลนาโนนั้นจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นโลหะหรือไมใช่โลหะ มีขนาดน้อยกว่า 100 nm นำไปผสมกับของเหลวเพื่อให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของเหลวนั้น เช่น อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำ อนุภาคนาโนของอลูมิเนียมผสมกับเอทิลีน ซึ่งเมื่อใส่อนุภาคนาโนเข้าไปผสมกับของเหลวแล้วจะได้ของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอย ที่เรียกกันว่า ของไหลนาโน โดยคำว่า “ของไหลนาโน” ถูกใช้ครั้งแรกโดยกลุ่มของ Argonne National Laboratory, USA เมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมาแล้ว (ดิฐพงศ์ ทองคำ, 2551)

ของไหลนาโนนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางดังต่อไปนี้ (อติเรก สุริยะวงศ์, วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)

- อุตสาหกรรมการขนส่ง (Transportation) ของไหลนาโนสามารถนำไปใช้แทนของไหลที่ใช้ในการหล่อเย็น (ปกติคือ เอทิลีนไกลคอลล์และน้ำ) น้ำมันเครื่อง ของไหลในระบบส่งกำลังอัตโนมัติ และของไหลสังเคราะห์อื่น ๆ ในยานพาหนะต่าง ๆ ได้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของไหลต่าง ๆ เหล่านี้ ของไหลนาโนสามารถที่จะทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ ปัม หม้อน้ำ มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาลงได้ทำให้ใช้เชื้อเพลิงในการไหลลดลง

- อุตสาหกรรมเครื่องจักรขนาดเล็ก (Micromachines) ในปี 1960 นั้นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นมุ่งเน้นในการทำเครื่องจักรให้มีขนาดเล็กกระทัดรัด โดยเฉพาะระบบ MEMS

(Micro-electromechanical systems) โดยที่ระบบนี้นั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงมากในขณะที่ใช้งาน ซึ่งของไหลปกตินี้ไม่สามารถระบายความร้อนได้ทันถึงแม้ว่าจะใส่อนุภาคของแข็งลงไปเพื่อเพิ่มค่าความสามารถในการนำความร้อนแล้วก็ตามแต่ก็ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากอนุภาคที่ใส่ลงไปในตอนนั้นมีขนาดใหญ่เกินไปและไม่สามารถไหลในช่องทางการหล่อเย็นของระบบ MEMS ที่แคบ ๆ ได้เนื่องจากเกิดการอุดตันของช่องทางการไหล ดังนั้นของไหลนาโนเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นของไหลในการหล่อเย็นของระบบนี้ได้

- อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัด (Electronics and instrumentation) ของไหลนาโนสามารถที่จะนำมาใช้ในเพิ่มสมรรถนะในการหล่อเย็นของระบบอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัด ได้อย่างดี โดยไหลอย่างราบเรียบและปราศจากการอุดตันในช่องทางการไหล

- อุตสาหกรรมเกี่ยวกับ HVAC ของไหลนาโนสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุตสาหกรรม HVAC และระบบการทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ด้วยเทคโนโลยีของของไหลนาโนทำให้ระบบเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่น้อยลง

- อุตสาหกรรมโลหะ (Metalworking) ของไหลนาโนสามารถที่จะใช้เป็นของไหลสำหรับหล่อเย็น ในกระบวนการการกัดและเจียโลหะได้

- อุตสาหกรรมการจัดหาพลังงานและการผลิต (Energy supply and production) ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถที่จะใช้ข้อดีของของไหลนาโนในการเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ไปยังถังเก็บ (Storage tank)

### **ศักยภาพ และทิศทางในอนาคตของ Nanofluids**

ข้อได้เปรียบของไหลนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลปกติหรือของไหลที่ใส่อนุภาคขนาดไมโครเมตรลงไปนั้นพบว่า ของไหลนาโนสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าหลายเท่า เช่น ถ้าของไหลนาโนมีค่าความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าของไหลทั่วไป 3 เท่าจะทำให้ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 2 เท่า โดยไม่ทำให้ กำลังงานปั๊ม (Pumping power) เพิ่มสูงขึ้นซึ่งโดยปกติทั่วไปนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 2 เท่าจะต้องเพิ่มกำลังงานปั๊มให้สูงขึ้นประมาณ 10 เท่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าของไหลนาโนนั้นช่วยลดกำลังงานปั๊มได้มาก และยังทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีขนาดและน้ำหนักลดลงด้วย ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลที่ใส่อนุภาคขนาดไมโครเมตรลงไปนั้น พบว่าของไหลแบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานจริงได้ เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในช่องทางการไหล ทำให้เกิดการสึกหรอ เกิดการนอนกันหรือตกตะกอนได้ง่ายและที่สำคัญคือเพิ่มกำลังงานปั๊มด้วย

### **การเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลนาโน (Nanofluid)**

การที่สารทำงานในระบบมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำนั้นจะไปขัดขวางเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แม้ว่าจะมีการปรับปรุงเทคนิคมากมายเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนก็ตาม การพัฒนา

คุณสมบัติทางความร้อนให้กับของไหลที่ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อน อาจเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความร้อนให้กับระบบทางเลือกหนึ่งของวิธีการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลนี้ก็คือการผสมอนุภาคของแข็งเข้ากับของไหล มีผงอนุภาคมากมาย เช่น โลหะ อโลหะ และสารโพลีเมอร์ ที่สามารถผสมกับของไหลเพื่อทำให้ของไหลขุ่นขึ้นได้ ค่าการนำความร้อนของของไหลที่มีอนุภาคเหล่านี้แขวนลอยอยู่ถูกคาดว่าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าของไหลธรรมดา การทดสอบวิธีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ ถูกนำไปใช้โดย Liu และ Ahuja ซึ่งผลของปริมาณอนุภาคคิดเป็นปริมาตร, ขนาด, อัตราการไหล, Pressure drop ของสารผสมนี้ และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนได้ถูกศึกษาไว้ด้วย ซึ่งการนำไปใช้ที่ได้กล่าวไว้นั้น อนุภาคที่ถูกแขวนลอยอยู่จะมีสเกลอยู่ในหน่วย ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) หรือ มิลลิเมตร (mm) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กล่าวมานั้น อาจเกิดปัญหาร้ายแรง เช่น การสึกกร่อน และการอุดตันเกิดขึ้นได้ในระบบ ดังนั้นของไหลที่ผสมด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้น้อยมาก ในการเพิ่มขีดความสามารถการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ การประยุกต์ใช้อุณหภูมิขนาดนาโนทำให้เกิดหนทางที่มีประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหล อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะแสดงคุณสมบัติที่ต่างจากตอนที่อยู่ในสถานะของแข็งธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาดนาโนที่มีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ที่สูงกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น มีนักวิจัยมากมายพยายามผสมอนุภาคนาโนลงในของไหลต่างๆ เพื่อสร้างของไหลที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน Choi เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้คำว่า “ Nanofluids ” เพื่ออ้างอิงถึงของไหลที่มีอนุภาคนาโน แขวนลอยอยู่ ผลการทดลองเบื้องต้นส่วนหนึ่งแสดงให้เห็นค่าการนำความร้อนที่สามารถเพิ่มขึ้นประมาณ 60% ซึ่งได้จากของไหลนาโนที่ประกอบด้วยน้ำและอนุภาคนาโน 5 Vol% ของ CuO

ด้วยการผสมอนุภาคนาโนในสารทำงาน ในระบบทำความร้อน หรือ ระบบทำความเย็น คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะพัฒนาได้อย่างมากมาย เหตุผลสำคัญสามารถแบ่งเป็นข้อๆได้ ดังนี้

1. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มพื้นที่ผิว และความจุความร้อนของของไหล
2. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนให้กับของไหล
3. ปฏิกริยาการชนกันท่ามกลางอนุภาคของไหลและการไหลผ่านผิวหน้าจะเกิดขึ้นรุนแรงและหนาแน่นมากขึ้น
4. การเปลี่ยนแปลงการผสมกัน และ ความปั่นป่วนของของไหลจะรุนแรงมากขึ้น
5. การกระจายตัวของอนุภาคนาโนจะทำให้อุณหภูมิของของไหลเท่ากันทั่วทุกตำแหน่ง

## 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสถียรของนาโนฟลูอิด

ในการศึกษาเกี่ยวกับนาโนฟลูอิดที่ใช้ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีวิธีการหรือเทคนิคที่นิยมใช้ในการเตรียมนาโนฟลูอิดอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีหนึ่งขั้นตอน (Single step technique) และ วิธีสองขั้นตอน (Two-step technique) สำหรับวิธีหนึ่งขั้นตอน (Single step technique) เป็นวิธีการที่สามารถเตรียมนาโนฟลูอิดได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งมีข้อดีคือการได้นาโนฟลูอิดที่มีความเสถียรสูง การรวมตัวและการตกตะกอนต่ำ แต่มีข้อเสียคือการขยายขนาดที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นทำได้ยาก ส่วนวิธีสองขั้นตอนนั้น เป็นวิธีการเตรียมนาโนฟลูอิดด้วยสองขั้นตอนคือ การเตรียมอนุภาคนาโน และการกระจายตัวอนุภาคนาโนในของเหลวตัวกลาง วิธีนี้ในแง่ของการขยายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำได้ง่ายกว่า แต่ปัญหาคือนาโนฟลูอิดที่ได้จะมีความเสถียรในการแขวนลอยของอนุภาคนาโนในของเหลวตัวกลางที่ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องการพัฒนาให้นาโนฟลูอิดที่ได้มีความเสถียรมากที่สุด

โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสถียรของนาโนฟลูอิด และการรวมตัวของอนุภาคนาโนมีดังต่อไปนี้

1. ขนาดของอนุภาคนาโน (Size of nanoparticle)
2. ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน (Density of nanoparticle)
3. การสั่นสะเทือน (Ultrasonic vibration)
4. ความเสถียรของการแขวนลอยของอนุภาคนาโน (Stability of suspensions) โดยปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อความเสถียรของการแขวนลอยนั้นพิจารณาได้จากปัจจัยดังต่อไปนี้
  - 4.1 ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle's concentration)
  - 4.2 การกระจายตัวของอนุภาคนาโน (Nanoparticle's dispersant)
  - 4.3 ความหนืดของของเหลวตัวกลาง (Viscosity of base liquid)
  - 4.4 ค่าความเป็นกรดต่างของนาโนฟลูอิด

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากสมการของ The stoke law ดังสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{2R^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L)g$$

กล่าวคือ หากต้องการให้อนุภาคนาโนสามารถแขวนลอยได้ดีในของเหลวตัวกลางนั้น จะต้องทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Diameter of nanoparticle, R) มีขนาดเล็กหรือเข้าใกล้เส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต ( $R_c$ ) มากที่สุด รวมทั้งการทำให้ผลต่างของความหนาแน่นของทั้งอนุภาคนาโน และของเหลวมีค่าน้อยที่สุด หรือแม้แต่การเลือกใช้ของเหลวตัวกลางที่มีความหนืดสูงก็จะช่วยให้อนุภาคนาโนสามารถแขวนลอยได้ดีในของเหลวตัวกลาง



### 2.3 กระบวนการที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโน

จากที่ได้กล่าวไปเบื้องต้นสำหรับขั้นตอนที่หนึ่งของวิธีแบบสองขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.2 นั้น เราสามารถจัดเตรียมอนุภาคนาโนได้ด้วยวิธีเดียวกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือ ในกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีอยู่หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel) กระบวนการอิมเพรคเนชัน (Impregnation) และกระบวนการตกตะกอนร่วม (Cociprecipitation) เป็นต้น ในที่นี้จะแสดงรายละเอียดของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการตกตะกอนร่วม ดังแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

วิธีการตกตะกอนร่วม เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทำได้โดยการนำเอาสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1 ชนิดและสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่จะใช้เป็นตัวรองรับผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นทำการเติมสารก่อตะกอน (Precipitant) ลงไป ในบางครั้งการตกตะกอนร่วมอาจจะมีเพียงส่วนประกอบของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 ชนิดเท่านั้น โดยไม่มีส่วนประกอบของตัวรองรับก็ได้ หลังจากที่ได้ตะกอนแล้วก็จะทำการล้าง อบ ขึ้นรูป และเผาต่อไป

#### การเตรียมโลหะออกไซด์ในเชิงตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียม การเตรียมแต่ละครั้งควรคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ พื้นที่ผิว เสถียรภาพ และความทนทาน

#### การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มออกไซด์ในที่นี่มีความหมายรวมทั้งองค์ประกอบกับมันต์และตัวรองรับ ซึ่งจะถูกเตรียมให้มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง โดยมีรายละเอียดของการเตรียมดังนี้

#### ขั้นที่ 1 การเตรียมสารละลายของเกลือของโลหะ

ขั้นตอนแรกคือการเตรียมสารละลายของเกลือของโลหะ  $M_n X_m$  โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยเกลือโลหะจะเปลี่ยนไปเป็นออกไซด์  $M_x O_y$  แต่ในบางกรณีต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งความสามารถในการละลายจะต้องดี โดยปริมาณตัวทำละลายที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกไซด์ที่ต้องการ ส่วนชนิดของไอออนลบ (X) ที่เลือกใช้ขึ้นกับปัจจัยหลายชนิด เช่น ความสามารถในการละลาย สิ่งปลอมปน ความสะดวกในการจัดหาราคา

ปัญหาที่พบบ่อยๆคือการกำจัดไอออนลบที่ดูดซับอยู่บนตะกอนของออกไซด์ที่ตกลงมา ซึ่งชนิดของไอออนลบจะมีผลต่อเสถียรภาพของตะกอน เช่น  $Cl^-$  จะเพิ่มความเป็นกรดของผิวหน้า  $SO_4^{2-}$  จะเกิดเป็น  $SO_2$  หรือ  $H_2S$  และทำให้องค์ประกอบอื่นเกิดการเสื่อมสภาพ อีกทั้งกำจัดได้

ยาก  $NO_3^-$  ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นระหว่างการผลิต การกำจัดไอออนลบทำได้ด้วยการล้าง หรือ การทำให้กลายเป็นไอออนไประหว่างการทำแห้งและการแคลไซน์

### ขั้นที่ 2 การตกตะกอนและการควบคุมการตกตะกอน

การตกตะกอนมี 3 ขั้นตอน คือ การอิ่มตัววดยิ่ง (Supersaturation) การเกิดนิวเอชัน (Nucleation) และการเพิ่มขนาดของตะกอน (Growth) เนื่องจากความสามารถในการละลายของ สารละลาย ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าพีเอช ดังนั้นการทำให้เกิดสารละลายอิ่มตัววดยิ่ง ทำได้โดย การลดอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนค่าพีเอช หรือการทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไป การปรับค่า พีเอชได้โดยการใส่โซเดียม โฟสเฟตเซียม และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และไบ คาร์บอเนต หลังจากสารละลายอิ่มตัววดยิ่งแล้ว กระบวนการต่อไปคือ การเกิดนิวเคลิเอชัน และ การเพิ่มขนาดของตะกอนซึ่งการเกิดนิวเคลิเอชัน อาจเป็นการเกิด  $M(OH)_2$  อย่างต่อเนื่อง หรือ เกิดจากวัสดุที่เป็นตัวล่อผลึก (Seed) การเพิ่มปริมาณการเกิดนิวเคลิเอชัน อาจทำได้โดยการเพิ่ม ตัวล่อผลึก ส่วนการเพิ่มขนาดของตะกอน ดังนั้นจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นและค่าพี เอ ถ้านิวเคลิเอชันไวกว่าการเพิ่มขนาดของตะกอน จะได้อนุภาคขนาดเล็ก และมีการกระจายของ ขนาดของอนุภาคต่ำ ถ้าการเพิ่มขนาดของตะกอนเกิดเร็วจะได้อนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีการ กระจายของขนาดอนุภาคต่ำ

การตกตะกอนอาจทำได้โดยปฏิกิริยาการควบแน่นหรือ ไฮโดรลิซิสของสารอินทรีย์ที่ ละลายได้ในตัวทำละลาย หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

### ขั้นที่ 3 การเกิดการรวมมวลและการเกิดเจล

ในกระบวนการรวมมวล (Agglomeration) ของโซล คือการจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น เนื่องจากระบบต้องพยายามลดค่าพลังงานของผิวหน้า (Surface Energy) ที่มีค่าสูง ซึ่งการเกิด การรวมมวลมี 3 แบบ คือ ไฮโดรเจล (Hydrogels) ฟล็อกค์ (Flocks) และตะกอนขนาดใหญ่ ชนิด ที่สำคัญที่สุดสำหรับการเร่งปฏิกิริยา คือ ไฮโดรเจล ซึ่งเป็นการจับกันหลวมๆแบบสามมิติ โดย อนุภาคขนาดเล็กๆจับกันเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบในช่องกว้าง (Long-Range Order) ด้วย พันธะไฮโดรเจนของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของโมเลกุล หากการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดี ความมี เกิดการชนกันของอนุภาคและหลังจากนั้นเป็นการเกิดเจล (Gelation)

ซิลิกาเจล เตรียมได้โดยการผสมสารละลายของวอเตอร์กลาส หรือโซเดียมซิลิเกตที่ อัตราส่วนของ  $SiO_2 / Na_2O = 3.22$  และกรดไฮโดรคลอริก ผลิตภัณฑ์คือโซล ซึ่งมีสูตรเป็น  $(HO)_3Si-Si-(OH)_3$  มีขนาดประมาณ 1.5 นาโนเมตร ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6 ใช้ เวลาในการเกิดเจลชั้น 10 นาที และจะได้เจลที่หนาซึ่งสามารถนำไปตัดเป็นลูกบาศก์ได้ ไฮโดร เจลที่มีปริมาตรรูพรุน 2.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีน้ำบรรจุอยู่ประมาณร้อยละ 60-70 ดังนั้น คำว่า ไฮโดรเจลจึงหมายถึงเจลที่มีน้ำเป็นส่วนใหญ่

#### ขั้นที่ 4 การล้างและการกรอง

ขั้นตอนต่อไปคือการล้างและการกรองซึ่งบางครั้งอาจทำสลับกัน วิธีที่ดีคือเติมไฮโดรเจลลงไปใต้น้ำกลั่นแล้วค่อยๆ ปล่อยให้ตะกอนนอนกันช้าๆ แล้วค่อยๆ รินตัวทำละลายทิ้ง ซึ่งในขั้นตอนนี้ไอออนต่างๆ หลุดออกมา หลังจากที่ยังผสมแบ่งเป็นชั้นอย่างเห็นได้ชัดแล้วจึงค่อยๆ รินตัวทำละลายออกและทำซ้ำอีกหลายๆ ครั้ง ซึ่งต้องใช้เวลานานมาก สิ่งที่ต้องระวังคืออาจเกิดกระบวนการย้อนกลับหรือไฮโดรเจลละลายกลับไปเป็นสารละลายอีก จึงต้องทำด้วยความระวังและควรระวังระดับของสารเจือปนในสารละลายที่รินทิ้งด้วย ถ้าต้องการกรองก่อนล้าง หลังจากกรองจะต้องล้างตะกอนที่ได้หลายๆ ครั้งจนแน่ใจว่าได้กำจัดสารเจือปนออกในระดับที่ต้องการ

#### ขั้นที่ 5 การทำให้แห้ง

การทำให้แห้งคือการกำจัดน้ำซึ่งมีอยู่มากในไฮโดรเจล ผลของการทำให้แห้งอาจทำให้โครงสร้างยุบตัวลง (Collapse) การควบคุมขั้นตอนนี้จะทำให้ได้ขนาดของรูพรุนตามความต้องการ อัตราเร็วของการอบแห้งจะขึ้นกับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราไหลของอากาศบนผิวหน้า และขนาดของตะกอน จากกระบวนการนี้ ปริมาณของน้ำจะลดลงประมาณร้อยละ 50 ซึ่งจะเกิดการหดตัวของโครงสร้างเมื่อน้ำที่อยู่ภายนอกหายไป วัสดุที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel)

หลังจากนั้นอัตราการระเหยของน้ำจะลดลงเรื่อยๆ การระเหยในขั้นนี้ถูกควบคุมด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary Force) ทำให้การระเหยของน้ำซึ่งอยู่ในรูพรุนขนาดเล็กเกิดได้ช้า การทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำๆ มักจะไม่ทำลายพื้นที่ผิวของวัสดุและทำให้ได้ออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิสูง การใช้อุปกรณ์สูญญากาศที่อุณหภูมิเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ให้ผลดี ซีโรเจลที่แห้งจะยังคงมีน้ำอยู่ร้อยละ 25 ถึง 30 จับอยู่ภายในโครงสร้างหรือเกิดพันธะเคมีอยู่กับออกไซด์

#### ขั้นที่ 6 การแคลไซน์

การแคลไซน์ เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส) หลังจากการทำให้แห้งกระบวนการที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ คือ การหลุดออกของน้ำภายในโครงสร้างที่จับอยู่ด้วยพันธะเคมี และการหลุดออกของไอออนลบต่างๆ ขั้นตอนนี้ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายของขนาดรูพรุน การสร้าง Active Phase การปรับปรุงผิวหน้า การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและเสถียรภาพเชิงความร้อน

นอกจากวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนที่กล่าวมาข้างต้นนี้แล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการจัดเตรียมอนุภาคระดับนาโนนั่นคือ ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) ซึ่งในหัวข้อถัดไป จะทำการอธิบายเกี่ยวกับความหมายและประเภทของโดยรวมของอิมัลชันต่อไป

## 2.4 อิมัลชัน (Emulsion)

อิมัลชัน (Emulsion) คือ ระบบเนื้อผสม (Heterogeneous system) ที่มีของเหลวอย่างน้อย 2 ชนิด ไม่ถูกผสมเป็นเนื้อเดียวกัน กล่าวคือ อนุภาคเล็กๆ ของของเหลวชนิดหนึ่ง (ของเหลวชั้นภายในหรือวัฏภาคภายใน, internal phase, dispersed phase or discontinuous phase) กระจายตัวอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง (ของเหลวชั้นภายนอกหรือวัฏภาคภายนอก, external phase, dispersion medium or continuous phase) โดยที่การกระจายตัวดังกล่าวจะต้องมีความคงตัวของอนุภาคในระยะเวลานานพอสมควรเท่านั้นจึงจะถูกเรียกว่า อิมัลชัน เวลาของการคงตัวก็มีตั้งแต่ 2 ถึง 3 นาที จนถึงระยะเวลาเป็นปี ซึ่งระยะเวลาที่แตกต่างกันนี้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานในระบบนั้นๆ (เทพิน, 2552)

อิมัลชัน ถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ oil-in-water (O/W) อิมัลชัน และ water-in-oil (W/O) อิมัลชัน ซึ่งคุณสมบัติของของเหลวที่มีขั้วสูงๆ (หรือ hydrophilic liquid) จัดอยู่ในประเภทของชั้นน้ำ ขณะที่ของเหลวที่มีขั้วต่ำหรือไม่มีขั้วเลย (หรือ hydrophobic liquid) จัดอยู่ในประเภทของน้ำมัน นอกจากระบบที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีระบบที่เรียกว่า multiple emulsion นั่นคือการกระจายตัวของอนุภาคน้ำในน้ำมันโดยที่ชั้นของน้ำมันก็กระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในชั้นน้ำอีกชั้นหนึ่ง (W/O/W) หรืออาจจะเป็น O/W/O อิมัลชัน ก็เกิดขึ้นได้ ซึ่งการจัดแบ่งอิมัลชันสามารถแบ่งได้ตามเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของวัฏภาคภายใน ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ร้อยละอัตราส่วนระหว่างวัฏภาคภายในและวัฏภาคภายนอก (IPR) ดังนี้

1. IPR น้อยกว่าร้อยละ 30
2. IPR อยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 74
3. IPR มากกว่าร้อยละ 74

การจัดแบ่งอิมัลชันตามขนาดของอนุภาคภายใน สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

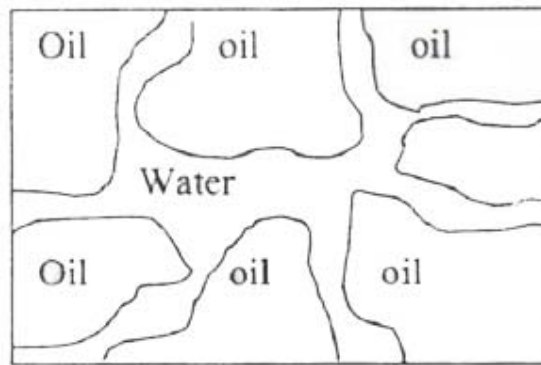
### 1. อิมัลชันแบบดั้งเดิม (Macroemulsion)

เป็นอิมัลชันที่หยดอนุภาคภายในมีขนาดใหญ่ อยู่ที่ประมาณ 0.25-10 ไมครอน เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นของผสมสีขาวขุ่นเหมือนนํ้านม นอกจากนี้ยังถูกแยกย่อยออกได้เป็นอิมัลชันเดี่ยว (Simple emulsion) ประกอบด้วย วัฏภาคน้ำมันในน้ำ หรือวัฏภาคน้ำในน้ำมัน อีกส่วนคือพหุอิมัลชัน (Multiple emulsion) ซึ่งจะเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะซับซ้อนเป็นอิมัลชันของอิมัลชัน หรือที่กล่าวไปแล้วนั้นว่าเป็น W/O/W หรือ O/W/O อิมัลชัน

### 2. ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

เป็นอิมัลชันที่มีขนาดหยดอนุภาคภายในประมาณ 10-75 นาโนเมตร มีลักษณะโปร่งใส (Transparent) หรือโปร่งแสง (Translucent) เนื่องจากขนาดของหยดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นแสง จึงไม่กระจายแสง ทำให้มองเห็นเป็นอิมัลชันใสเมื่อ

สังเกตด้วยตาเปล่า ไมโครอิมัลชันแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ O/W ไมโครอิมัลชัน ซึ่งจะมีน้ำมันละลายอยู่ในไมเซลล์ขยายของสารลดแรงตึงผิว และ W/O ไมโครอิมัลชัน มีน้ำอยู่ในไมเซลล์ขยายของสารลดแรงตึงผิว โดยสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุจะเกิดไมเซลล์แบบผกผันในน้ำมัน นอกจากนี้เมื่อสัดส่วนของน้ำและน้ำมันใกล้เคียงกันจะเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า Bicontinuous structure ดังรูป 2.1 ซึ่งจะมีโครงตาข่ายของน้ำในเมทริกซ์ของน้ำมัน และฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวมีลักษณะเป็นแผ่นต่อเนื่องจนมองไม่ออกว่าน้ำหรือน้ำมันเป็นวัฏภาคภายใน โดยไมโครอิมัลชันอาจพบในลักษณะของเหลวใสหรือเจลใสซึ่งมีลักษณะกึ่งแข็งก็ได้



รูปที่ 2.1 Bicontinuous structure ของไมโครอิมัลชันที่มีสัดส่วนของน้ำและน้ำมันใกล้เคียงกัน

### 3. นาโนอิมัลชัน

นาโนอิมัลชัน มักจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 100-600 นาโนเมตร ซึ่งนาโนอิมัลชันเกิดจากการแบ่งอิมัลชันระหว่างอิมัลชันแบบดั้งเดิมและไมโครอิมัลชันอีกชนิด เนื่องจากอิมัลชันที่มีขนาดหยดในขนาดนาโนเมตรมักถูกเรียกได้หลายชื่อ อาทิ มินิอิมัลชัน (miniemulsion), นาโนอิมัลชัน (nanoemulsion), อุลตราไฟน์ อิมัลชัน (ultrafine emulsion), อิมัลซอยด์ (emulsoid), ซับไมครอน อิมัลชัน (submicron emulsion) หรือ ทรานส์ลูเซนต์อิมัลชัน (translucent emulsion) นาโนอิมัลชันนี้ จะมีความคงตัวทางจลน์ (kinetically stable) คือมีความคงตัวต่อการตกตะกอนหรือการแยกชั้นแบบครีมมิ่ง (creaming) รวมทั้งมีความเหนียวและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและชีวประสิทธิผลของสาร จากคุณสมบัติดังกล่าว นาโนอิมัลชันจึงเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมเคมีที่ใช้เป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ หรือทางเภสัชกรรม เป็นต้น

บ่อยครั้งมักที่มีความสับสนระหว่างไมโครอิมัลชันและนาโนอิมัลชัน ไม่ว่าจะด้วยเรื่องของขนาดอนุภาคและลักษณะปรากฏ พลังงานในการเตรียม และที่สำคัญคือความคงตัว เป็นต้น ซึ่งพอที่จะอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

- ขนาดและลักษณะปรากฏ นาโนอิมัลชันจะมีขนาดใหญ่กว่าไมโครอิมัลชัน นั่นคือ 100 ถึง 1000 นาโนเมตร สำหรับนาโนอิมัลชัน จึงมีลักษณะที่โปร่งใสหรือโปร่งแสง ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และ 10-100 นาโนเมตร สำหรับไมโครอิมัลชัน โดยประเภทนี้ จะมีความโปร่งใสและความหนืดต่ำ
- พลังงานในการเตรียมนั้น นาโนอิมัลชันจะใช้พลังงานสูงในกรณีที่มีการใช้เครื่องมือ high pressure homogenizer หรือ ultrasound generator เป็นต้น และใช้พลังงานต่ำกรณีที่สามารถเกิดอิมัลชันได้เอง โดยใช้หลักการ inversion temperature method (PIT) ส่วนไมโครอิมัลชันนั้น ใช้พลังงานต่ำโดยวิธีการกวนเบาๆ เนื่องจากเกิดอิมัลชันได้เอง ( $\Delta G$  ตีลบ)
- ความคงตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปหรือการทำให้เจือจาง นาโนอิมัลชันจะมีความคงตัวได้ดีกว่าแบบไมโครอิมัลชัน แต่จะสามารถถูกทำลายได้โดย Ostwald ripening

## 2.5 การเพิ่มความเสถียรของนาโนฟลูอิด

นอกจากกระบวนการในการเตรียมนอนุภาคนาโนที่เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความเสถียรในการแขวนลอยของอนุภาคในของเหลวตัวกลางแล้ว เรายังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของความเสถียรนี้ได้ด้วยวิธีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีหลักๆคือ วิธีทางกล (Mechanical method) และวิธีทางเคมี (Chemical method) ทั้งสองวิธีนี้อาจมีการใช้ควบคู่กันในการรักษาเสถียรภาพของนาโนฟลูอิด

### 2.5.1 วิธีทางกล (Mechanical method)

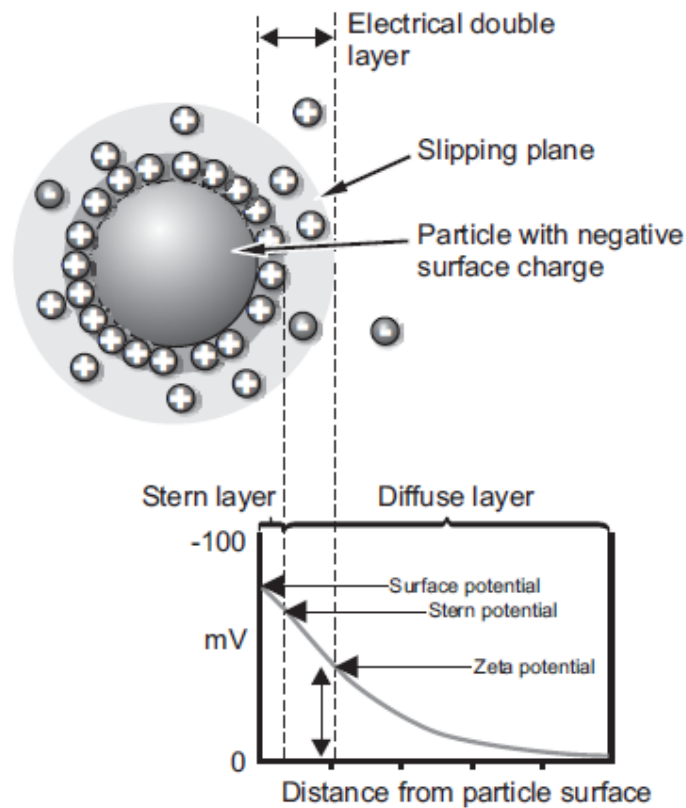
วิธีทางกลนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันคือ วิธีอัลตราโซนิก (Ultrasonic) วิธีนี้กระทำได้โดยการใช้คลื่นเสียงในการทำให้กลุ่มก้อนของอนุภาคเกิดการแตกตัว แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ หากเวลาที่ใช้ในการอัลตราโซนิกเกินจุดที่เหมาะสมจะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวและตกตะกอนกันอย่างรวดเร็ว ดังนั้นหากเลือกใช้วิธีนี้ ควรศึกษาถึงเวลาที่มีความเหมาะสมในการทำอัลตราโซนิกของระบบนาโนฟลูอิดที่ทำการศึกษา โดยทั่วไปวิธีอัลตราโซนิกสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ Ultrasonication Probe และ Ultrasonication bath

## 2.5.2 วิธีทางเคมี (Chemical method)

วิธีทางเคมีจัดเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากซึ่งวิธีในการทำนี้มีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี อาทิ การใช้สารลดแรงตึงผิว การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และการปรับค่าความเป็นกรดต่างของนาโนฟลูอิด โดยวิธีการต่างๆเหล่านี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

**วิธีการใช้สารลดแรงตึงผิว** สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ คำว่า Surfactant มาจากคำว่า Surface active agent มีคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่เป็น Hydrophilic (ชอบน้ำ) และ ส่วนหางที่เป็น Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน) หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งในที่นี้คืออนุภาคนาโนที่ไม่ชอบน้ำนั่นเอง ทำให้อนุภาคแปรสภาพเป็นชอบน้ำแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่นิยมให้กันในระบบนาโนฟลูอิดนั้นได้แก่ Sodium dodecylsulfate (SDS), Salt, Oleic acid, Cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB), Sodium octanoate (SOCT), Hexadecyl trimethyl ammonium bromide (HCTAB), Polyvinyl pyrrolidone (PVP) และ Gum Arabic หรือการใช้สารประกอบที่มีหมู่ดังต่อไปนี้  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส จะทำให้พันธะระหว่างอนุภาคและสารลดแรงตึงผิวเกิดการเสื่อมสภาพ

**การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาค และการปรับค่าความเป็นกรดต่าง** สำหรับวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนั้นมีหลักการคล้ายกับวิธีการลดแรงตึงผิว คือให้เพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้กับอนุภาคเช่น หมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) และคาร์บอกซิลิก ( $-\text{COOH}$ ) เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดการแขวนลอยในน้ำได้ดีขึ้นนั่นเอง ส่วนวิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่างนั้น เป็นวิธีการเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคได้เป็นอย่างดี โดยอาศัยแรงผลักรัน (Repulsive force) ระหว่างอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว โดยพิจารณาได้จากค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) ค่าศักย์ซีตาคือความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบๆอนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ศักย์ซีต้าของอนุภาค

โดยปกติแล้วการรวมตัวกันของอนุภาคที่แขวนลอยในของเหลวนั้น คือการทำให้ค่าศักย์ซีต้ามีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเป็นจุดที่เรียกว่า Isoelectric point (IEP) ก็จะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวและตกตะกอน แต่ในทางตรงข้ามสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับนาโนฟลูอิดนั้น จำเป็นต้องให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยในของเหลว โดยการทำให้ค่าศักย์ซีต้ามีค่าสูงซึ่งมีค่าประจุเป็นได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งการปรับค่าความเป็นกรดต่างเพื่อช่วยในการกระจายตัวนั้น ต้องพิจารณาจากค่า Point of zero charge (PZC) กล่าวได้เป็น 3 กรณีคือ

กรณีที่ 1 เมื่อค่า pH มีค่ามากกว่า PZC ค่าศักย์ซีต้าจะมีค่าสูงและแสดงประจุเป็นลบ เนื่องจากการแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความเสถียรของการแขวนลอย

กรณีที่ 2 เมื่อค่า pH มีค่าเท่ากับ PZC ค่าศักย์ซีต้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ที่จุด IEP ส่งผลให้ไม่เกิดความเสถียรในการแขวนลอย



กรณีนี้ที่ 3 เมื่อค่า pH มีค่าน้อย PZC ค่าศักย์ซีต้าจะมีค่าสูงและแสดงประจุเป็นบวก เนื่องจากการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความเสถียรของการแขวนลอย

## 2.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

ปัจจุบันสารลดแรงตึงผิวมีความเกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์มากขึ้นไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยา อาหาร พลาสติก สี หรือกาว เป็นต้น โดยสารลดแรงตึงผิวนี้ จัดเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบเข้าด้วยกันจาก 2 ส่วน คือ หมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) หรือหมู่ที่ชอบตัวทำละลาย (lyophilic) กับหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือหมู่ที่ไม่ชอบตัวทำละลาย (lyophobic) ดังแสดงตามรูปที่ 2.3 ซึ่งโดยทั่วไป ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะเป็น ไฮโดรคาร์บอน แบบสายตรงหรือแบบมีกิ่งก้าน ส่วนที่ชอบน้ำจะเป็นจำพวกที่มีไอออนหรือหมู่ที่มีขั้วอยู่ (วีระศักดิ์, 2539)



Hydrophilic

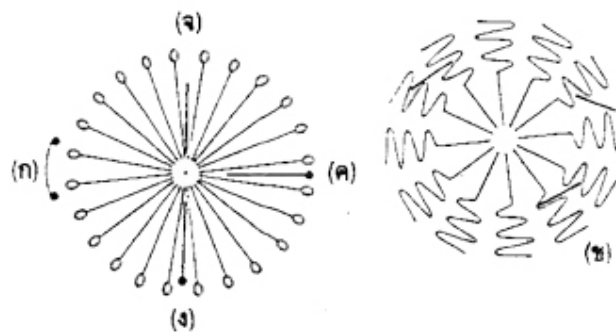
Hydrophobic

รูปที่ 2.3 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

โครงสร้างทางเคมีของส่วนที่ไม่ชอบตัวทำละลายและชอบตัวทำละลายในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวนั้นแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวทำละลายและสภาวะที่เลือกใช้ อย่างน้ำมัน พบว่าส่วนที่ไม่ชอบตัวทำละลายจะเป็นไฮโดรคาร์บอน ฟลูออโรคาร์บอน หรือสายโซ่ซิลอกเซน (Siloxane chain) ที่มีความยาวที่เหมาะสม ในขณะที่ถ้าเป็นตัวทำละลายที่มีสภาพขั้วที่ต่ำนั้น อาจเป็น สายโซ่ฟลูออโรคาร์บอนของซิลอกเซนในพอลิฟอสโฟลีนไกลคอล ในขณะที่ตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ ไอออนของหมู่ที่มีสภาพขั้วสูง จะทำหน้าที่เป็นในส่วนของชอบตัวทำละลาย ในขณะที่อยู่ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เฮปเทน (Heptane) ไอออนพวกนี้ทำหน้าที่เป็นหมู่ที่ไม่ชอบตัวทำละลาย

ในบางครั้งอาจเรียกสารลดแรงตึงผิวว่า สารเซอร์เฟสแอกทีฟ (Surface active agent) สารพวกนี้เป็นสารที่เมื่อมีอยู่ในปริมาณน้อยในระบบ จะส่งผลให้มีคุณสมบัติในการดูดซับที่พื้นผิว (Surface) หรือระหว่างผิว (Interface) ของระบบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่พื้นผิว หรือระหว่างผิวของระบบนั้นๆ คำว่า ระหว่างผิว (Interface) หมายถึง ขอบเขตระหว่างสถานะสองสถานะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และคำว่า พื้นผิว (Surface) หมายถึงขอบเขตระหว่างพื้นผิวของสถานะหนึ่งกับอีกสถานะหนึ่งที่เป็นแก๊สหรือในตัวทำละลาย โมเลกุลของสารลดแรงตึง

ผิว จะกระจายในลักษณะที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ตรงบริเวณระหว่างพื้นผิวมากกว่าบริเวณภายในสารละลาย พฤติกรรมแบบนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวในส่วนที่ชอบหรือไม่ชอบน้ำ และที่ขอบเขตของสถานะหนึ่งนั้น จะมีการเรียงตัวของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบ เช่น ทำให้แรงตึงผิว (interfacial tension) ระหว่างน้ำและสถานะที่ติดกับน้ำมีค่าลดลง มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติการเปียก (wetting properties) และทำให้เกิดชั้นซ้อนของประจุไฟฟ้า (Electrical double layer) ที่บริเวณระหว่างผิว เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะทำให้เกิดการจับกลุ่มของสารลดแรงตึงผิวที่เรียกว่า ไมเซลล์ (Micelle) เกิดขึ้น ความเข้มข้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micelle concentration; CMC) ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสารละลาย รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของไมเซลล์ และแสดงถึงตำแหน่งของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในไมเซลล์



- รูปที่ 2.4 รูปแบบอย่างง่ายของไมเซลล์ และตำแหน่งของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในไมเซลล์
- (ก) อยู่ที่ผิวของไมเซลล์ บริเวณระหว่างผิวของไมเซลล์และตัวทำละลาย
  - (ข) อยู่ระหว่างหมู่ที่ชอบตัวทำละลาย
  - (ค) อยู่ในชั้นที่เรียกว่า พาไลเสดแลร์ (Palisade layer) ของไมเซลล์ ระหว่างหมู่ที่ชอบตัวทำละลายและอะตอมตัวต้นๆของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ
  - (ง) อยู่ลึกเข้าไปในพาไลเสดแลร์
  - (จ) อยู่ในชั้นของไมเซลล์

โดยปกติแล้ว มักจะมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในสารละลายที่มีน้ำ ดังนั้นในการแบ่งชนิดของสารลดแรงตึงผิว จึงแบ่งตามประเภทของหมู่ที่ชอบน้ำดังต่อไปนี้คือ

- Anionic surfactants เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีหมู่ไม่ชอบน้ำเป็นพวกไฮโดรคาร์บอน ที่ต่อกับหมู่ที่ชอบน้ำหนึ่งหรือสองหมู่ ในสารละลายที่มีน้ำนั้น พบว่ามีการแตกตัวของไอออนลบ และไอออนบวกเกิดขึ้น โดยที่ไอออนลบจะเป็นตัวที่มีผลต่อสมบัติทางพื้นผิว
- Cationic surfactants ประกอบด้วยหมู่ที่ไม่ชอบน้ำพวกไฮโดรคาร์บอนและมีหมู่ที่ชอบน้ำหนึ่งหมู่หรือหลายหมู่ แตกตัวได้ในน้ำทำให้เกิดไอออนบวกและลบ อย่างไรก็ตาม ไอออนบวกเป็นตัวที่มีบทบาทต่อสมบัติทางพื้นผิว
- Nonionic surfactants เป็นสารที่ไม่มีการแตกตัวเป็นไอออนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีน้ำ ความสามารถในการละลายของสารเหล่านี้ในน้ำ เกิดขึ้นเนื่องจากหมู่ที่มีขั้ว เช่น หมู่พอลิกลีคอล อีเธอร์ (Polyglycol ether groups) หรือหมู่พอลิอล (Polyol groups) สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ จะรวมถึงพวกเอมีนออกไซด์ (amine oxides) อีกด้วย
- Amphoteric หรือ Zwitter ionic surfactants เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ทั้งประจุบวกและลบในโมเลกุลเดียวกันเมื่ออยู่ในน้ำ ทั้งนี้การที่สารเหล่านี้จะมีสมบัติเป็นไอออนบวกหรือลบนั้นก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสถานะของตัวกลางหรือค่า pH ของสารละลาย

## 2.7 ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluid)

ดังที่กล่าวข้างต้นของไหลนาโนจะแสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลที่ถ่ายเทความร้อนทั่วไป หนึ่งในสาเหตุนั้นคือ การแขวนลอยของอนุภาคอย่างดีเยี่ยม จะไปเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนทางปริมาตรของอนุภาคนาโนอย่างมาก เป็นเวลานานแล้วที่การพัฒนาทฤษฎีที่สลับซับซ้อน ในการทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนเป็นปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ แต่ยังคงมีการคำนวณความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกิดจากประสบการณ์ เพื่อที่จะคำนวณค่าการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ (two-phase mixture) บนพื้นฐานของการจำกัดความของประสิทธิภาพการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ (ดิฐพงศ์ ทองคำ, 2551)

$$k_{eff} = \frac{k_k p \alpha_p (dT/dx)_p + k_f \alpha_f (dT/dx)_f}{\alpha_p (dT/dx)_p + \alpha_f (dT/dx)_f}$$

Hamilton และ Crosser เสนอแบบจำลองของของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีอัตราส่วนของค่าการนำความร้อน ของทั้งสองสมการที่มากกว่า 100

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha(k_f - k_p)}$$

โดยที่  $k_p$  คือค่าการนำความร้อนของอนุภาค,  $k_f$  คือค่าการนำความร้อนของของไหล,  $\alpha$  คือสัดส่วนปริมาตรของอนุภาค,  $n$  คือตัวประกอบรูปร่างที่เกิดจากการทดลองกำหนดให้เป็น  $n = \frac{3}{\varphi}$  และ  $\varphi$  คือค่าความกลม ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้น เทียบกับพื้นที่ผิวกลมจริงๆ ของอนุภาค

ผลการทดลองของการวิจัยเหล่านั้นแสดงให้เห็นผลที่บังเอิญตรงกันที่น่าพอใจระหว่างการทำนายด้วยทฤษฎี และข้อมูลจากการทดลอง สำหรับอนุภาคพิเศษ ในช่วงของสัดส่วนปริมาตรจนถึง 30% สำหรับอนุภาคอื่นๆ ค่าตัวประกอบ  $n$  สามารถเปลี่ยนไปได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.6 จากการนำแบบจำลองของ Hamilton และ Crosser ไปประยุกต์ใช้กับของผสมระหว่างน้ำและอนุภาคนาโนของอลูมิเนียม สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k_{eff}$  ถูกประมาณค่าได้ สำหรับค่า  $\varphi$  ที่มีค่าตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 จากที่กล่าวมา ผลการคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองเบื้องต้นด้วยค่าความกลมที่กำหนด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่มีการผสมของอนุภาคของแข็งจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคของแข็ง หากค่าความกลมของอนุภาคนาโนของอลูมิเนียมเท่ากับ 0.3 การเพิ่มขึ้นอย่างมากมาของค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน จะเกิดขึ้น โดยค่าสัดส่วนการนำความร้อน ( $k_{eff}/k_f$ ) ที่สัดส่วนปริมาตร 2% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ที่สัดส่วนปริมาตร 5% นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน ยังถูกเพิ่มขึ้นได้ โดยการลดค่าความกลมของอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขที่สัดส่วนปริมาตรเดียวกัน ที่สัดส่วนปริมาตร 5% ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนสามารถเพิ่มขึ้น จากสัดส่วนการนำความร้อน ( $k_{eff}/k_f$ ) ที่ 1.2 (ค่าความกลม 1) ไปเป็น 1.5 (ค่าความกลม 0.3) ขนาดและคุณสมบัติของอนุภาคนาโน จะส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนซึ่งผลเหล่านี้ทำให้สามารถทำนายได้ในที่สุดว่า อนุภาคนาโนจะเพิ่มค่าการนำความร้อนให้กับของไหลธรรมดาที่อยู่ในระบบการถ่ายเทความร้อน

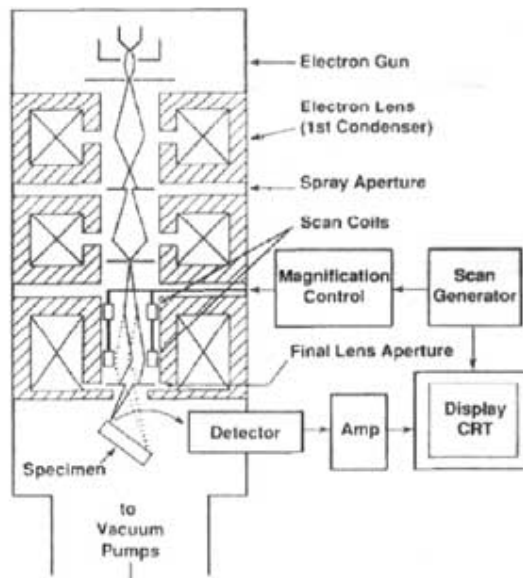
## 2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของนาโนฟลูอิด

การวิเคราะห์ความเสถียรของนาโนฟลูอิด อาศัยเครื่องมือต่างๆ เช่น SEM/TEM, Particle size analyzer, pH meter และการวัดค่าการนำไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ Transient Hot Wire Probe โดยหลักการของอุปกรณ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การศึกษาสิ่งซึ่งมีขนาดเล็กๆหรือที่เรียกว่า จุลทรรศน์ (Microscopy) นั้น นับว่าเป็นศาสตร์หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในวิทยาการหลายสาขา ในปัจจุบันเราอาจขยายภาพวัตถุในระดับ 10 เท่า โดยใช้แว่นขยาย ระดับ 10-1,000,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(EM, Electron Microscope) โดย SEM มีจุดเด่นที่มีระยะชัดลึก และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution)สูง SEM จะใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้น ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆได้ทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลด้านองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้อีกด้วย

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอปเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.5 การทำงานของ SEM

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากรังสีกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านั้นแล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave), โอลิโกอิเล็กตรอน (Auger Electron) เป็นต้นซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

## 2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

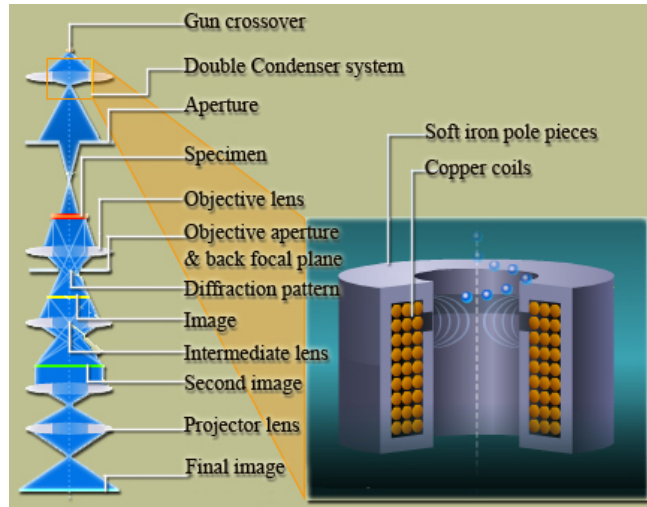
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM แสดงได้ดังรูป 2.6 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)



รูปที่ 2.6 เครื่อง TEM (Transmission Electron Microscope)

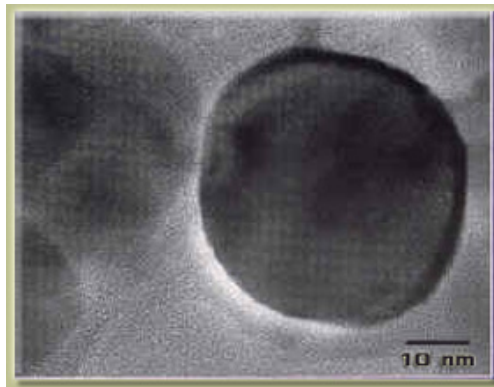
#### หลักการการทำงานของเครื่อง TEM

จากรูปที่ 2.7 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากรีจิสเตอร์ สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

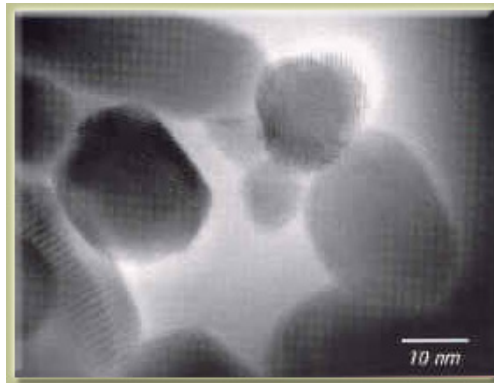


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM

ภาพโครงสร้างนาโนที่ได้จากการสำรวจของเครื่อง TEM



รูปที่ 2.8 อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )



รูปที่ 2.9 อนุภาคนาโนออกไซด์ของสังกะสีหรือซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ )



### 2.8.3 pH Meter

หลักการการวัด pH คือ การวัดสภาพความเป็นกรด หรือเป็นด่างของสารละลาย ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Solution) โดยใช้หลักการ Electrochemistry โดยวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (Potential) ระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electronic Potential) แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่อง pH Meter (Potentiometer)

pH Meter คือ เครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้วัด pH ของสารละลาย โดยหลักการวัดความต่างศักย์ (Potentiometer) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ครบวงจร ส่วนประกอบทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรด และตัวเครื่อง

1. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นภาคตรวจรับ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ที่ pH 7 (Standard pH Buffer) ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรดอ้างอิง กับอิเล็กโทรดตรวจวัด จะมีค่าความต่างศักย์เท่ากับศูนย์มิลลิโวลต์ (0 MV) ถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความต่างศักย์ก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น โดยมีอิเล็กโทรดเป็นตัวทำหน้าที่รับสัญญาณ

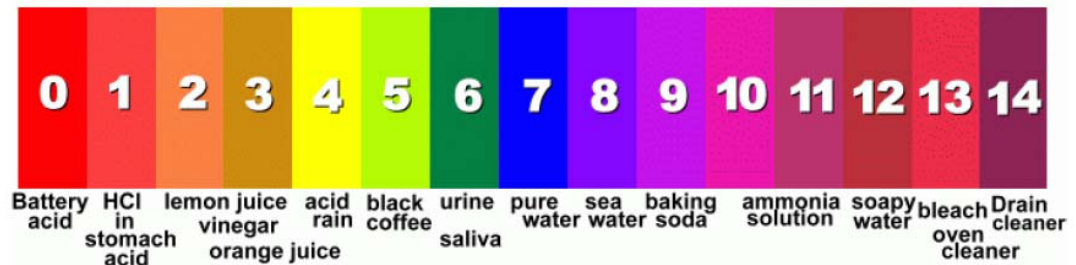
2. ตัวเครื่อง pH Meter ก็คือ Potentiometer หรือ Volt Meter ทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ

2.1 ปรับความต่างศักย์ให้กับอิเล็กโทรดอ้างอิง ให้มีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์และคงที่

2.2 แปลงสัญญาณจากความต่างศักย์ของไอออนของอิเล็กโทรดให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

2.3 ขยายสัญญาณค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ให้เพิ่มมากขึ้นอย่างเพียงพอให้แสดงผลที่มิเตอร์แบบเข็ม หรือตัวเลข

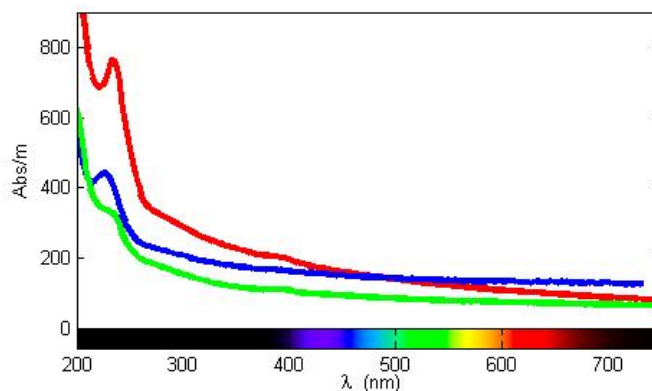
ค่า pH ของสารละลายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 14 โดยที่ถ้าสารละลายมีค่า pH น้อยกว่า 7 เป็นช่วงที่สารละลายนั้น มีความเป็นกรด ตัวอย่างที่พบได้ในชีวิตประจำวันเช่น น้ำ ส้มสายชู, น้ำมะนาว ในขณะที่ช่วงที่เป็นเบสจะมีค่า pH มากกว่า 7 ตัวอย่างเช่น สบู่, โซดาไฟ สำหรับสารละลายที่เป็นกลางจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ตัวอย่างเช่น น้ำ กลั่น



รูปที่ 2.10 แถบสีค่าความเป็นกรดต่าง

#### 2.8.4 UV-Visible spectrophotometer

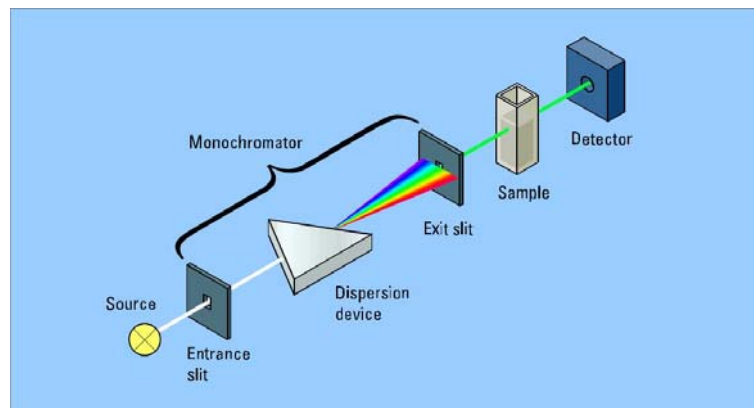
UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงUltra violet (UV) และVisible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum ดังรูปที่ 2.11 (จินดาพร, 2012)



รูปที่ 2.11 UV-Vis spectrum

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ประกอบไปด้วย

1. Light source แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H2 and D2 lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น
2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือ เกรตติง
3. Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล
4. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และ เครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

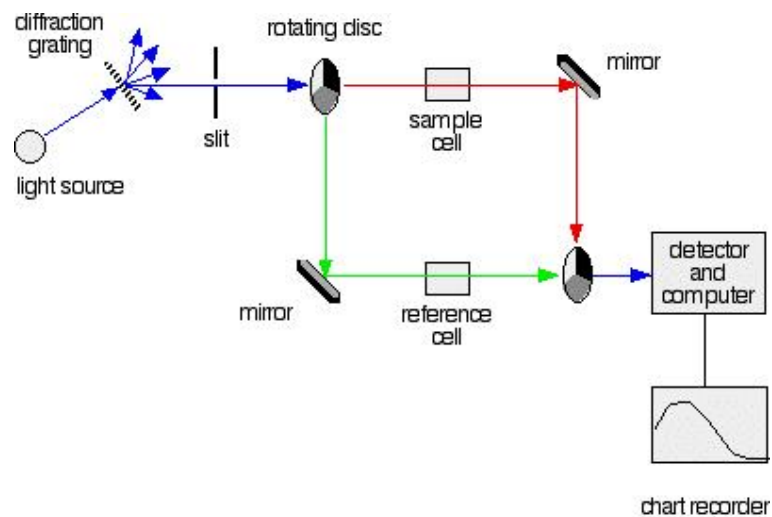
(<http://faculty.sdmiramar.edu>)

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. Single-Beam spectrophotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สัญญาณ เนื่องจากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่

ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-Beam Spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



รูปที่ 2.13 Double beam spectrophotometer

(<http://www.chemguide.co.uk>)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hwang และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาอนุภาคนาโนต่างๆ เช่นท่อนาโนคาร์บอนผนังหลาย (MWCNT) ฟูลลิรีน (fullerene) คอปเปอร์ออกไซด์ทองแดง และซิลิคอนไดออกไซด์ ได้ถูกนำมาใช้สำหรับนาโนฟลูอิดเพื่อเพิ่มการนำความร้อน โดยมีของเหลวพื้นฐานคือ น้ำ DI เอทิลีนไกลคอล และน้ำมัน โดยทำการตรวจสอบการนำความร้อนและความเสถียรของนาโนฟลูอิด พบว่าค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโน ยกเว้นระบบนาโนฟลูอิดที่ใช้อนุภาคนาโนเป็น ฟูลลิรีน ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำพื้นฐาน

เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า  $0.4 \text{ W/mK}$  และความเสถียรของนาโนฟลูอิดได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติระหว่างของเหลวพื้นฐานและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน

Chein และคณะ (2007) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้นาโนฟลูอิดเป็นน้ำหล่อเย็นสำหรับ Microchannel heat sinks (MCHS) โดยเลือกใช้คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) กระจายตัวในน้ำ ร้อยละ 0.2-0.4 โดยปริมาตร พบว่าระบบที่ใช้นาโนฟลูอิดสามารถดูดซับความร้อนได้มากกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นเมื่อระบบมีอัตราการไหลต่ำ ที่อัตราการไหลสูง การถ่ายเทความร้อนถูกจำกัดด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอนุภาคนาโนไม่มีผลต่อการดูดซับความร้อน โดยการวัดอุณหภูมิที่ผนังของ MCHS สามารถทำนายได้ตามทฤษฎีสำหรับอัตราการไหลต่ำ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของนาโนฟลูอิด มีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสามารถป้องกันการรบกวนตัวกันของอนุภาค แต่ไม่สามารถวัดค่าได้สำหรับอัตราการไหลของระบบมีค่าสูง เนื่องจากเกิดการรวมตัวและการเสื่อมสภาพของอนุภาคนั้นเอง

Devdatta และคณะ (2008) ได้นำเสนอการศึกษาการใช้งานนาโนฟลูอิดเป็นน้ำหล่อเย็นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel electric generator, DEG) โดยค่าความร้อนจำเพาะของอลูมิเนียมออกไซด์นาโนฟลูอิดที่มีความเข้มข้นต่างๆ ถูกนำเสนอให้เห็นถึงการลดลงของค่าความร้อนจำเพาะเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นอนุภาคและอุณหภูมิ นอกจากนี้ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของ DEG จากการใช้งานนาโนฟลูอิด พบว่าการประยุกต์ใช้นาโนฟลูอิดส่งผลต่อประสิทธิภาพทางพลังงานที่ลดลง เนื่องมาจากการลดลงของค่าความจุความร้อนซึ่งส่งผลกระทบต่อการดึงความร้อนกลับมาใช้สำหรับเครื่องยนต์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของการดึงความร้อนกลับมาใช้สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนที่ดี

Pantzali และคณะ (2009) ประสิทธิภาพของนาโนฟลูอิดที่เป็นน้ำหล่อเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแพลต (Plate heat exchangers, PHE) ได้รับการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อน (Thermo-physical properties) ของของเหลวพื้นฐานที่มีผลจากการเติมอนุภาคนาโน ซึ่งชนิดของการไหลทั้งการไหลแบบเฉื่อย (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพของนาโนฟลูอิดที่เป็นสารหล่อเย็น โดยความหนืดของของเหลวถือเป็นตัวแปรตัวสำคัญสำหรับประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในงานวิจัยนี้เลือกชนิดของนาโนฟลูอิดคือคอปเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 4 โดยปริมาตรแขวนลอยในน้ำ พบว่าค่าการนำความร้อนของนาโนฟลูอิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วน

ค่าความจุความร้อนของระบบมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของระบบพบว่าเมื่อค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบ non-Newtonian

Xie และคณะ (2010) ได้ทำการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของนาโนฟลูอิดที่เป็นน้ำหล่อเย็นมีการไหลแบบเฉื่อย (Laminar flow) ในท่อทองแดงทรงกลมที่มีอุณหภูมิผนังคงที่ นาโนฟลูอิดประกอบด้วยอนุภาคของ  $Al_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $TiO_2$  และ  $MgO$  ร้อยละ 55 โดยปริมาตรในน้ำ และร้อยละ 45 โดยปริมาตรในเอททิลีนไกลคอล พบว่าพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของนาโนฟลูอิดจะมีค่าสูงขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตร ขนาด ชนิดของอนุภาคนาโน และสภาวะการไหล โดย  $Al_2O_3$  และ  $ZnO$  นาโนฟลูอิด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และมีค่ามากที่สุดที่ Reynolds number มีค่าเท่ากับ 1000 สำหรับ  $MgO$  นาโนฟลูอิด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 252

Heyhat และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการไหลของนาโนฟลูอิดภายในท่อมีการไหลแบบเฉื่อย (Laminar flow) ที่อุณหภูมิผนังคงที่ สำหรับอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร กระจายตัวในน้ำด้วยปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.1-2 โดยปริมาตร พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของนาโนฟลูอิดมีค่าสูงกว่าของเหลวพื้นฐาน และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มค่า Reynolds number อีกด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโน  $Al_2O_3$  ร้อยละ 2 โดยปริมาตร

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีความจำเป็นในการทำงานวิจัย วิธีการทดลองโดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อถูกแสดงตามลำดับดังนี้

#### 3.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์ไนเตรต (Copper(II) Nitrate 3-hydrate)  
สูตรทางเคมี :  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$   
บริษัทผู้ผลิต : BDH Laboratory Supplies, England
2. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate)  
สูตรทางเคมี :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   
บริษัทผู้ผลิต : Ajax Finechem
3. ซัลฟูริก (Sulfuric acid acid)  
สูตรทางเคมี :  $\text{H}_2\text{SO}_4$   
บริษัทผู้ผลิต : Sigma-Aldrich
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)  
สูตรทางเคมี :  $\text{NaOH}$   
บริษัทผู้ผลิต : Sigma-Aldrich
5. ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)  
สูตรทางเคมี :  $\text{C}_6\text{H}_{12}$   
บริษัทผู้ผลิต : Scharlab S.L.
6. สารลดแรงตึงผิว ไตรตัน เอ็กซ์-100 (Triton x-100)  
สูตรทางเคมี :  $\text{C}_{34}\text{H}_{62}\text{O}_x$  (x=11)  
บริษัทผู้ผลิต : Scharlab S.L.
7. เมทานอล (Methanol)  
สูตรทางเคมี :  $\text{CH}_3\text{OH}$   
บริษัทผู้ผลิต : Ajax Finechem Pty Ltd.

8. อะซิโตน (Acetone)  
สูตรทางเคมี :  $C_3H_6O$   
บริษัทผู้ผลิต : Scharlab S.L.
9. น้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระจกชกรอง
2. ขวดรูปชมพู่
3. ขวดใส่สาร
4. ขาดั่งและที่จับ
5. ครกบดสาร
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก
7. ซ้อนตักสาร
8. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
9. เตาอบ
10. เตาเผา
11. ถ้วยเซรามิกส์ทนไฟ
12. แท่งคนสาร
13. แท่งแม่เหล็ก
14. บิวเรต
15. ปีกเกอร์
16. แผ่นพาราฟิล์ม
17. หลอดใส่เครื่องเหวี่ยง
18. Ultrasonic  
- ใช้เพื่อการกระจายตัวของโลหะออกไซด์ผสมในน้ำได้ดีขึ้น
19. pH meter  
- ใช้ปรับค่าความเป็นกรดต่างของนาโนฟลูอิด
22. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)  
- เพื่อวิเคราะห์ขนาดของโลหะออกไซด์ผสมในน้ำที่เตรียมได้



### 3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองสามารถสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นวิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ ส่วนที่สองเป็นขั้นตอนการกระจายโลหะออกไซด์ผสมในน้ำและการศึกษาความเสถียรของการคงอยู่ของโลหะออกไซด์ในน้ำ

#### 3.3.1 วิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ผสม

วิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ผสมโดยวิธีการตกตะกอน มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งคอปเปอร์(II)ไนเตรต ในปริมาณที่ต้องการ
2. ปรับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรต ที่ชั่งได้ในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ น้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water) ให้ได้ความเข้มข้นตามที่ศึกษา และเติม สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นตามที่ศึกษา กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตลอดเวลา จะเห็นตะกอนสารเกิดขึ้น
3. ทำความสะอาดตะกอนด้วยน้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water) และแยกตะกอนที่ได้ด้วยเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge)
4. นำตะกอนที่ได้ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง
5. นำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
6. นำสารที่ได้มาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาดต่างๆ ได้สารประกอบโลหะคอปเปอร์ออกไซด์

วิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ผสมโดยวิธีไมโครอิมัลชัน ซึ่งอัตราส่วนของ cyclohexane : Triton x-100 : ID water มีค่าเท่ากับ 64.3 : 28.6 : 7.1 โดยขั้นตอนการเตรียมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งคอปเปอร์(II)ไนเตรต และโซเดียมคาร์บอเนต ในปริมาณที่ต้องการ
2. ปรับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรต และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่ชั่งได้ในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ น้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water) ให้ได้ความเข้มข้นตามที่ศึกษา
3. ทำการผสม Cyclohexane และ Triton x-100 ในอัตราส่วนที่ทำการศึกษา ผสม โดยการกวนจนเข้ากัน หลังจากนั้นผสมสารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรตที่เตรียมไว้ข้างต้น กวนต่อเนื่องจะสารมีลักษณะโปร่งใส

4. ทำการเติมสารก่อตะกอนหรือสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และกวนต่อเนื่อง เช่นเดียวกันจนมีลักษณะโปร่งใส
5. นำตะกอนที่ได้ไปทำความสะอาดด้วย เมทานอล น้ำดีไอออนไนซ์ อะซิโตน หลายครั้ง
6. นำตะกอนที่ได้ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง
7. นำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้สารประกอบ โลหะคอปเปอร์ออกไซด์

### 3.3.2 ขั้นตอนการกระจายโลหะออกไซด์ผสมในน้ำและการศึกษาความเสถียรของการคงอยู่ของโลหะออกไซด์ในน้ำ

1. นำโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เตรียมได้ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ลงในน้ำ
2. ใช้อัลตราโซนิกในการกระจายโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม
3. ปรับค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 1-14 โดยกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์
4. ศึกษาความเสถียรของการคงอยู่ของโลหะคอปเปอร์

### 3.4 แผนการทดลอง

แผนการทดลองเป็นการระบุขอบเขตของตัวแปรที่ศึกษา ตัวแปรควบคุมเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการทดลองในงานวิจัย

ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ตัวแปรควบคุม
1. ศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารก่อตะกอนต่อขนาดผลึก	- ปริมาณน้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water) - ความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate)
2. ศึกษาวิธีการเตรียมโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน และวิธีไมโครอิมัลชัน	- เวลาในการอบสาร
3. ศึกษาขนาดของโลหะออกไซด์ในน้ำที่เตรียมได้จากวิธีต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM TEM	- เวลาในการเผาสาร - อุณหภูมิในการเผาสารที่ 400 องศาเซลเซียส - ขนาดของตะแกรงร่อน
4. ผลกระทบของความเป็นกรดต่อความเสถียรในการคงอยู่ของโลหะออกไซด์ในน้ำ โดยค่าความเป็นกรดต่างที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 1-14	- เวลาในการอัลตราโซนิก

## บทที่ 4

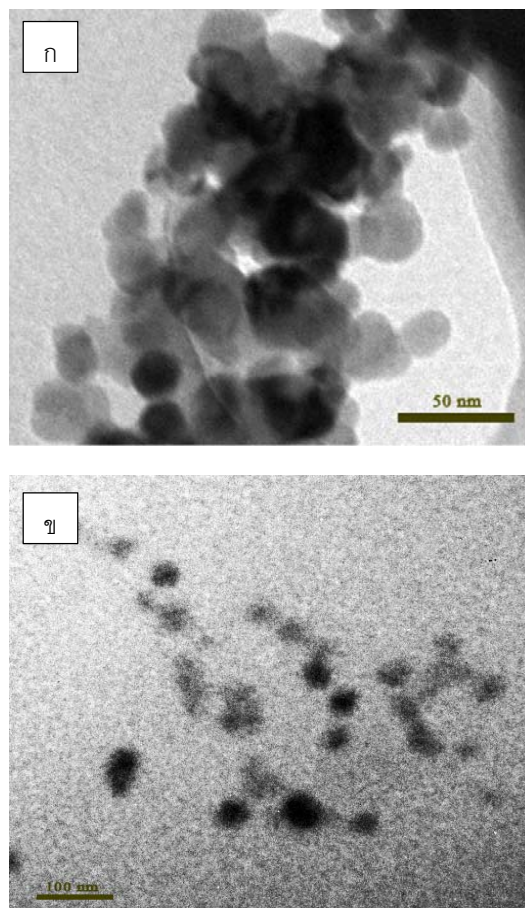
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการไมโครอิมัลชัน เพื่อพัฒนาให้ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำที่สูงยิ่งขึ้น จากเดิมที่มีการเตรียมอนุภาคด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งให้ผลการทดลองคือ ขนาดอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.8 นาโนเมตร เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.01 โมลาร์ และความเข้มข้นของสารก่อตะกอนเท่ากับ 0.1 โมลาร์ ขณะที่สามารถแขวนลอยในน้ำได้ประมาณ 1 ชั่วโมง จากการปรับค่าความเป็นกรดต่างและทำการอัลตราโซนิคที่เหมาะสม นั่นคือ ค่าความเป็นกรดต่างที่ 13 และเวลาอัลตราโซนิคที่ 45 นาที ซึ่งในที่นี้อนุภาคที่ถูกจัดเตรียมด้วยวิธีการไมโครอิมัลชัน จะถูกกล่าวถึงใน 2 ส่วนหลัก คือ คุณสมบัติของอนุภาคโลหะออกไซด์ และความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำ

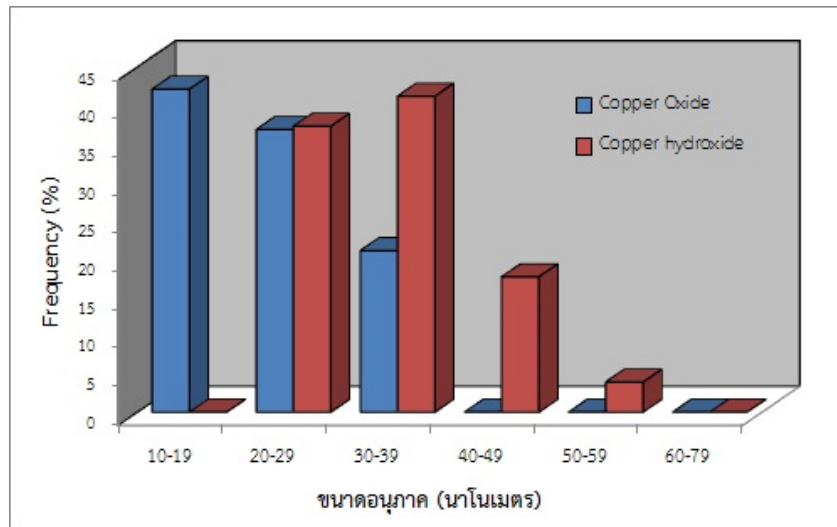
#### 4.1 คุณสมบัติของอนุภาคโลหะออกไซด์

การจัดเตรียมไมโครอิมัลชันสำหรับการทดลองนี้ เลือกใช้สัดส่วนของ cyclohexane: Triton x-100: ID water เท่ากับ 64.3 : 28.6 : 7.1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สารละลายมีลักษณะโปร่งใส ซึ่งเป็นแบบเฉพาะของไมโครอิมัลชัน เนื่องจากอิมัลชันชนิดอื่น เช่น แบบดั้งเดิม หรือนาโนอิมัลชัน ลักษณะของสารละลายจะปรากฏเป็นสีขาวขุ่นหรือในลักษณะอื่น เป็นต้น โดยที่สารตั้งต้นคอปเปอร์ไนเตรตและสารก่อตะกอนโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์ ก่อนการวิเคราะห์ถูกปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 และเวลาอัลตราโซนิคเท่ากับ 30 นาที สำหรับอนุภาคของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์ที่จัดเตรียมขึ้นด้วยวิธี ไมโครอิมัลชันถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ TEM เพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ก และ ข พบว่าอนุภาคของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ในวัฏภาคน้ำ

(วัสดุภาคนอกคือ cyclohexane มี triton x-100 เป็นสารลดแรงตึงผิว) มีลักษณะเป็นทรงกลมที่รวมกลุ่มกัน ไม่เกิดการกระจายตัว ขณะที่คอปเปอร์ออกไซด์นั้น อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกัน แต่มีการกระจายตัวได้ดีในน้ำ หลังจากนั้นทำการพิจารณาขนาดของอนุภาคทั้งคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์พบว่ามีความเฉลี่ยในแต่ละช่วง แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์มีขนาดเฉลี่ย 30-39 นาโนเมตร ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุด ร้อยละ 41.2 ถัดมาคือ ขนาดเฉลี่ย 20-29, 40-49 และ 50-59 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 37.3, 17.6 และ 3.9 นาโนเมตร ตามลำดับ ในขณะที่อนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์มีขนาดเฉลี่ย 10-19 นาโนเมตร ร้อยละ 42.1 ซึ่งถือเป็นปริมาณที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 20-29 และ 30-39 ซึ่งมีปริมาณอยู่ร้อยละ 36.8 และ 21.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ (ก) คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ และ (ข) คอปเปอร์ออกไซด์

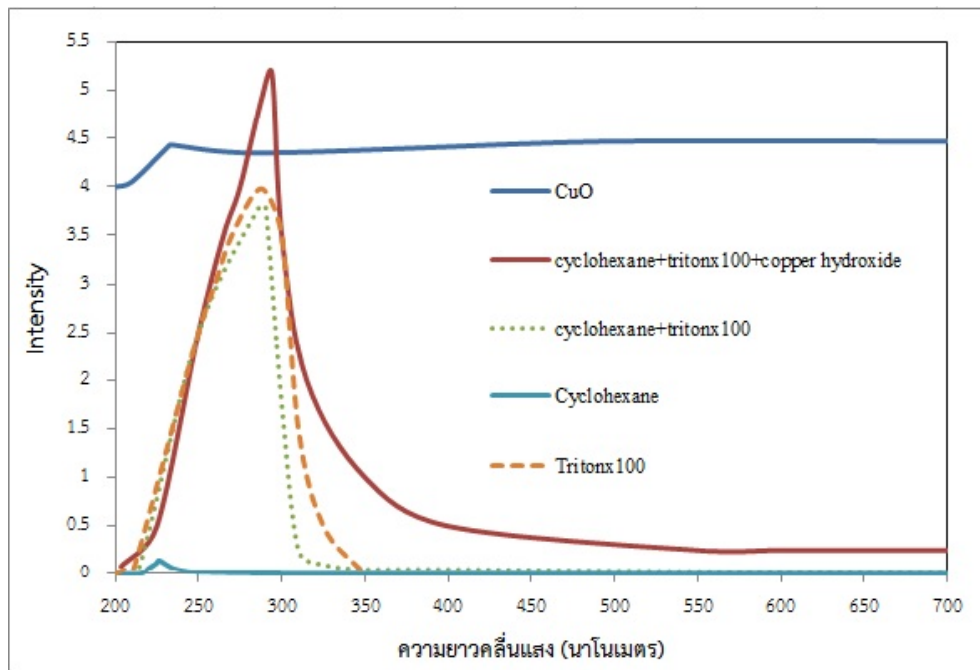


รูปที่ 4.2 ร้อยละของปริมาณของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์

ในส่วนของสัณฐานวิทยาที่จะชี้ให้เห็นถึงขนาดของอนุภาค อันมีผลต่อความสามารถในการแขวนลอยและกระจายตัวในน้ำแล้ว การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคยังเป็นส่วนสำคัญที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่จะนำไปสู่การศึกษาความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงนี้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ UV-Visible spectrophotometer ความยาวคลื่นแสงที่เลือกใช้อยู่ในช่วง 200 ถึง 700 นาโนเมตร (การอ่านค่าช่วงของการดูดกลืนแสงของสารจะถูกพิจารณาที่ตำแหน่ง Intensity สูงกว่า 0.5 เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ) โดยแยกการวัดค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละองค์ประกอบคือ

1. Cyclohexane
2. Triton x-100
3. Cyclohexane + Triton x-100
4. Cyclohexane + Triton x-100 + Copper hydroxide
5. Copper oxide

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าสาร Cyclohexane มีปรากฏการดูดกลืนแสงเนื่องจากสารมีลักษณะใส (คล้ายกับน้ำ ละเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง) ขณะที่ Triton x-100 ปรากฏค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 225-450 นาโนเมตร ทั้งนี้โดยลักษณะทั่วไปของ Triton x-100 มีสีใส แต่เนื่องด้วยความหนืดสูงจึงทำให้ปรากฏค่าดูดกลืนแสงขึ้นได้ เมื่อทำการรวม Cyclohexane กับ Triton x-100 พบว่าลักษณะกราฟคล้ายคลึงกับ Triton x-100 เพียงอย่างเดียว และเมื่อทำการเติมสารตั้งต้นและสารก่อนตะกอนแล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่า Intensity มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นเมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของคอปเปอร์ออกไซด์พบว่า สามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้ในทุกช่วงที่ทำการทดลอง โดยมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดในช่วง 231-235 นาโนเมตร ซึ่งตำแหน่งนี้จะใช้เป็นตัวแปรหลักในการวิเคราะห์ความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำจากการลดลงหรือคงที่ของค่า Intensity ที่ค่าการดูดกลืนแสงนี้ในหัวข้อถัดไป




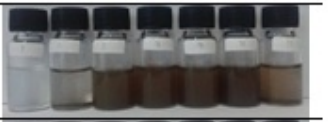


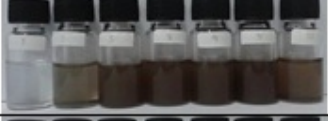


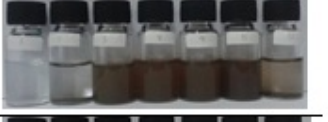



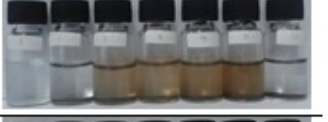

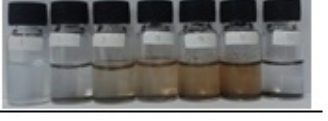
รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 200 ถึง 700 นาโนเมตร ของตัวอย่างสารทั้ง 5 ตัวอย่าง

#### 4.2 ความเสถียรในการคงตัวของ การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ

ความเสถียรในการคงตัวของ การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำสามารถเพิ่มความเสถียรได้ดียิ่งขึ้นด้วยวิธีเชิงกลและเชิงเคมี สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ทั้ง 2 วิธี ในการปรับปรุงความเสถียรในการคงตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่ความเข้มข้น 0.15%wt โดยเวลาในการอัลตราโซนิกซึ่งเป็นวิธีเชิงกลคือ 30 นาที ขณะที่วิธีเชิงเคมีคือการปรับค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 1 ถึง 13 ด้วยกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 โมลาร์ ผลการทดลองในส่วนนี้มีการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังที่จะทำการอภิปรายผลการทดลองต่อไป

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงการกระจายของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่ความเป็นกรดต่าง 1 ถึง 13 เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน พบว่าเมื่อเวลาที่ทำการทดลองเพิ่มสูงขึ้น อนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์เกิดการตกตะกอนมากขึ้นตามเวลาในทุกตัวอย่าง หากเปรียบเทียบที่เวลาทำการทดลองเดียวกันพบว่า การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 มีความสามารถในการกระจายตัวสูงที่สุด และตัวอย่างที่มีการปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 มีการกระจายตัวต่ำที่สุด ทั้งนี้ที่ค่าความเป็นกรดต่างที่ 1 จะเห็นได้ว่าไม่ปรากฏอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ เนื่องจากในสภาวะนี้อนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์ไม่สามารถทนได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้อนุภาคเกิดการสลายตัว (Parhi P.K. และคณะ, 2015)

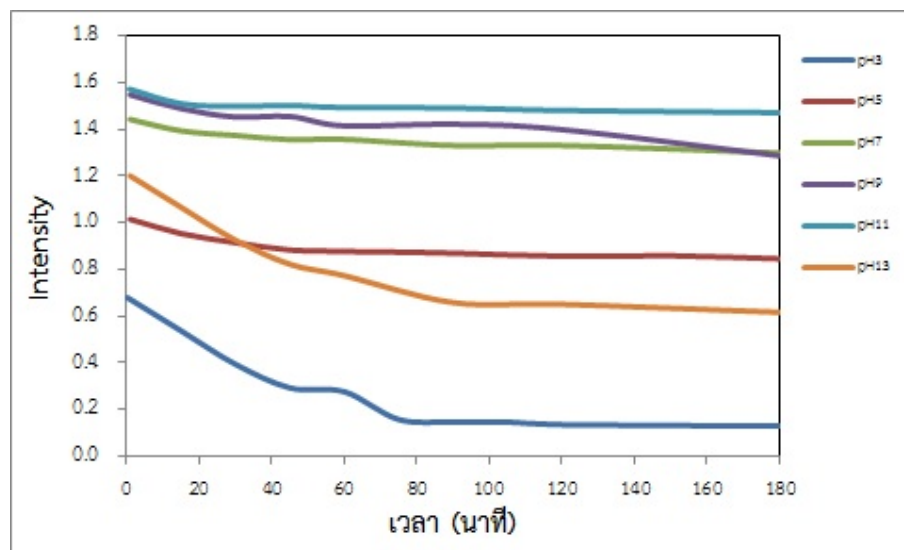
ตารางที่ 4.1 ภาพแสดงการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน

เวลา	pH: 1, 3, 5, 7, 9, 11 and 13	เวลา	pH: 1, 3, 5, 7, 9, 11 and 13
1 นาที		3 ชั่วโมง	
15 นาที		4 ชั่วโมง	
30 นาที		5 ชั่วโมง	
45 นาที		6 ชั่วโมง	
1 ชั่วโมง		1 วัน	
1.5 ชั่วโมง		15 วัน	
2 ชั่วโมง		30 วัน	

นอกจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพแล้ว การวิเคราะห์เชิงปริมาณยังมีส่วนสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงผลการทดลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ UV-Visible spectrophotometer โดยอาศัยค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแสง 231-235 นาโนเมตร เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนของค่า Intensity ของสารเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการทดลองนี้ใช้เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง (เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือจึงไม่สามารถทำการทดลองด้วยเวลาที่สูงกว่านี้) ผลการ

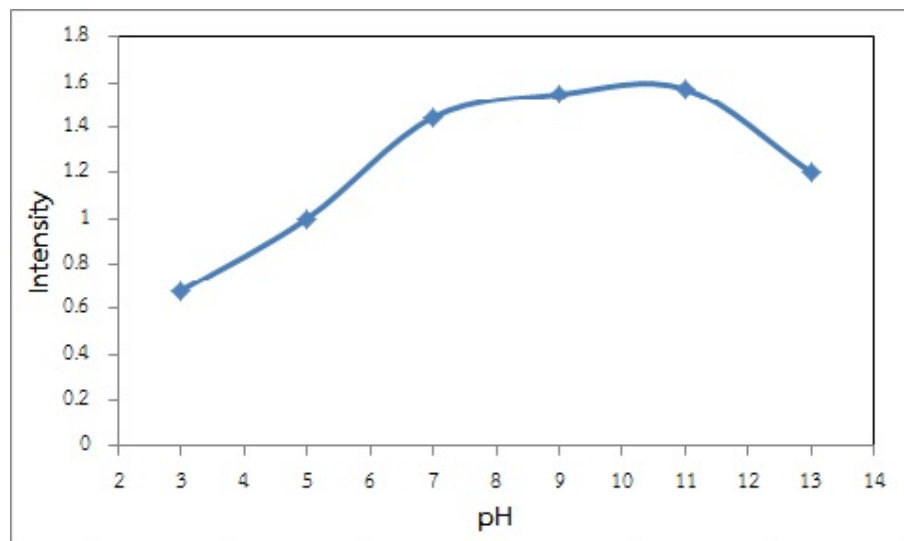


ทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น Intensity มีค่าลดลงทุกตัวอย่างทดลองแต่การลดลงของ Intensity มีความแตกต่างกันคือ ที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5, 7, 9 และ 11 Intensity มีค่าลดลงต่อเนื่องในช่วง 20 นาทีแรก และค่อนข้างคงที่เมื่อเวลามากกว่า 20 นาที ขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 และ 13 มีแนวโน้มการลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 80 นาทีแรก ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างที่ 11 และเวลาในการอัลตราโซนิก 30 นาที มีความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการปรับค่าความเป็นกรดต่างอื่นๆ เนื่องจากความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชัน Hydroxyl groups (OH) บนพื้นผิวของอนุภาคมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเป็นกรดต่างจนถึงค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 ส่งผลให้เกิดแรงผลักกันระหว่างอนุภาค การรวมตัวกันของอนุภาคเกิดได้ยากขึ้น แต่เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 13 พบว่าความเสถียรในการคงตัวของอนุภาคมีค่าลดลงเนื่องจากแรงผลักระหว่างอนุภาคลดต่ำลง ซึ่งเกิดจากการเกิดขึ้นซ้อนของประจุไฟฟ้า (Electrical double-layer) (Wang X.J และคณะ, 2009)



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน

ทั้งนี้การเลือกตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ในส่วนของการนำความร้อนของสารถือเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการควบคุมค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของสาร (Yoo D.H. 2007) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองนี้ทำการวัดความเข้มข้นของการดูดกลืนแสง ณ เวลาเริ่มต้น ที่มีค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 มีค่า Intensity สูงที่สุดเท่ากับ 1.57 จึงถือได้ว่า การกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำความเข้มข้น 0.15 %wt ที่ทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าการนำความร้อนของสารต่อไป ซึ่งจากผลการทดลองที่อภิปรายมาทั้งหมดนี้ หากเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมอนุภาคด้วยการตกตะกอนพบว่า ให้ผลดีกว่าในแง่ของความเสถียรในการคงตัวของอนุภาคในน้ำ ที่เห็นได้จากเวลาที่อนุภาคเกิดการแขวนลอยจนกระทั่งเกิดการรวมตัวและตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปมีเวลาที่ยาวนานกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาการเตรียมอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน เพื่อปรับปรุงขนาดและความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ ทั้งนี้ยังอาศัยวิธีค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิคร่วมด้วย ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. อนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นทรงกลม และกระจายตัวได้ดีในน้ำ เมื่อวิเคราะห์ด้วย TEM
2. การเตรียมอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีอัลตราโซนิค ทำให้ได้อนุภาคในระดับนาโนที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำสุด 10 ถึง 19 นาโนเมตร คิดเป็นร้อยละของปริมาณทั้งหมดคือ 42.1
3. ค่าการดูดกลืนแสงสีของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ ที่ทำการวัดในช่วง 200 ถึง 700 นาโนเมตร พบว่าสามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้ในทุกช่วงที่ทำการทดสอบ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดเท่ากับ 231 ถึง 235 นาโนเมตร
4. ความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่มีการปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11 และเวลาอัลตราโซนิค 30 นาที ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรดต่างอื่น
5. อนุภาคที่เกิดจากการเตรียมด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน ให้ผลทางด้านความเสถียรในการคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำได้ดีกว่าวิธีที่เตรียมด้วยการตกตะกอน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเปลี่ยนโลหะคอปเปอร์ออกไซด์เป็นโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ อลูมิเนียม อาจช่วยให้การแขวนลอยในน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากอลูมิเนียมออกไซด์มีรูพรุนเยอะ น้ำหนักเบา ซึ่งสามารถช่วยพยุงตัวในการแขวนลอยในน้ำได้

## บรรณานุกรม

- จินดาพร บุญวัฒนา. 2012. **UV-Visible spectrophotometer**. เชียงราย: ศูนย์เครื่องมือและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.
- ดิฐพงศ์ ทองคำ. **การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน**, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2551.
- ทัศนัย บุญเกิดตันสกุล, นริส ประทีนทอง และ ณีภุชฌ์ กาศยปนนันท์. **การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุท่อสร้างด้วยหัววัดแบบขดลวดร้อน**, สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- เทพิน จันทรมหเสถียร. 2552. **การพัฒนาโลชันน้ำมันงาในรูปแบบนาโนอิมัลชัน**. เชียงใหม่: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เภสัชกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วีระศักดิ์ โสภิตกิตติกุล. 2539. **อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่ออุลตราไวโอเลตสเปกตรัมของสไตรีน**. **เชียงใหม่:** สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อดิเรก สุริยวงค์ และ วีระพันธ์ ดั่งทองสุข. **คุณรู้ไหมว่า Nanofluids คืออะไร**, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์.
- Anandan D. and Rajan K.S.. **Synthesis and Stability of Cupric Oxide-based Nanofluid: A novel Coolant for Efficient Cooling**. Asian Journal of Scientific Research 5. 2012: 218-227.
- Chein R and Chuang J. **Experimental microchannel heat sink performance Studies using nanofluids**. International Journal of Thermal Sciences 46. 2007: 57-66.
- Devdatta P.K, Ravikanth S. V, Debendra K.D and Daniel Oliva. **Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant**. Applied Thermal Engineering 28. 2008: 1774-1781.
- Heyhat M.M, Kowsary F, Rashidi A.M, Momenpour M.H and Amrollahi A.

- Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed flow regime.**  
Experimental Thermal and Fluid Science. 2012.
- Hwang Y, Lee J.K, Lee C.H, Jung Y.M, Cheong S.I, Lee C.GKu, B.C and Jang S.P.  
**Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids.**  
Thermochimica Acta 455. 2007: 70–74.
- Lee D, Kim J.W and Kim B.G. **A New Parameter to Control Heat Transport in Nanofluids: Surface Charge State of the Particle in Suspension.** J. Phys. Chem. B 110. 2006: 4323-4328.
- Lee J.W, Hwang K.S, Jang S.P, Lee B.H, Kim J.H, Choi S and Choi C.J. **Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles.** International Journal of Heat and Mass Transfer 51. 2008: 2651–2656.
- Li X.F, Zhua D.S, Wang X.J, Wanga N, Gaoa J.W and H. Lia. **Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids.** Thermochimica Acta 469. 2008: 98–103.
- Liu M.S Lin M.C.C, Tsai C.Y and Wang C.C. **Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method.** International Journal of Heat and Mass Transfer 49. 2006: 3028–3033.
- Margarita S,D., Kelly P., Magali B. **Preparation of inorganic nanoparticles in oil-in-water microemulsions: A soft and versatile approach.** Current Opinion in Colloid & Interface Science 17. 2012: 297-305.
- Pantzali M.N, Mouza A.A and Paras S.V. **Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE).** Chemical Engineering Science 64. 2009: 3290-3300.
- Parhi P.K., Sethy T.R., Rout P.C., Sarangi K. **Selective Dissolution of Copper from Copper-Chromium Spent Catalyst by Baking-Leaching process.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry 21. 2015.
- Saterlie M, Sahin H, Kavlicoglu B, Liu Y, Graeve O. **Particle Size Effect in the Thermal Conductivity Enhancement of copper-based nanofluids.** Nanoscale Research Letters 6. 2011: 217.

- Thomas W.H and Douglas W. F. **The isoelectric point/point-of zero-charge of interfaces formed by aqueous solutions and nonpolar solids, liquids, and gases.** *Journal of Colloid and Interface Science* 309. 2007: 183–188.
- Wang X.J., LI X.F. **Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity.** *Chinese Physics Letters* 26. 2009.
- Xie H, Fujii M and Zhang X. **Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48. 2005: 2926–2932.
- Xie H, Li Y and Yu W. **Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows.** *Physics Letters A* 374. 2010: 2566–2568.
- Yoo D.H. **Thermal Conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluids.** *Journal of the Korean Physical Society* 51. 2007.
- Zhu D, Li X, Wang N, Wang X, Gao J, Li H. **Dispersion Behavior and Thermal Conductivity Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Nanofluids,** *Current Applied Physics* 9. 2009: 131–139.

ภาคผนวก





# การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิค

## Dispersion of copper oxide in water by pH value and ultrasonic method



วิเชษฐ์ ละมัย และ เอกรัตน์ วงษ์แก้ว\*

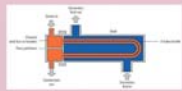
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

### บทคัดย่อ

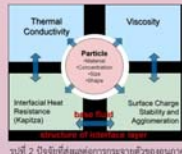
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ เพื่อใช้เป็นสารหล่อเย็นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์เตรียมด้วยวิธีการตกตะกอน สำหรับการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ ศึกษาด้วยการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และวิธีอัลตราโซนิค พบว่า อนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมวิธีการตกตะกอนให้ขนาดเฉลี่ยในระดับนาโน (< 22 nm) ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 13 ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดีที่สุด สำหรับเวลาในการอัลตราโซนิคที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำที่ตีขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ทำการศึกษาค่าคือ อนุภาคขนาดเล็กทำให้เวลาในการอัลตราโซนิคลดลง เมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น เวลาในการอัลตราโซนิคเพิ่มขึ้นด้วย

### บทนำ

การปรับปรุงประสิทธิภาพการนำความร้อนสามารถทำได้โดยเติมอนุภาคของแข็งกระจายลงในของเหลวที่เป็นตัวกลาง หรือที่เรียกว่า นาโนฟลูอิด (Nanofluid) เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวกลางที่เป็นของเหลวเพียงอย่างเดียวกับการเติมอนุภาคของแข็งลงในของเหลวตัวกลางนั้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของระบบสูงขึ้น (Zhu และคณะ, 2005)



รูปที่ 1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อคู่ขนาน



รูปที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยการตกตะกอน โดยพิจารณาความเข้มข้นของสารก่อตกตะกอนคือขนาดเฉลี่ยคอปเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีการปรับค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิคควบคู่กันอีกด้วย

### วิธีการทดลอง



### ผลการวิจัยและอภิปรายผล (ต่อ)

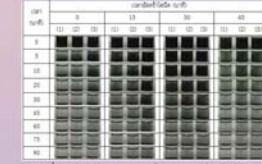
❖ การเปรียบเทียบเวลาอัลตราโซนิคต่อการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ



ตารางที่ 3 ผลของเวลาอัลตราโซนิคต่อการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ

- เวลาอัลตราโซนิค 15 (ถึงเวลาที่เหมาะสมเท่านั้น)
- เวลาที่ทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีคือ 45 นาที
- เมื่อเวลาอัลตราโซนิคเกินเวลาที่เหมาะสม การกระจายตัว

❖ การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการกระจายตัวในน้ำ

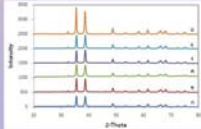


ตารางที่ 4 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการกระจายตัวในน้ำ

- (1) 150-180 ไมโครเมตร
  - (2) 90-105 ไมโครเมตร
  - (3) 53-63 ไมโครเมตร
- ขนาดอนุภาค 53-63 ไมโครเมตร (ถึงเวลาที่เหมาะสมเท่านั้น)
  - ขนาดอนุภาคส่งผลต่อความเหมาะสมของเวลาอัลตราโซนิคที่แตกต่างกัน

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

❖ การวิเคราะห์ขนาดผลึก



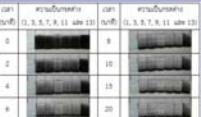
รูปที่ 3 ผลของ XRD ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นของสารก่อตกตะกอนโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ คือขนาดเฉลี่ยคอปเปอร์ออกไซด์ (a) 0.025 M (b) 0.05 M (c) 0.1 M (d) 0.15 M (e) 0.2 M (e) CuO นาโนคริสตัล

ความเข้มข้นของสารก่อตกตะกอน (โมลาร์)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
0.100	0.025	20.2
0.100	0.050	21.9
0.100	0.100	18.8
0.100	0.150	19.1
0.100	0.200	19.6

ตารางที่ 1 ขนาดผลึกของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมในน้ำ ที่ความเข้มข้นของสารก่อตกตะกอนต่างกัน

- ความเข้มข้นของสารก่อตกตะกอน ขนาดของผลึกออกไซด์
- ความเข้มข้นของสารก่อตกตะกอน < 0.100 โมลาร์ ขนาดผลึกออกไซด์

❖ การเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างต่อการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ



ตารางที่ 2 ค่าความเป็นกรดต่างต่อการกระจายตัวของโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำ

- ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 13 มีการกระจายตัวที่ดีที่สุด
- ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 ตกตะกอนเร็วที่สุด
- โลหะคอปเปอร์ออกไซด์ละลายตัวที่กรดต่างเท่ากับ 1

### สรุปผลการทดลอง

- จากการศึกษาเรื่องการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิค ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้
1. การเตรียมโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน ทำให้ได้อนุภาคในระดับนาโนที่ต่ำกว่า 22 นาโนเมตร
  2. สำหรับระบบที่ทำการศึกษา ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 13 ช่วยการกระจายตัวของอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ได้ดีที่สุด
  3. เวลาอัลตราโซนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่ทำการศึกษาคือ 45 นาที
  4. เวลาอัลตราโซนิคที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคโลหะคอปเปอร์ออกไซด์ที่เลือกใช้

### เอกสารอ้างอิง

Zhu D, Li X, Wang N, Wang X, Gao J, Li H. 2009. Dispersion Behavior and Thermal Conductivity Characteristics of  $Al_2O_3-H_2O$  Nanofluids, Current Applied Physics, 9, 131-139.

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา (สัญญาเลขที่ 76/2556)