

กระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในน้ำเสีย  
โดยเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว



นายวุฒิวัต หล่อตระกูล

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COALESCENCE PROCESS FOR TREATING LUBRICANT OIL IN  
WASTEWATER BY WITH AND WITHOUT SURFACE MODIFIED  
STAINLESS STEEL FIBROUS COALESCER



Mr. Wootiwat Lortragool

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำมันหล่อลื่นใน  
น้ำเสียโดยเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุง  
พื้นผิว

โดย

นายวุฒิวัต หล่อตระกูล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

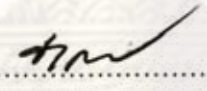
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

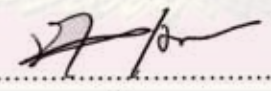
อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

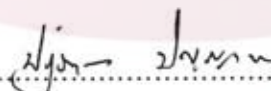
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

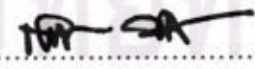
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरองศ์)

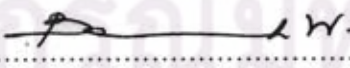
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชกต ศรีสฤติธย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. บวรศักดิ์ วาณิชกุล)

วุฒิวัต หล่อตระกูล : กระบวนการ โคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในน้ำเสีย โดยเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว. (COALESCENCE PROCESS FOR TREATING LUBRICANT OIL IN WASTEWATER BY WITH AND WITHOUT SURFACE. MODIFIED STAINLESS STEEL FIBROUS COALESCER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล,อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล 196 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์เพื่อแยกน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยให้มีความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มในสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน (HMDS) ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันในน้ำเสียด้วยค่าซีไอดีและขนาดของอนุภาคน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากการศึกษาทดลองพบว่าเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดมุมสัมผัสของหยดน้ำมันในน้ำเท่ากับ 72.68 และ 19.01 องศาตามลำดับ ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดีของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางความสูง 5 - 20 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 95.28 - 98.43 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมงพบว่ามีค่าลดลง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างร้อยละ 24 - 68 สำหรับเส้นใยสแตนเลสและเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 27 - 72 เมื่อปรับปรุงพื้นผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 14.8 - 22.6 ไมครอน และ 16.0 - 24.9 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งเกิดจากกลไกการกรองและการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการกรองได้ถูกประยุกต์ใช้ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วย (X) เพื่อใช้ควบคุมระบบบำบัดและวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการจับยึด ( $\alpha$ ) ของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลาง โดยค่า X ที่เหมาะสมจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.367 และ  $\alpha$  จากการทดลองสำหรับเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว คือ 0.8323 และ 0.9031 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 4970587521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : COALESCER / LUBRICANT OIL / STAINLESS STEEL FIBROUS

WOOTIWAT LORTRAGOOL : COALESCENCE PROCESS FOR TREATING LUBRICANT OIL IN WASTEWATER BY WITH AND WITHOUT SURFACE MODIFIED STAINLESS STEEL FIBROUS COALESCER. THESIS ADVISOR : PISUT PIANMANAKUL, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : PATIPARN PANYAPALAKUL, Ph.D., 196 pp.

The objective of this work was to study the treatment of oily wastewater by using fibrous stainless steel as a coalescing medium, as well as, to improve the treatment efficiency by modification of stainless steel surface. The surface modification purposed to enhance the hydrophobicity of coalescing medium was based on the dip-coated technique in silica compound and hexamethyldisilane (HMDS). The oily wastewater was synthesized from water and lubricating oil at concentration of 1,000 mg/l. Moreover, the quantity of lubricant oil presence in water was analyzed in term of COD value and oil droplet size. From the study, it was found that the contact angles of oil droplet on the surface of fibrous stainless steel and modified one in water phase were 72.68 and 19.01 degrees, respectively. The COD removal efficiencies in range of 24 - 68% were obtained in application of 5 - 20 cm in height, 95.28 - 98.43% of porosity and 5 - 25 LPH of wastewater flowrate. In addition, the removal efficiencies of the modified surface fiber were enhanced to 27 - 72%. The sauter mean diameter ( $d_{32}$ ) of oil droplet in the synthetic oily wastewater of 10.5  $\mu\text{m}$  was increased to 14.8 - 22.6  $\mu\text{m}$  and 16.0 - 24.9  $\mu\text{m}$  in case of stainless steel and the surface modified stainless steel fiber, respectively. The filtration and coalescence between oil droplets should be the important treatment mechanism obtained in this study. Furthermore, the filtration efficiency equation was applied to propose the dimensionless parameter (X) for controlling the coalescer system and also analyzing for the attachment efficiency ( $\alpha$ ) between oil droplets and coalescing medium. The optimal X parameter (0.367) was obtained experimentally, and the  $\alpha$  values acquired from conventional and modified fibrous stainless steel were 0.8323 and 0.9031, respectively.

Department : Environmental Engineering

Field of Study : Environmental Engineering

Academic Year : 2009

Student's Signature *Wootiwat Lortragool*

Advisor's Signature *Pisut Pianmanakul*

Co-Advisor's Signature *Patiparn Panyapalakul*

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรศ ศรีสติตย์ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ และดร. บวรศักดิ์ วาณิชกุล ที่กรุณาใช้เวลาในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งยังสละเวลาตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษานี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และให้คำแนะนำในการใช้งานห้องปฏิบัติการและเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและให้ความรู้ ตลอดจนกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ผู้กรุณาให้ทุนการศึกษาและสนับสนุนในด้านต่างๆ ตลอดจนกำลังใจและความเข้าใจมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	4
2.2 ความรู้พื้นฐานทางเคมีกายภาพที่นำมาประยุกต์ในการแยกอิมัลชัน.....	8
2.3 เทคนิคต่างๆในการแยกอิมัลชัน.....	15
2.4 การแยกอิมัลชันด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์.....	17
2.5 การไหลในชั้นตัวกลางบรรจุ.....	33
2.6 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel process).....	37
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	51
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	51
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	56
3.3 วิธีวิเคราะห์ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	69

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	71
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	71
4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง.....	74
4.3 การศึกษาอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง.....	83
4.4 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ด้วยตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	92
4.5 การศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยกับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์.....	103
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	196



# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกลักษณะอิมัลชันของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน.....	7
2.2	ค่าแรงตึงผิวและแรงตึงระหว่างผิว (ไดน์/เซนติเมตร) ของของเหลวบางชนิดที่ 20 องศาเซลเซียส.....	9
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส งานแอดฮีชัน แรงตึงระหว่างผิว และสัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็ง.....	13
2.4	ผลกระทบของลักษณะหรือคุณสมบัติของอิมัลชันต่อโคเอเลสเซอร์.....	31
2.5	ผลกระทบของลักษณะหรือคุณสมบัติของเส้นใยตัวกลางต่อโคเอเลสเซอร์.....	32
2.6	ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการต่อโคเอเลสเซอร์.....	32
2.7	ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการโซลเจล.....	40
2.8	สารออกาโนไตรอัลโคซิลิเลนบางชนิดที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุผสมอนินทรีย์-อินทรีย์ด้วยกระบวนการโซลเจล.....	43
3.1	สัดส่วนโมลาร์ของซิลิกาโซลต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว.....	55
3.2	ตัวแปรในการทดลองที่ 1.1.....	57
3.3	ตัวแปรในการทดลองที่ 1.2.....	58
3.4	ตัวแปรในการทดลองที่ 1.3.....	59
3.5	ตัวแปรในการทดลองที่ 2.1.....	60
3.6	ตัวแปรในการทดลองที่ 2.2.....	62
3.7	ตัวแปรในการทดลองที่ 2.3.....	63
3.8	ตัวแปรในการทดลองที่ 3.1.....	65
3.9	ตัวแปรในการทดลองที่ 3.2.....	66
3.10	ตัวแปรในการทดลองที่ 3.3.....	68
3.11	ตัวแปรในการทดลองที่ 4.....	69
3.12	วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	70
4.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	73
4.2	ลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง.....	74
4.3	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางต่างๆ.....	75
4.4	ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ, แรงตึงผิว และมุมสัมผัสบนพื้นผิวสแตนเลส.....	78

ตารางที่	หน้า
4.5	ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ, แรงตึงผิว และมุมสัมผัสบนพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว..... 79
4.6	ตัวแปรในการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำ..... 81
4.7	ตัวแปรในการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำมัน..... 81
4.8	ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่ความสูงต่างๆ..... 85
4.9	ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่ความพรุนต่างๆ..... 87
4.10	ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ..... 90
4.11	ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากชั้นตัวกลางเส้นใยที่ปรับปรุงพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยสแตนเลสปกติเฉลี่ย.. 102
4.12	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสแตนเลสในรูปของทรงกลมที่ความพรุนต่างๆ..... 106

## สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคอิมัลชันและความเร็วในการลอยตัวของอิมัลชันชั้นแรกและอิมัลชันชั้นที่สอง.....	6
2.2	การจำแนกลักษณะน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามลักษณะทางกายภาพ.....	7
2.3	แรงที่กระทำต่อโมเลกุลภายในและที่ผิวของของเหลว.....	8
2.4	แรงที่กระทำให้เกิดสมดุลของหยดสารกระจายที่ติดกับของแข็งในสารต่อเนื่อง..	11
2.5	มุมสัมผัสของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็งในสารกระจาย เมื่อ ก) พื้นผิวเปียกได้ด้วยสารกระจาย ข) พื้นผิวไม่สามารถเปียกได้ด้วยสารกระจาย.....	12
2.6	ผลของความขรุขระของพื้นผิวต่อมุมสัมผัส.....	14
2.7	ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดของถังปล่อยให้ลอย (A) ที่ต้องการและขนาดของอนุภาคอิมัลชัน ( $d_p$ ).....	16
2.8	ตัวอย่างโคเอเลสเซอร์และตัวกลางแบบเส้นใยชนิดต่างๆ.....	19
2.9	การส่งถ่ายสารกระจายเข้าสัมผัสตัวกลาง ก) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน ข) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ ค) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย.....	21
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคสารกระจายกับประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยปรากฏการณ์แบบต่างๆ.....	23
2.11	ลักษณะการไหลของอิมัลชันผ่านตัวกลาง.....	24
2.12	ลักษณะการทำงานของโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาด $d_p$ และสูง H.....	25
2.13	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของชั้นที่สองในกรณีในตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย..	26
2.14	ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย ก) สารกระจายจับยึดกับตัวกลาง ข) หยดของสารกระจายที่รวมตัวกันเป็นฟิล์มไหลแยกจากการไหลของอิมัลชัน.....	27
2.15	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของชั้นที่สองในกรณีที่ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย.....	27
2.16	ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย ก) สารกระจายถูกดักให้ค้างอยู่ระหว่างตัวกลาง (สังเกตว่ามุมสัมผัส $> 90^\circ$ ) ข) เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคสารกระจายในช่องว่างระหว่างตัวกลาง.....	27
2.17	หยดของสารกระจายที่ออกมาจากโคเอเลสเซอร์.....	28

รูปที่		หน้า
2.18	เมื่อผิวของการหลุดเป็ยกได้ด้ด้วยสารกระจาย ก) เกิดฟองของสารกระจายที่ผิวของการหลุด ข) เมื่อฟองเกิดการแตกกลายเป็นอนุภาคนาขนาดเล็ก.....	29
2.19	เมื่อผิวของการหลุดเป็ยกไม่ได้ด้ด้วยสารกระจาย ก) การเกิดหยดของสารกระจายขนาดใหญ่คล้ายลูกบอลลูก (สังเกตว่ามุมสัมผัส > 90°) ข) การเกิดเจ็ดเนื่องจากความเร็วในการไหลหรืออัตราส่วนของสารกระจายและสารต่อเน่องมีค่าสูง.....	30
2.20	คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D สูง H บรรจุตัวกลางทรงกลมขนาด $d_p$ .....	33
2.21	กระบวนการไหลเจดแบบต่างๆ.....	37
2.22	ซิลิคอน-ออกซิเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไหลเจด.....	38
2.23	การดำเนินไปของกระบวนการไหลเจดของ $Si(OR)_4$ ขึ้นกับปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น.	39
2.24	โมเลกุลอินทรีย์ถูกกักอยู่ในโครงสร้างของเจด (ซ้าย) โครงสร้างพอลิเมอร์ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดซ้อนกัน (ขวา) โดยไม่เกิดพันธะเคมีกันขึ้น.....	41
2.25	การรวมตัวของหมู่อินทรีย์เข้ากับโครงสร้างของเจดด้วยพันธะโควาเลนต์ (ซ้าย) โครงสร้างสารอินทรีย์และอนินทรีย์จะเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน (ขวา).....	42
2.26	โครงสร้างโมเลกุลคล้ายกรงของ $(XSiO_{1.5})_n$ เมื่อ $n = 6, 8, 10$ และ $X = R, H, OH$ .....	42
2.27	การเคลือบผิวด้ววิธีการจุ่ม.....	45
2.28	แก้วที่ทำการเคลือบและไม่เคลือบพื้นผิวมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน.....	46
3.1	คอลัมน์โคเอเลสเซอร์.....	51
3.2	แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง โดยลูกศรแสดงทิศทางการไหลของน้ำเสีย.....	52
3.3	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 ลิตร.....	54
3.4	ตัวกลางเส้นใยฝอยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง.....	54
3.5	ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิว.....	55
3.6	การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	56
3.7	ตัวอย่างการหาค่าแรงตึงผิววิกฤตด้ววิธีของซิสแมน.....	57
3.8	การหาค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง.....	58

รูปที่	หน้า	
3.9	การหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวตัวกลางในน้ำ.....	59
3.10	การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส.....	60
3.11	การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส.....	61
3.12	การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย.....	63
3.13	การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	64
3.14	การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	66
3.15	การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย.....	67
3.16	การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในรูปทรงกลม.....	69
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์และความเข้มข้นของน้ำมัน.....	71
4.2	ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์.....	73
4.3	อนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ (กำลังขยาย 400 เท่า).....	73
4.4	พื้นผิวสแตนเลสและพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงด้วยสารละลายซิลิเกตส่วนต่างๆ.....	75
4.5	มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางต่างๆ.....	76
4.6	การติดติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการเคลือบผิว.....	76
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและ $\cos\theta$ ของพื้นผิวสแตนเลส.....	78
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและ $\cos\theta$ ของพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	79
4.9	หยดน้ำในอากาศบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย) และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา).....	81
4.10	หยดน้ำมันในอากาศบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย) และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา).....	82
4.11	มุมสัมผัสของหยดน้ำมันในน้ำบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย) และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา).....	82

รูปที่	หน้า
4.12	ผลกระทบของความสูงของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์..... 84
4.13	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่ความสูงต่างๆ..... 85
4.14	ผลกระทบของความพรุนของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์..... 86
4.15	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่ความพรุนต่างๆ..... 88
4.16	ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์..... 89
4.17	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่อัตราการไหลต่างๆ..... 90
4.18	อนุภาคน้ำมันบางส่วนติดอยู่บนชั้นตัวกลาง (ซ้าย) และอนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่หลุดออกจากชั้นตัวกลาง (ขวา)..... 91
4.19	ผลกระทบของความสูงของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์..... 93
4.20	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงต่างๆ..... 94
4.21	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงตัวกลางต่างๆ..... 95
4.22	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงตัวกลางต่างๆ..... 95
4.23	ผลกระทบของความพรุนของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์..... 96
4.24	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความพรุนต่างๆ..... 97

รูปที่		หน้า
4.25	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ตัวกลางความพรุนต่างๆ.....	98
4.26	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ตัวกลางความพรุนต่างๆ.....	98
4.27	ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์.....	99
4.28	ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ.....	99
4.29	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ.....	101
4.30	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ.....	101
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความสูงชั้นตัวกลางกับความเร็วการไหล..	105
4.32	การประมาณค่า $d_p$ จากความพรุนของชั้นตัวกลาง.....	106
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X).....	108
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)	108
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกโคเอเลสเซนซ์) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)..	109
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกโคเอเลสเซนซ์) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X).....	109

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$a_v$	พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface)
$a_{v,Sphere}$	พื้นที่ผิวจำเพาะของทรงกลม
A	พื้นที่หน้าตัด, พื้นที่ระหว่างผิว
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดของชั้นตัวกลาง
C	ความเข้มข้นของอิมัลชันหรือค่าซีโอดีของน้ำเสีย
$COD_{Effluent}$ , $C_S$	ค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังการบำบัดหรือที่ออกจากโคเอเลสเซอร์
$COD_{Influent}$ , $C_0$	ค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนการบำบัดหรือที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์
$\%COD_{Removal}$	ร้อยละการกำจัดซีโอดีของน้ำเสีย
d, $d_E$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารกระจายหรือน้ำมัน
$d_{32}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์
$d_{mean}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย
$d_p$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์
$D_{eq}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent diameter)
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, $9.81 \text{ m/s}^2$
H	ความสูงของชั้นตัวกลาง
K	ค่าคงที่โบลทซ์แมน (Boltzmann's constant), $1.38 \times 10^{-23} \text{ kg.m}^2/\text{K.s}^2$
n	จำนวนอนุภาคน้ำมัน, จำนวนช่องว่างตรงและขนานกันในชั้นตัวกลาง
$N_{Re,p}$	เลขเรย์โนลด์สำหรับชั้นตัวกลาง
Q	อัตราการไหล
r	สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Roughness coefficient)
$S_p$	พื้นที่ผิวของตัวกลาง
$S_{p,Sphere}$	พื้นที่ผิวของตัวกลางทรงกลม
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$v_0$	ความเร็วในการไหลผ่านชั้นตัวกลางหรือความเร็วตามผิว
$v_{av}$	ความเร็วเฉลี่ยในช่องว่างของของไหล
$V_{bulk}$	ปริมาตรทั้งหมดของชั้นตัวกลาง (ช่องว่างรวมกับตัวกลางบรรจุ)



สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$V_p$	ปริมาตรของตัวกลาง, เส้นใย
$V_{p,Sphere}$	ปริมาตรของตัวกลางทรงกลม
$V_{void}$	ปริมาตรช่องว่างภายในชั้นตัวกลาง
$w$	ความเร็วในการลอยตัวหรือตกตะกอนของสารกระจาย
$W_c$	งานโคฮีชัน
$W_{adh(ab)}$	งานแอดฮีชันของสาร a และ b
$W_{adh(sd)c}$	งานแอดฮีชันของตัวกลางกับสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง
$W_{c(d)c}$	งานโคฮีชันของสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง
$W_{eff}$	งานประสิทธิผล
$x$	ปริมาณของสารกระจายที่ถูกจับโดยหนึ่งอนุภาค
$X$	กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $X = \frac{3}{2}(1-\epsilon)\eta_T \frac{H}{\psi d_p}$
$\alpha$	ประสิทธิภาพในการเกาะติดหรือจับยึดของตัวกลาง (Collision efficiency)
$\epsilon$	ความพรุนของชั้นตัวกลาง
$\phi$	สัมประสิทธิ์การแผ่กระจาย (Spreading coefficient)
$\gamma$	แรงตึงผิว
$\gamma_a, \gamma_b$	แรงตึงผิวของสาร a และสาร b
$\gamma_{ab}$	แรงตึงระหว่างผิวของสาร a กับ b
$\gamma_c$	แรงตึงผิววิกฤต
$\gamma_{C,MOD}$	แรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสเตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว
$\gamma_{C,SS304}$	แรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสเตนเลส
$\gamma_{dc}$	แรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่องหรือน้ำมันกับน้ำ
$\gamma_{LV}$	แรงตึงระหว่างผิวของของเหลวกับอากาศ
$\gamma_{sc}$	แรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับสารต่อเนื่องหรือตัวกลางกับน้ำ
$\gamma_{sd}$	แรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับสารกระจายหรือตัวกลางกับน้ำมัน
$\gamma_{SL}$	แรงตึงระหว่างผิวของของแข็งกับของเหลว
$\gamma_{SV}$	แรงตึงระหว่างผิวของของแข็งกับอากาศ
$\eta_{Diff}$	ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$\eta_{int}$	ประสิทธิภาพในการปะทะโดยตรง
$\eta_{sed}$	ประสิทธิภาพในการตกตะกอน
$\eta_T$	ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมหรือประสิทธิภาพในการส่งถ่ายอนุภาคน้ำมัน เข้าสู่ผิส์กับตัวกลางในโคเอเลสเซอร์
$\mu_c$	ความหนืดของสารต่อเนื่อง
$\theta$	มุมสัมผัสหยดสารกระจายกับผิวของของแข็ง
$\theta_{dc}$	มุมสัมผัสหยดสารกระจายกับผิวของของแข็งในสารต่อเนื่อง
$\theta_{LV}$	มุมสัมผัสบนของแข็งของหยดของเหลวในอากาศ
$\psi$	ดรรชนีความกลม (Sphericity)
$\Delta P$	ความดันลดที่เกิดขึ้น
$\Delta \rho$	ผลต่างความหนาแน่นของสารกระจายและสารต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลภาวะทางน้ำเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญปัญหาหนึ่งในปัจจุบัน น้ำเสียจากการเกษตร อุตสาหกรรม รวมถึงจากแหล่งชุมชนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ เสื่อมโทรมลง โดยเฉพาะจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของชุมชนเมืองและอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าในด้านต่างๆ ของมนุษย์ โดยน้ำเสียเหล่านี้อาจเกิดจากการจัดการที่ไม่ถูกต้องหรือขาดประสิทธิภาพจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียกลายเป็นมลภาวะทางน้ำขึ้น ซึ่งน้ำเสียนั้นอาจประกอบไปด้วยสารหรือองค์ประกอบหลายอย่างที่แตกต่างกัน ทำให้ความเน่าเสียหรือความเป็นพิษนั้นแตกต่างกันด้วย

น้ำมันเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มักพบปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียอยู่เสมอ สามารถพบได้ทั้งในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน ซึ่งมีที่มาจากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำมันจากห้องครัวหรือร้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่นหรือสารหล่อเย็นในเครื่องจักรอุตสาหกรรม น้ำมันปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น โดยน้ำมันจะปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้ในหลายลักษณะ เช่น น้ำมันละลายน้ำ น้ำมันที่เป็นชั้นฟิล์มอยู่เหนือผิวน้ำ และน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งน้ำมันเป็นหนึ่งในสารมลพิษทางน้ำที่มีความสำคัญและอันตรายอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของน้ำมันและสารไฮโดรคาร์บอนเอง ทำให้กำจัดหรือจัดการได้ยาก นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากและเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาหรือรบกวนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียทุกชนิด จึงมีความจำเป็นจะต้องกำจัดหรือแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่ท่อน้ำทิ้งหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมัน มักจะทำการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ และใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะส่งน้ำเสียไปดำเนินการบำบัดทางชีวภาพต่อไป เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ เช่น ทางเคมี หรือเพื่อช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาจากน้ำมันที่จะเกิดกับระบบทางชีวภาพขึ้น ทั้งยังสามารถนำน้ำมันที่แยกออกมานำกลับไปผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

กระบวนการโคเอเลสเซนซ์เป็นกระบวนการทางกายภาพที่ใช้แยกอนุภาคอิมัลชันต่างๆ เช่น อนุภาคน้ำมันในน้ำ ด้วยการไหลผ่านชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งอนุภาคน้ำมันจะเกิดการ

ชนและเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกลาง เมื่ออุณหภูมิน้ำมันอื่นไหลตามมาเกิดการชนและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่ก่อน จะทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจนหลุดออกจากชั้นตัวกลาง และสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและเร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้แยกด้วยแรงโน้มถ่วง (ตามกฎหมายของสโตกส์) ซึ่งช่วยประหยัดพื้นที่ที่ต้องใช้ในการแยกด้วยการปล่อยให้ลอยตามธรรมชาติในถังตกตะกอน ทั้งนี้กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกของการกรอง เนื่องจากมีการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยพื้นผิวของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์เป็นลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ ซึ่งตัวกลางควรมีพื้นผิวที่ชอบอนุภาคอิมัลชันหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic media) สำหรับตัวกลางที่ใช้ทั่วไปมีทั้งแบบเม็ดและเส้นใย เช่น เรซินหรือเส้นใยสังเคราะห์ต่างๆ เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำ ราคาไม่แพงและสามารถหาได้ง่ายโดยทั่วไป โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความสูงของชั้นตัวกลาง ความพรุนของชั้นตัวกลาง และความเร็วในการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของโคเอเลสเซอร์ และทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นด้วยการเคลือบผิวโดยวิธีการจุ่ม (Dip coat technique) ด้วยสารประกอบของซิลิกา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของโคเอเลสเซอร์ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยสำหรับการควบคุมระบบและการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

(1) เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ เช่น ลักษณะพื้นผิวของตัวกลาง ความสูงของชั้นตัวกลาง ความพรุนของชั้นตัวกลาง และความเร็วการไหลของน้ำเสีย

(2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

(3) เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยสำหรับการควบคุมระบบและโมเดลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์โดยใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางได้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

(1) งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2) ตั้งปฏิกริยาโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เป็นแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow reactor) ทำจากพลาสติกใสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร) สูง 0.8 เมตร

(3) น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันในรูปของอิมัลชัน ซึ่งเตรียมจากน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน พีทีที วี-120 ชนิดเกรดเดี่ยว SAE 40 ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ทำการผสมกับน้ำประปาให้มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง คือ เส้นใยสแตนเลส โดยใช้เส้นใยฝอยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ตราฟุจิไบรท์ ของบริษัท ยูนิเวลล์ (เอเชีย) จำกัด ขนาดน้ำหนักสุทธิ 14 กรัม และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ทำการเคลือบผิวของเส้นใยด้วยสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน (HMDS) โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coat technique) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Bhagat, Kim และ Ahn (2006)

(5) ทำการศึกษาลักษณะเส้นใยสแตนเลสและผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบผิวในสารละลายที่มีสัดส่วนโมลาร์ของ TEOS:EtOH:HMDS:H<sub>2</sub>O แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ 1:9.1:1:6.6, 1:18.2:1:6.6, 1:36.4:1:6.6, 1:54.6:1:6.6 และ 1:72.8:1:6.6 และศึกษาประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ชนิดเส้นใยสแตนเลสธรรมดาและเส้นใยที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่สภาวะต่างๆ คือ ความสูงของชั้นตัวกลาง 5 - 20 เซนติเมตร ความพรุนของชั้นตัวกลางร้อยละ 95.28 - 98.43 และอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ขนาดอนุภาคน้ำมัน และมุมสัมผัสของอนุภาคบนตัวกลาง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) เพื่อให้ทราบถึงผลของการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ และทราบถึงกลไกการทำงานรวมถึงปัญหาต่างๆในการใช้งานอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

(2) เพื่อให้ทราบถึงผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสด้วยสารประกอบต่างๆ

(3) เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์โดยใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนจะอยู่ในรูปของของผสมของน้ำและน้ำมันซึ่งผสมรวมกันอยู่ได้ในหลายลักษณะ เช่น น้ำมันละลายน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชันทั้งที่มีสารลดแรงตึงผิวและไม่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่เป็นชั้นลอยอยู่เหนือน้ำ เป็นต้น การจะบำบัดหรือแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียเหล่านี้ จึงมีวิธีที่เหมาะสมแตกต่างกันตามลักษณะของน้ำและน้ำมันที่ผสมรวมกันอยู่ ซึ่งหากแบ่งตามลักษณะทางกายภาพจะสามารถแบ่งออกได้ตามหลักเกณฑ์หลักๆ 3 แบบดังนี้

##### 2.1.1 การจำแนกตามลักษณะของสารต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาของผสมของน้ำกับน้ำมัน จะพบว่าของผสมนี้อาจอยู่ในรูปของอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งหมายถึงของผสมของของเหลวสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible mixture) โดยของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่งของเหลวที่มีลักษณะแขวนลอย เรียกว่า สารกระจาย (Dispersed หรือ Internal phase) และของเหลวอีกชนิด เรียกว่า สารต่อเนื่อง (Continuous หรือ External phase) เช่น อิมัลชันที่มีอนุภาคน้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำ น้ำมันจะเป็นสารกระจายส่วนน้ำจะเป็นสารต่อเนื่อง เมื่อจำแนกตามลักษณะของสารต่อเนื่องจะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

(1) อิมัลชันตรง (Direct หรือ Oil in water emulsion, O/W) คือ อิมัลชันที่มีน้ำเป็นสารต่อเนื่องและน้ำมันเป็นสารกระจาย

(2) อิมัลชันผกผัน (Inverse หรือ Water in oil emulsion, W/O) คือ อิมัลชันที่มีน้ำมันเป็นสารต่อเนื่องและน้ำเป็นสารกระจาย

##### 2.1.2 การจำแนกตามความคงตัวของอิมัลชัน

สามารถแบ่งน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามหลักเกณฑ์นี้ได้เป็น 2 ชนิด คือ

(1) อิมัลชันที่ไม่คงตัว (Non-stabilized emulsion)

น้ำเสียชนิดนี้จะมีเพียงน้ำและน้ำมันเท่านั้น ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จึงมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่อนุภาคอิมัลชันสามารถรวมตัวกันเองได้เมื่อมาสัมผัสกัน และมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ความคงตัวของอิมัลชันชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of

dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในน้ำเสีย ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กก็จะใช้เวลานานในการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและรวมตัวกับอนุภาคอื่น ซึ่งทำให้อนุภาคนั้นยังคงลอยและกระจายอยู่ในน้ำ ยิ่งลอยอยู่เป็นเวลานานมากเท่าใดก็จะถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมากเท่านั้น โดยขนาดของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการผสมหรือกระจายสารกระจาย เช่น ความปั่นป่วนของการปั่นกววนหรือขนาดของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ เป็นต้น

## (2) อิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion)

น้ำเสียชนิดนี้จะประกอบไปด้วยน้ำ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิว (Surface-active agent) โดยสารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมันมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เป็นสารกระจายมีขนาดเล็ก นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะทำให้เม็ดอนุภาคน้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน (ซึ่งอาจเป็นประจุบวกหรือลบก็ได้) เกิดแรงผลัทางขั้วไฟฟ้าขึ้น ทำให้อนุภาคไม่เกิดการชนและรวมตัวกับอนุภาคอื่นได้ เนื่องจากอนุภาคอิมัลชันชนิดนี้มีขนาดเล็กมากและไม่สามารถรวมตัวกันได้จึงทำให้มีความคงตัวสูงและอยู่ในสภาพลอยกระจายอยู่ในสารต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ไม่สามารถแยกออกจากสารต่อเนื่องได้เองตามธรรมชาติ

### 2.1.3 การจำแนกตามระดับของการกระจายหรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน

การจำแนกตามหลักเกณฑ์นี้อาศัยการแบ่งตามความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำและน้ำมัน และขนาดของอนุภาคน้ำมัน ตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) สามารถแบ่งน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามหลักเกณฑ์นี้ได้เป็น 5 ชนิด คือ

#### (1) ฟิล์มหรือชั้นของน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ น้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจึงมักพบว่ามียาหรือฟิล์มบางลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถสร้างฟิล์มปิดผิวน้ำได้เป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากฟิล์มเหล่านี้มักมีการเรียงตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monolayer) น้ำเสียลักษณะนี้เป็นชนิดที่สามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ง่ายกว่าชนิดอื่นๆ

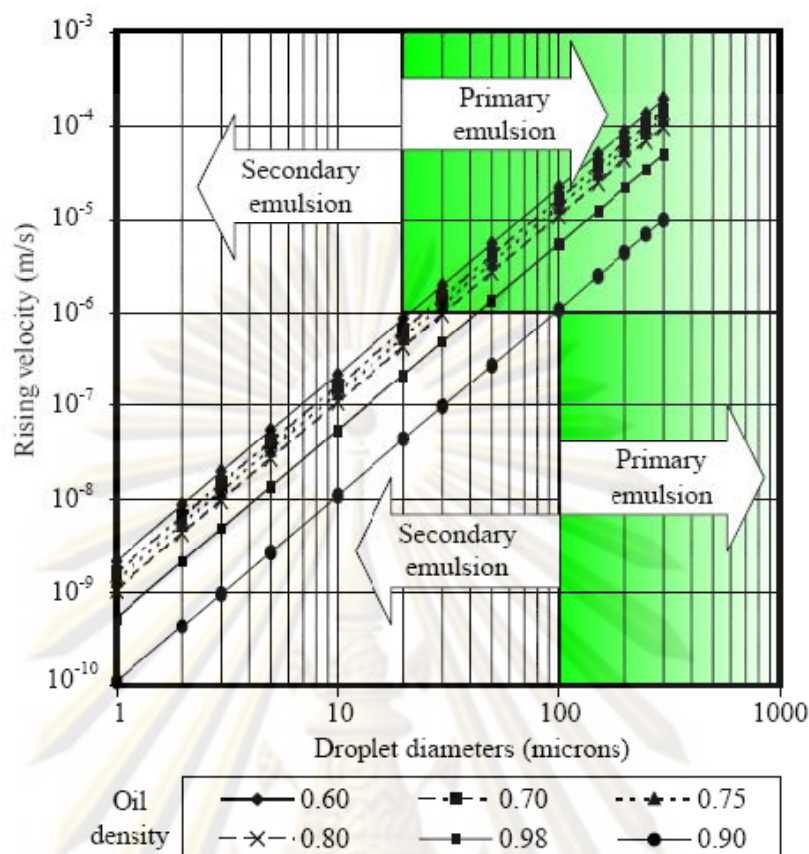
#### (2) อิมัลชันขั้นแรก (Primary emulsion)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดนี้จะมีอนุภาคอิมัลชันหรืออนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 ไมครอน

#### (3) อิมัลชันขั้นที่สอง (Secondary emulsion)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชนิดนี้จะมีอนุภาคอิมัลชันหรืออนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน

การจำแนกชนิดของอิมัลชันขั้นแรกและขั้นที่สองสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคอิมัลชันและความเร็วในการลอยตัวของอิมัลชันชั้นแรกและอิมัลชันชั้นที่สอง (Wanichkul, 2000)

#### (4) แมคโครอิมัลชัน (Macroemulsion)

น้ำเสียน้ำปนเปื้อนน้ำมันชนิดนี้มักจะมีสารลดแรงตึงผิวอยู่ในน้ำเสียด้วย โดยอิมัลชันชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันระหว่าง 0.06 - 1 ไมครอน จึงทำให้มองเห็นเป็นลักษณะขาวขุ่นคล้ายนม (Milky appearance)

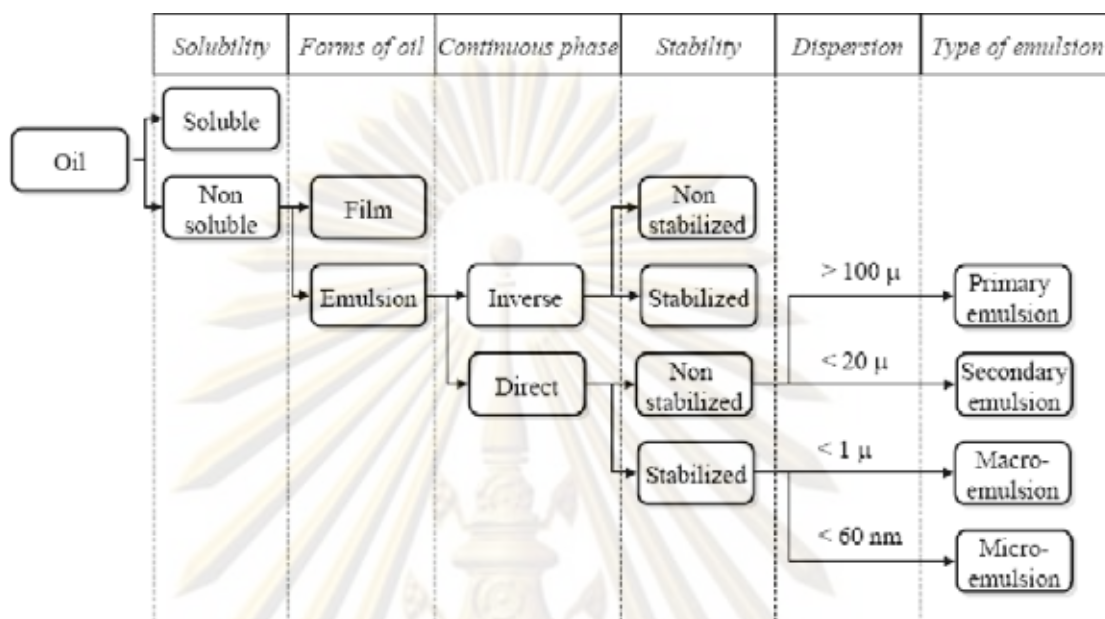
#### (5) ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

น้ำเสียน้ำปนเปื้อนน้ำมันชนิดนี้จะมีสารลดแรงตึงผิวอยู่ในน้ำเสียในปริมาณมาก ทำให้อิมัลชันชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันระหว่าง 10 - 60 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมากทำให้อิมัลชันชนิดนี้มีลักษณะโปร่งใสหรือโปร่งแสง

จากหลักเกณฑ์การจำแนกน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนดังที่กล่าวมาทั้ง 3 แบบจะพบว่า ชนิดของน้ำเสียในการแบ่งบางหลักเกณฑ์จะมีลักษณะที่เหมือนกับชนิดของน้ำเสียเมื่อแบ่งด้วยอีก



หลักเกณฑ์หนึ่ง ดังนั้นเพื่อลดความสับสนเราสามารถสรุปหลักเกณฑ์ในการแบ่งชนิดของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 3 แบบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 การจำแนกลักษณะน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามลักษณะทางกายภาพ (Rachu, 2005)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกลักษณะอิมัลชันของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน (Rachu, 2005)

สารต่อเนื่อง	ความคงตัว	ระดับของการกระจาย			
		อิมัลชัน ชั้นแรก	อิมัลชัน ชั้นที่สอง	แมคโคร อิมัลชัน	ไมโคร อิมัลชัน
อิมัลชันตรง (O/W)	อิมัลชันที่ ไม่คงตัว	เกิดขึ้นได้	เกิดขึ้นได้	เกิดขึ้นได้	ไม่เกิดขึ้น
	อิมัลชันที่มี ความคงตัว	เกิดขึ้นได้	เกิดขึ้นได้	เกิดขึ้นได้	เกิดขึ้นได้

จะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคน้ำมันเป็นหลักเกณฑ์ที่สำคัญในการแบ่งลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน แต่นอกจากนี้ความคงตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก็เป็นหลักเกณฑ์ที่สำคัญเช่นกัน ซึ่งความคงตัวนี้ไม่ได้ขึ้นกับขนาดของอนุภาคน้ำมันแต่เพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากส่วนประกอบอื่นที่อยู่ในน้ำเสียนอกจากน้ำและน้ำมัน คือ สารลดแรงตึงผิวด้วย

## 2.2 ความรู้พื้นฐานทางเคมีกายภาพที่นำมาประยุกต์ในการแยกอิมัลชัน

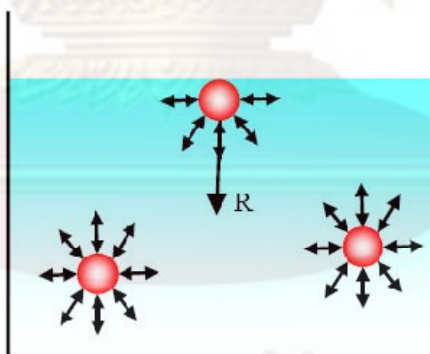
### 2.2.1 แรงที่กระทำต่อโมเลกุลภายในของเหลว

เมื่อพิจารณาโมเลกุลที่อยู่ภายในของเหลวจะพบว่ามีความดึงดูดกระทำต่อโมเลกุลนั้นโดยโมเลกุลข้างเคียงรอบด้านเท่าๆกันทุกทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นแรงดึงดูดที่สำคัญได้ 2 ประเภท คือ

(1) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลซึ่งมีอยู่ทั่วไปในวัตถุต่างๆทุกสถานะ แรงนี้แปรผกผันกับกำลังที่เจ็ดของระยะห่างระหว่างโมเลกุล ดังนั้นจึงมีค่าน้อยมาก

(2) แรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงระหว่างขั้ว (Electrostatic หรือ Polar force) เป็นแรงดึงดูดที่มีอยู่เฉพาะในโมเลกุลที่อะตอมมีความสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนแตกต่างกัน จึงเกิดลักษณะขั้วไฟฟ้าภายในโมเลกุลขึ้น แรงนี้มีขนาดแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างโมเลกุล จึงมักมีขนาดมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์

ความแตกต่างระหว่างแรงทั้ง 2 แรงนี้ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์มีอยู่ทั่วไปไม่ว่าอยู่ในของเหลวชนิดใด ส่วนแรงไฟฟ้าสถิตจะมีเฉพาะในโมเลกุลของของเหลวชนิดมีขั้ว เช่น น้ำ ส่วนในของเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอนมักจะไม่คำนึงถึงแรงนี้



รูปที่ 2.3 แรงที่กระทำต่อโมเลกุลภายในและที่ผิวของของเหลว (Rachu, 2005)

### 2.2.2 แรงที่กระทำต่อโมเลกุลที่ผิวของของเหลว

เมื่อพิจารณาโมเลกุลที่อยู่ผิวของของเหลว จะพบว่ามีความดึงดูดระหว่างโมเลกุลจากโมเลกุลของของเหลวที่อยู่ด้านข้างและด้านล่างเท่านั้น จะไม่มีแรงดึงดูดจากด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้แรงที่กระทำกับโมเลกุลที่ผิวนี้ไม่สมดุลกัน ส่งผลให้แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นพยายามดึง

โมเลกุลที่ผิวเข้าสู่ภายในของของเหลว เพื่อลดพื้นที่ผิวให้เหลือน้อยที่สุด เป็นเหตุผลที่ทำให้น้ำมันหรืออากาศที่อยู่ในน้ำมีลักษณะเป็นหยดหรือฟองรูปทรงกลมอยู่เสมอ แรงดึงนี้เรียกว่า แรงตึงผิว

แรงตึงผิว (Surface tension) สำหรับพื้นผิวระหว่างของเหลวกับอากาศ หรือแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) สำหรับพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลวหรือของเหลวกับของแข็ง หมายถึง งานที่จะต้องใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเป็นจำนวน 1 หน่วย มีหน่วยเป็นงานต่อหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตัน-ม./ตร.ม. หรือแรงต่อหน่วยความยาว เช่น นิวตัน/ม. หรือไดน์/ซม. แรงตึงผิวและแรงตึงระหว่างผิวของของเหลวต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกัน ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 และสามารถเขียนแรงตึงผิวของของเหลวและอากาศ ( $\gamma$ ) และแรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่อง ( $\gamma_{dc}$ ) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\gamma = \frac{W_{eff}}{A} \quad (2.1 ก)$$

$$\gamma_{dc} = \frac{W_{eff}}{A_{dc}} \quad (2.1 ข)$$

โดยที่  $W_{eff}$  คือ งานประสิทธิผล (Effective work)

$A, A_{dc}$  คือ พื้นที่ผิวหรือพื้นที่ระหว่างผิวที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 ค่าแรงตึงผิวและแรงตึงระหว่างผิว (ไดน์/เซนติเมตร) ของของเหลวบางชนิดที่ 20 องศาเซลเซียส (Rachu, 2005)

ชื่อ	แรงตึงผิว	แรงตึงระหว่างผิว (น้ำ)	ชื่อ	แรงตึงผิว	แรงตึงระหว่างผิว (น้ำ)
Water	72.8		Ethanol	22.3	
Benzene	28.9	35	n-Octanol	27.5	8.5
Acetic acid	27.6		n-Hexane	18.4	51.1
Acetone	23.7		n-Octane	21.8	5038
CCl <sub>4</sub>	26.8	45.1	Mercury	485	375
Polar organic compounds	22 - 50		Aqueous detergent solutions	24 - 40	
Hydrocarbon	18 - 30		Fluorocarbon	8 - 15	

### 2.2.3 งานโคฮีชันและงานแอดฮีชัน

งานโคฮีชัน (Cohesion work) คือ งานที่ต้องใช้ในการดูดติดโมเลกุลของสารชนิดเดียวกัน ทำให้โมเลกุลนั้นเกาะอยู่ด้วยกัน สำหรับงานโคฮีชันของของเหลวมีค่าเท่ากับสองเท่าของแรงตึงผิวของของเหลว เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W_c = 2\gamma \quad (2.2 ก)$$

โดยที่  $W_c$  คือ งานโคฮีชัน

$\gamma$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว

ในการแยกอิมัลชันจะพบว่ามีการกระจายอยู่ในสารต่อเนื่อง ดังนั้นงานโคฮีชันของสารกระจายจะเท่ากับสองเท่าของแรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่อง ดังสมการ

$$W_{c(d)c} = 2\gamma_{dc} \quad (2.2 ข)$$

โดยที่  $W_{c(d)c}$  คือ งานโคฮีชันของสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง

$\gamma_{dc}$  คือ แรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่อง

งานแอดฮีชัน (Adhesion work) คือ งานที่ต้องใช้ในการดูดติดโมเลกุลของสารต่างชนิด ซึ่งสมการของดูเปร (Dupre's equation) ได้ให้ความสัมพันธ์ของงานแอดฮีชันกับแรงตึงผิวของสาร ดังสมการ

$$W_{adh(ab)} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (2.3 ก)$$

โดยที่  $W_{adh(ab)}$  คือ งานแอดฮีชันของสาร a และ b

$\gamma_a$  คือ แรงตึงผิวของสาร a

$\gamma_b$  คือ แรงตึงผิวของสาร b

$\gamma_{ab}$  คือ แรงตึงระหว่างผิวของสาร a กับ b

สำหรับการแยกอิมัลชันด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ งานแอดฮีชันระหว่างตัวกลางกับสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง สามารถแสดงความสัมพันธ์ของงานแอดฮีชันกับแรงตึงระหว่างผิวได้ดังสมการ

$$W_{adh(sd)c} = \gamma_{sc} + \gamma_{dc} - \gamma_{sd} \quad (2.3 ข)$$

โดยที่  $W_{adh(sd)c}$  คือ งานแอดฮีชันของตัวกลางกับสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง

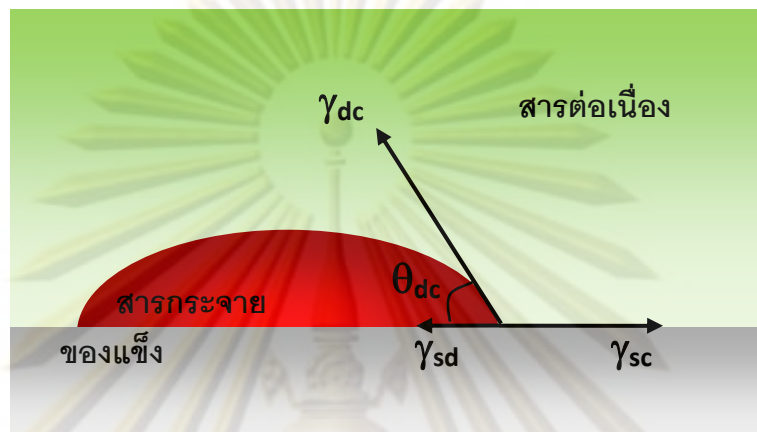
$\gamma_{sc}$  คือ แรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับสารต่อเนื่อง

$\gamma_{dc}$  คือ แรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่อง

$\gamma_{sd}$  คือ แรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับสารกระจาย

### 2.2.4 มุมสัมผัส สมการของยัง และความสามารถเปียกได้

มุมสัมผัส (Contact angle,  $\theta_{dc}$ ) คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสผิวของหยดสารกระจายกับผิวของของแข็ง เมื่อหยดของสารกระจายในสารต่อเนื่องอยู่บนพื้นผิวของของแข็งที่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสมดุลของแรงบนพื้นผิวต่างๆที่เกิดขึ้นแสดงได้ด้วยสมการของยัง



รูปที่ 2.4 แรงที่กระทำให้เกิดสมดุลของหยดสารกระจายที่ติดกับของแข็งในสารต่อเนื่อง

สมการของยัง (Young's equation) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นระหว่างสารกระจายบนผิวของของแข็ง โดยมีสารต่อเนื่องล้อมรอบอยู่ สมดุลของแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของผิวสัมผัสต่างๆและมุมสัมผัสนี้ แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.4

$$\gamma_{sc} = \gamma_{sd} + \gamma_{dc} \cos \theta_{dc} \quad (2.4)$$

จากสมการของดูเปร์ (สมการที่ 2.3) หากแทนค่าของ  $\gamma_{sc}$  ด้วยสมการของยัง เราจะได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงด้วยสมการที่ 2.5 หรือสมการของยังและดูเปร์ (Young-Dupre equation)

$$W_{adh(sd)c} = \gamma_{dc} (1 + \cos \theta_{dc}) \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นถึงการจับยึดของของแข็งและสารกระจายที่จมอยู่ในสารต่อเนื่อง เช่น การยึดติดของหยดน้ำมันในน้ำบนพื้นผิวของตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ โดยการจับยึดจะมีค่าสูงเมื่อ

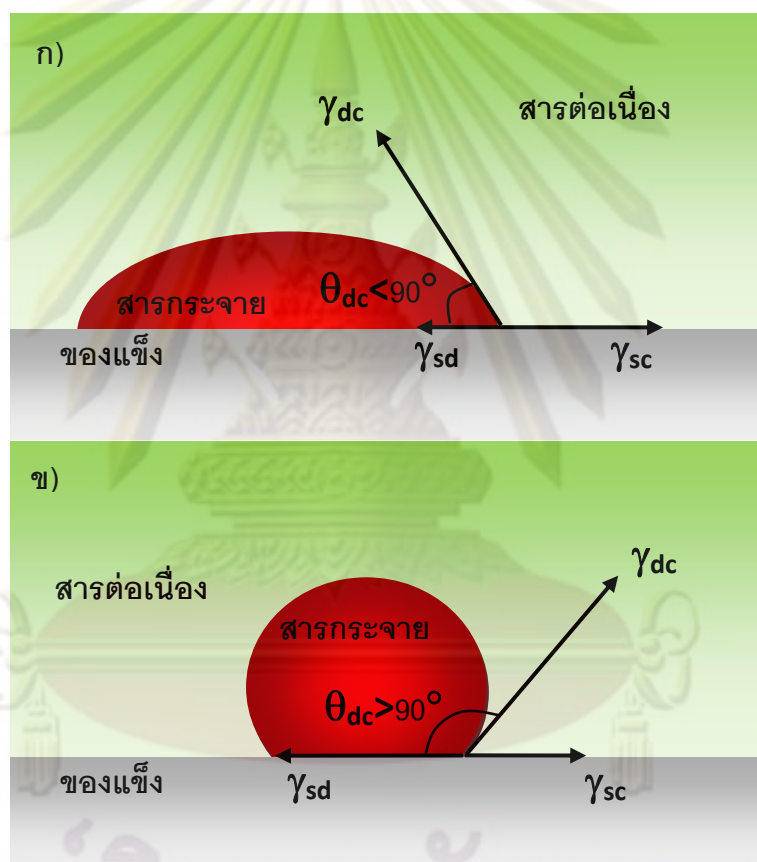
- (1) แรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับสารต่อเนื่อง ( $\gamma_{dc}$ ) มีค่าสูง
- (2) มุมสัมผัส ( $\theta_{dc}$ ) มีค่าต่ำ

ความสามารถเปียกได้ (Wettability) เป็นความสามารถของของไหลชนิดหนึ่งที่จะซึมผ่านหรือเคลือบผิวของของแข็งในขณะที่อยู่ในของไหลอีกชนิด โดยของไหลทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้ากัน

ไม่ได้ สำหรับอิมัลชันที่ประกอบไปด้วยสารกระจายและสารต่อเนื่องสามารถแบ่งความสามารถเปียกได้ตามขนาดของมุมสัมผัสที่ทำต่อพื้นผิวนั้นออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) ถ้ามุมสัมผัสมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $90^\circ$  แสดงว่าของแข็งชนิดนั้นสามารถเปียกได้ด้วยสารกระจาย และถ้าสารกระจายนั้นคือน้ำมัน แสดงว่าพื้นผิวนั้นมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก)

(2) ถ้ามุมสัมผัสมีขนาดมากกว่า  $90^\circ$  แสดงว่าของแข็งนั้นไม่สามารถเปียกได้ด้วยสารกระจาย ถ้าสารกระจายนั้นคือน้ำมัน แสดงว่าพื้นผิวนั้นมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และหยดของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็งจะมีลักษณะเกือบเป็นทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข)



รูปที่ 2.5 มุมสัมผัสของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็งในสารกระจาย เมื่อ ก) พื้นผิวเปียกได้ด้วยสารกระจาย ข) พื้นผิวไม่สามารถเปียกได้ด้วยสารกระจาย

จากสมการของยังและดูเปร (สมการที่ 2.5) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าพื้นผิวของสารกระจายขนานไปกับพื้นผิวของของแข็งหรือแผ่กระจายบนพื้นผิวนั้นเอง จะสามารถคำนวณงานแอดฮีชันได้ดังนี้

$$W_{adh(sd)c} = \gamma_{dc} (1 + \cos\theta_{dc}) = 2\gamma_{dc} \quad (2.6)$$

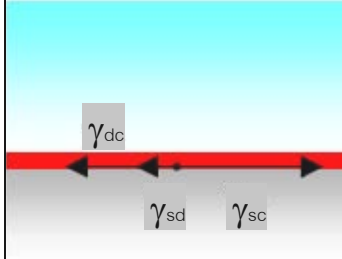
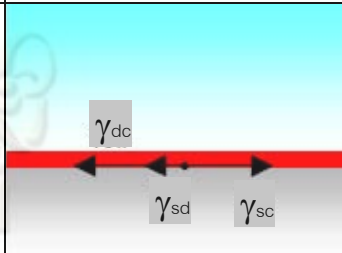
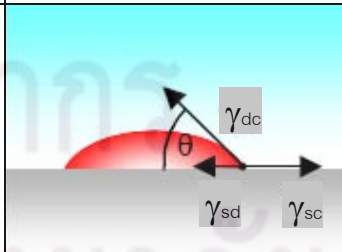
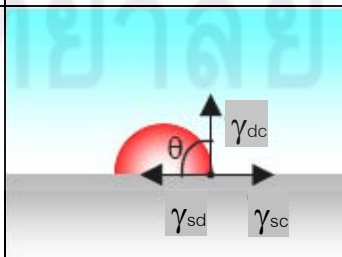
สมการที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่างานแอดฮีชันมีค่าเท่ากับงานโคฮีชัน Harkins (อ้างถึงใน Aurelle, 1985) ได้นิยามว่าความแตกต่างระหว่างงานโคฮีชันและงานแอดฮีชัน คือ สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของสารกระจายบนของแข็ง (Spreading coefficient,  $\phi$ ) ดังสมการ

$$\phi = W_{adh(sd)c} - W_{c(d)c} \quad (2.7)$$

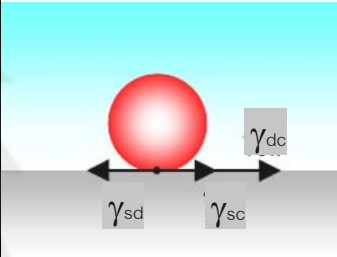
สำหรับค่าของ  $\phi$  ถ้ามีค่าเป็นศูนย์หรือมากกว่าศูนย์ จะเกิดการแผ่กระจายของสารกระจายหรือเปียกบนพื้นผิวของของแข็ง แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะไม่เกิดการแผ่กระจายบนพื้นผิวนั้น

เราสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส งานแอดฮีชัน แรงตึงระหว่างผิว และสัมประสิทธิ์การแผ่กระจายได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส งานแอดฮีชัน แรงตึงระหว่างผิว และสัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็ง (Aurelle, 1985)

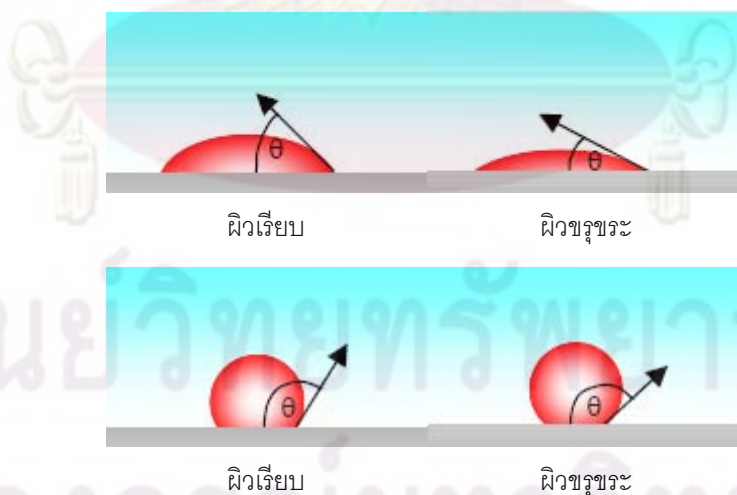
มุมสัมผัส, $\theta_{dc}$	$W_{adh(sd)c}$	$\phi$	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงระหว่างผิว	ลักษณะของสารกระจาย
$\theta_{dc} = 0^\circ$	$W > 2\gamma_{dc}$	$> 0$	$\gamma_{sc} > \gamma_{sd} + \gamma_{dc}$	
$\theta_{dc} = 0^\circ$	$W = 2\gamma_{dc}$	$= 0$	$\gamma_{sc} = \gamma_{sd} + \gamma_{dc}$	
$0^\circ < \theta_{dc} < 90^\circ$	$\gamma_{dc} < W < 2\gamma_{dc}$	$< 0$	$\gamma_{sc} > \gamma_{sd}$	
$\theta_{dc} = 90^\circ$	$W = \gamma_{dc}$	$< 0$	$\gamma_{sc} = \gamma_{sd}$	

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส งานแอดฮีชัน แรงตึงระหว่างผิว และสัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของสารกระจายบนพื้นผิวของแข็ง (Aurelle, 1985) (ต่อ)

มุมสัมผัส, $\theta_{dc}$	$W_{adh(sd)c}$	$\phi$	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงระหว่างผิว	ลักษณะของสารกระจาย
$90^\circ < \theta_{dc} < 180^\circ$	$0 < W < \gamma_{dc}$	$< 0$	$\gamma_{sc} < \gamma_{sd}$	
$\theta_{dc} = 180^\circ$	$W = 0$	$< 0$	$\gamma_{sd} = \gamma_{sc} + \gamma_{dc}$	

2.2.5 ผลของความขรุขระของพื้นผิวต่อความสามารถเปียกได้

ความขรุขระ (Roughness) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวของแข็ง หากพื้นผิวนั้นมีความขรุขระมากขึ้นจะทำให้ความสามารถเปียกได้หรือไม่สามารถเปียกได้ของพื้นผิวมากขึ้นเมื่อเทียบกับพื้นผิวที่ราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลของความขรุขระของพื้นผิวต่อมุมสัมผัส (Rachu, 2005)



สมการของเวนเซล (Wenzel's equation) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของพื้นผิวที่ราบเรียบ ( $\theta_{dc}$ ) กับมุมสัมผัสของพื้นผิวที่ขรุขระ ( $\theta'_{dc}$ ) ดังนี้

$$\cos(\theta'_{dc}) = r \cos(\theta_{dc}) \quad (2.8)$$

โดยที่  $r$  คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Roughness coefficient)

สัมประสิทธิ์ความขรุขระเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจริง (Actual surface area) ต่อพื้นที่ผิวทางเรขาคณิต (Geometrical surface area) ดังนั้นจึงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ

## 2.3 เทคนิคต่างๆในการแยกอิมัลชัน

ในการแยกชั้นของอนุภาคอิมัลชันซึ่งเป็นสารกระจายที่อยู่ในสารต่อเนื่อง เมื่อปล่อยให้อนุภาคอิมัลชันลอยตัวขึ้นไปจะเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและแยกชั้นออกจากสารต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) ดังสมการ

$$w = \frac{\Delta\rho g d_E^2}{18\mu_c} \quad (2.9)$$

โดยที่  $w$  คือ ความเร็วในการลอยตัวหรือตกตะกอนของสารกระจาย

$\Delta\rho$  คือ ผลต่างความหนาแน่นของสารกระจายและสารต่อเนื่อง

$g$  คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

$d_E$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารกระจาย

$\mu_c$  คือ ค่าความหนืดของสารต่อเนื่อง

วิธีการแยกชั้นของสารกระจายและสารต่อเนื่องออกจากกันตามกฎของสโตกส์ที่กระทำได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับ คือ การใช้วิธีปล่อยให้ลอยตัวหรือทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation)

### 2.3.1 การปล่อยให้ลอยตัวหรือทิ้งให้ตกตะกอน

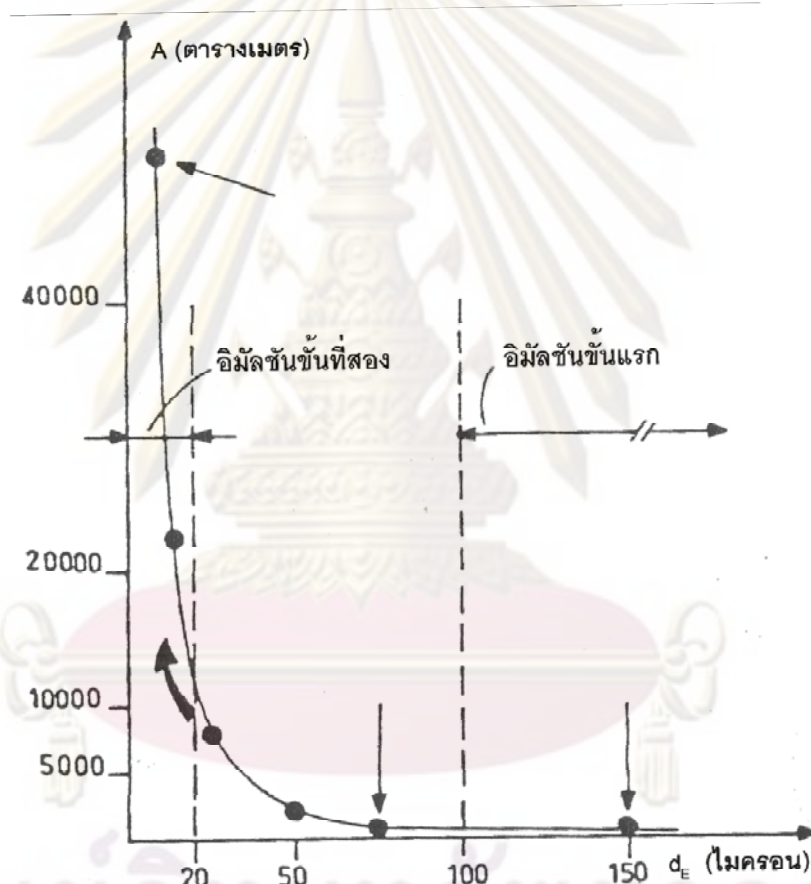
วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการแยกอนุภาคอิมัลชันออกจากสารต่อเนื่องโดยอาศัยแรงลอยตัวของอนุภาคอิมัลชันและแรงดึงดูดของโลก เมื่อพิจารณาให้การลอยของอนุภาคอิมัลชันเป็นการลอยแบบอุดมคติและเป็นการลอยแบบโดดในถัง (Discrete floating) คือ อนุภาคอิมัลชันแต่ละอนุภาคจะไม่จับกันเป็นกลุ่มในระหว่างการลอยขึ้น และอนุภาคที่ลอยขึ้นถึงผิวหน้าของถัง ถือว่าถูกกำจัดออกไป จะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของถังได้ตามสมการ

$$A = \frac{Q}{w} \quad (2.10)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง

Q คือ อัตราการไหล

เมื่อคำนวณหาขนาดของถังในการแยกชั้นของอนุภาคที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าถัง 1,000 ลบ.ม./ชม. มีค่า  $\Delta\rho$  เท่ากับ 0.1 ก./ลบ.ชม. สารต่อเนื่องเป็นน้ำมีค่าความหนืด 1 เซนติพอยส์ จะได้ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดของถังที่ต้องการและขนาดของอนุภาคอิมัลชัน ( $d_e$ ) ที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัดของถังปล่อยให้ลอย (A) ที่ต้องการ และขนาดของอนุภาคอิมัลชัน ( $d_e$ ) (Aurelle, 1985)

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดในการใช้ถังปล่อยให้ลอยธรรมดาแยกอิมัลชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแยกอนุภาคอิมัลชันชั้นที่สองที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน จะต้องใช้พื้นที่หรือเวลาในการแยกที่สูงมาก ดังนั้นถังปล่อยให้ลอยธรรมดาจึงเหมาะกับการแยกเฉพาะ

อนุภาคอิมัลชันชั้นแรกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน สำหรับอนุภาคอิมัลชันชั้นที่สองสามารถแยกออกได้ด้วยวิธีการเร่งให้ลอยตัวหรือตกตะกอน

### 2.3.2 การเร่งให้ลอยตัวหรือตกตะกอน

วิธีนี้เป็นวิธีในการแยกอนุภาคอิมัลชันให้เร็วขึ้น โดยเฉพาะการทำเพื่อลดพื้นที่ที่ต้องใช้ในการแยกอนุภาคอิมัลชันชั้นที่สองให้มีค่าน้อยลง สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของสารกระจาย (W) โดยพยายามเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆในกฎของสโตกส์ตามสมการที่ 2.9 ซึ่งสรุปได้ 4 กรณีดังนี้

(1) การเพิ่มอุณหภูมิของสารต่อเนื่อง เพื่อลดค่าความหนืด ( $\mu_c$ )

(2) การเพิ่มค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของสารกระจายและสารต่อเนื่อง ( $\Delta\rho$ ) เช่น การใช้วิธีการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved air floatation, DAF)

(3) การเพิ่มอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) เช่น การแยกด้วยไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

(4) การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอิมัลชัน ( $d_E$ ) ซึ่งจะเป็นการรวมเอาอนุภาคสารกระจายขนาดเล็กหลายอนุภาคให้รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถแยกออกด้วยการลอยตัวได้ง่าย ซึ่งการเพิ่มขนาดอนุภาคนี้จะสามารถเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคได้มาก เพราะ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค วิธีนี้เรียกว่า กระบวนการโคเอเลสเซนซ์ (Coalescence)

## 2.4 การแยกอิมัลชันด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์

จากกฎของสโตกส์ ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอิมัลชันเป็นตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วในการลอยตัวที่สุด เนื่องจากตัวแปรถูกยกกำลังสอง ดังนั้นหากเราสามารถเพิ่มขนาดของอนุภาคขึ้น 2 เท่า ความเร็วในการลอยตัวจะเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้อนุภาคอิมัลชันรวมตัวกับอนุภาคอิมัลชันอื่นๆหรือการโคเอเลสเซนซ์ โดยเมื่ออิมัลชันผ่านเข้าสู่โคเอเลสเซอร์ (Coalescer) ที่ภายในบรรจุชั้นตัวกลางไว้ อนุภาคอิมัลชันจะเกิดการปะทะกับชั้นตัวกลาง ทำให้มีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันกับอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กอื่นๆในขณะที่ผ่านตัวกลางออกไป อนุภาคเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถแยกออกจากสารต่อเนื่องได้ง่ายโดยถังลอยตัว (Decanter) ขนาดเล็ก

จะเห็นได้ว่าการทำงานของโคเอเลสเซอร์มีหลักการหลายอย่างที่คล้ายคลึงกับการกรอง คือ เป็นการแยกสารกระจายออกจากสารต่อเนื่อง โดยมีของแข็ง (Solids) เป็นสารกระจายสำหรับ

การกรอง ส่วนในโคเอเลสเซอร์นั้นสารกระจายเป็นส่วนที่อยู่ในรูปของเม็ดขนาดเล็กหรืออิมัลชัน การทำงานของทั้งสองกรณีจะเป็นการสกัดกันสารกระจายด้วยวัสดุตัวกลาง โดยในขั้นแรก จะเกิดการกรองหรือสกัดกันขึ้นที่ผิวของตัวกลางที่อยู่ด้านนอกสุด จากนั้นจึงผ่านเข้าไปยังภายในหรือชั้นในของตัวกลางซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

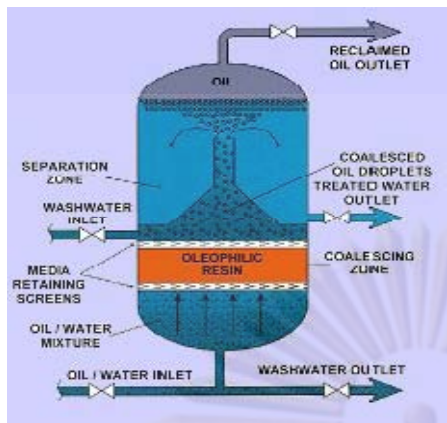
#### 2.4.1 ชนิดของโคเอเลสเซอร์

โคเอเลสเซอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลากหลายแบบ แต่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ

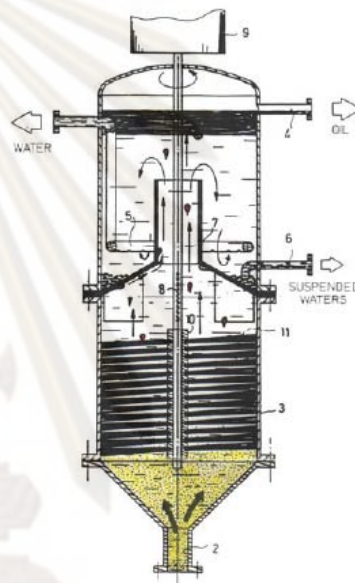
- (1) โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเม็ด (Granular bed coalescer) เช่น เรซิน เม็ดแก้ว ททราย เป็นต้น
- (2) โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเส้นใย (Fibrous bed coalescer) เช่น เส้นใยโลหะ ฝอยสแตนเลส เส้นใยปาล์ม เส้นใยพลาสติก เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร

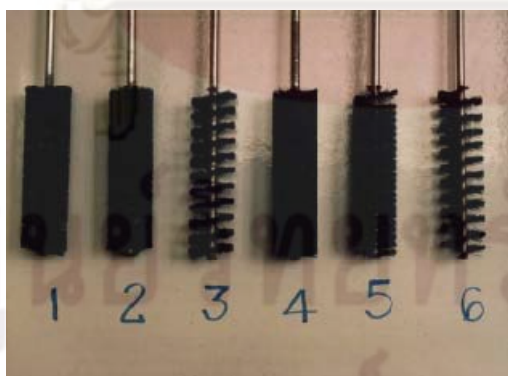
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเม็ด



ข) โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเส้นใย



ค) ตัวกลางแบบเส้นใยชนิดแปรงและชนิดฝอย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโคเอเลสเซอร์และตัวกลางแบบเส้นใยชนิดต่างๆ (Rachu, 2005)

การเลือกใช้ตัวกลางของโคเอเลสเซอร์จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด กล่าวคือกรณีที่น้ำเสียมีตะกอนแขวนลอยปนอยู่มากควรใช้ตัวกลางแบบเม็ด เพราะตัวกลางชนิดนี้สามารถทำความสะอาดตัวกลางได้โดยการล้างย้อน (Backwash) ส่วนตัวกลางแบบเส้นใยไม่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ เนื่องจากตะกอนแขวนลอยจะทำให้ชั้นตัวกลางอุดตัน ซึ่งการล้างย้อนเอาตะกอนที่อุดตันเหล่านั้นออกทำได้ยากหรือไม่สามารถทำได้ จะต้องเปลี่ยนตัวกลางใหม่ทั้งหมดเมื่อมีการอุดตัน แต่ในกรณีที่น้ำเสียมีตะกอนแขวนลอยอยู่ไม่มากนัก การนำตัวกลางแบบเส้นใยมาใช้จะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะว่าตัวกลางแบบนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ทำให้ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ในการสกัดกั้นมีค่าสูงและส่งผลให้ใช้ความสูงของตัวกลางน้อย ดังนั้นตัวกลางแบบเส้นใยจึงเหมาะสำหรับแยกอิมัลชันที่แยกได้ยากหรือมีขนาดเล็กและไม่มีตะกอนแขวนลอยผสมอยู่ นอกจากนี้ตัวกลางชนิดเส้นใยมีค่าความพรุนสูง ทำให้มีการสูญเสียแรงดันน้ำที่ต่ำกว่าต่างจากตัวกลางแบบเม็ดที่มีความพรุนต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันที่มากกว่าเมื่อทำการบำบัดด้วยอัตราภาระที่สูง

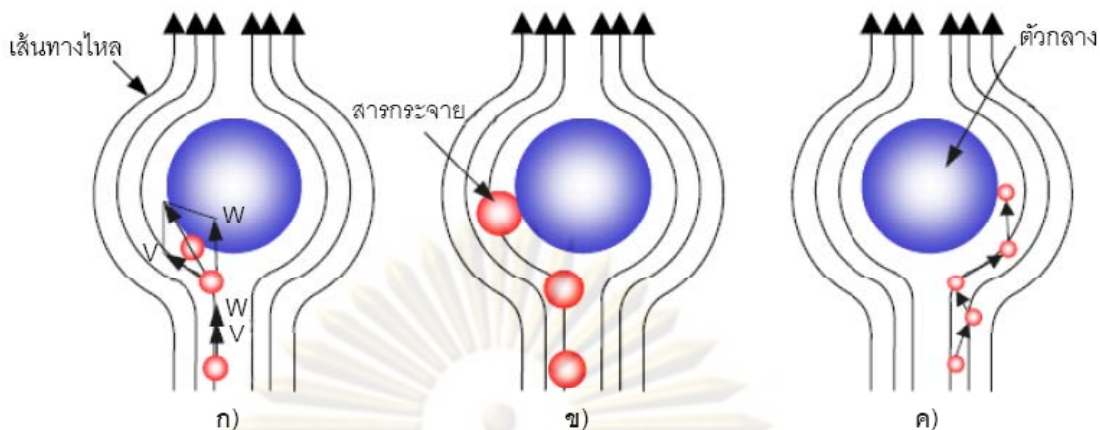
#### 2.4.2 กลไกการทำงานของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์

ภายในอิมัลชันอนุภาคสารกระจายจะเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในสารต่อเนื่อง เมื่ออิมัลชันไหลผ่านเข้าสู่โคเอเลสเซอร์ อนุภาคสารกระจายจะเกิดการปะทะกับชั้นตัวกลาง ทำให้มีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกัน โดยกลไกที่เกิดขึ้นอาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (1) การส่งถ่ายสารกระจายเข้าสู่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์
- (2) การจับยึดระหว่างอนุภาคสารกระจายกับตัวกลาง จากนั้นจะเกิดการไหลผ่านชั้นตัวกลางของโคเอเลสเซอร์
- (3) การหลุดออกจากชั้นตัวกลาง เป็นการรวมตัวของสารกระจายหลุดออกจากชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์

2.4.2.1 ขั้นที่หนึ่ง : การส่งถ่ายสารกระจายเข้าสู่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ (Transportation stage)

กลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์ในขั้นที่หนึ่งมีลักษณะเหมือนกับกลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องกรอง กล่าวคือเป็นการเคลื่อนที่ของสารกระจายเข้าหาตัวกลางให้เกิดการสัมผัสเช่นเดียวกัน จึงสามารถใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการกรองมาอธิบายการทำงานในขั้นตอนนี้ได้ โดยแบ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นออกได้เป็น 3 กรณีใหญ่ๆ คือ การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน การส่งถ่ายด้วยการปะทะโดยตรง และการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การส่งถ่ายสารกระจายเข้าสัมผัสตัวกลาง ก) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน ข) การส่งถ่ายด้วยการปะทะ ค) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (Rachu, 2005)

(1) การส่งถ่ายด้วยการตกตะกอน (Transportation by sedimentation)

การส่งถ่ายลักษณะนี้เป็นดังในรูปที่ 2.9 ก) จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคสารกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_E$  พบว่าอนุภาคสารกระจายจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำ 2 แรง คือ

(1.1) แรงที่ทำให้อนุภาคสารกระจายเคลื่อนที่มีความเร็วตามเส้นทางไหล (Streamline) ของอิมัลชัน ( $v_0$ ) เป็นแรงที่เกิดจากความเร็วของอิมัลชันที่ไหลผ่านโคเอเลสเซอร์

(1.2) แรงลอยตัวของอนุภาคสารกระจายที่ทำให้อนุภาคสารกระจายเคลื่อนที่มีความเร็วลอยขึ้นในแนวตั้ง ( $w$ ) ซึ่งคำนวณได้จากกฎของสโตกส์

สำหรับประสิทธิภาพในการตกตะกอน ( $\eta_{Sed}$ ) ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลของอิมัลชันและความเร็วในการลอยตัวของสารกระจาย โดยสามารถเขียนแทนได้ตามสมการที่ 2.11

$$\eta_{Sed} = \frac{w}{v_0} = \frac{\Delta \rho g d_E^2}{18 \mu_c v_0} \tag{2.11}$$

โดยที่  $v_0$  คือ ความเร็วในการไหลของอิมัลชันผ่านตัวกลางหรือความเร็วตามผิว

(2) การส่งถ่ายด้วยการปะทะโดยตรง (Transportation by direct interception)

การส่งถ่ายกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของสารกระจายมีค่าเท่ากับสารต่อเนื่อง นั่นคือไม่มีผลต่างของความหนาแน่นหรือมีค่าน้อยมาก ( $\Delta \rho \approx 0$ ) ทำให้ไม่มีการส่งถ่ายด้วยการตกตะกอนลงบนพื้นผิวของตัวกลาง

จากรูปที่ 2.9 ข) เมื่อพิจารณาอนุภาคสารกระจายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_E$  เคลื่อนที่ตามเส้นทางไหลของอิมัลชัน อนุภาคที่ไหลผ่านตัวกลางด้วยระยะห่างที่น้อยกว่า  $\frac{d_E}{2}$

จากตัวกลางจะเกิดการปะทะกับตัวกลางโดยตรง ซึ่งจะทำให้อนุภาคสารกระจายเกิดการสัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางขึ้น

ประสิทธิภาพในการปะทะโดยตรง ( $\eta_{\text{Int}}$ ) ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารกระจายและตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ โดยเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{\text{Int}} = \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (2.12)$$

โดยที่  $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุทรงกลมที่ใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์

(3) การส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (Transportation by diffusion)

สำหรับอนุภาคสารกระจายที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน จะเกิดการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจายขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กดังกล่าวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง จะทำให้อนุภาคสารกระจายเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางไหลของอิมัลชัน จนเข้าไปสัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ค)

ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย ( $\eta_{\text{Diff}}$ ) สามารถเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{\text{Diff}} = 0.9 \left( \frac{KT}{\mu_c d_E d_p v_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.13)$$

โดยที่  $K$  คือ ค่าคงที่โบลซ์แมน (Boltzmann's constant)

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย จะมีค่าสูงเมื่อความเร็วการไหลมีค่าต่ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางและอนุภาคสารกระจายมีขนาดเล็ก

นอกจากนี้ในความเป็นจริงอาจมีปรากฏการณ์อื่น ๆ เกิดขึ้นด้วย เช่น การส่งถ่ายที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้า การส่งถ่ายที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่ปรากฏการณ์เหล่านี้ส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อย จึงละไว้ไม่คำนึงถึง

(4) ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวม

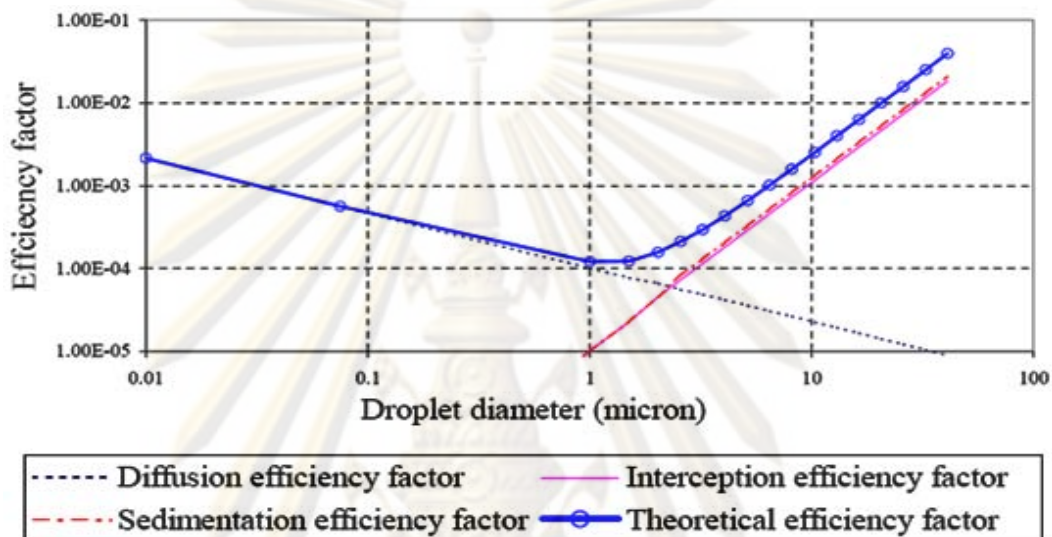
จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 กรณีในการส่งถ่ายสารกระจายเข้าสู่สัมผัสกับพื้นผิวตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทางทฤษฎี ( $\eta_T$ ) ได้ โดยการรวมประสิทธิภาพของการส่งถ่ายทั้ง 3 กรณี ดังแสดงในสมการที่ 2.14 และจาก



สมการนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการส่งถ่ายรวมทางทฤษฎีขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคสารกระจาย

$$\eta_T = \eta_{Sed} + \eta_{Int} + \eta_{Diff} \tag{2.14 ก}$$

$$\eta_T = \frac{\Delta\rho g d_E^2}{18\mu_c v_0} + \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 + 0.9 \left( \frac{KT}{\mu_c d_E d_p v_0} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{2.14 ข}$$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคสารกระจายกับประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยปรากฏการณ์แบบต่างๆ (Rachu, 2005)

จากรูปที่ 2.10 พบว่า เมื่ออนุภาคของสารกระจายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.25 ถึง 5 ไมครอน จะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทางทฤษฎีมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดในช่วงนี้จึงเป็นอนุภาคที่แยกออกได้ยากที่สุดทางทฤษฎี

นอกจากนี้ ถ้ากลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 เป็นไปได้ด้วยดีหรือไม่มีอุปสรรคเกิดขึ้น เราจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ได้จากประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมของสารกระจายเข้าสัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางในขั้นตอนที่ 1 ได้

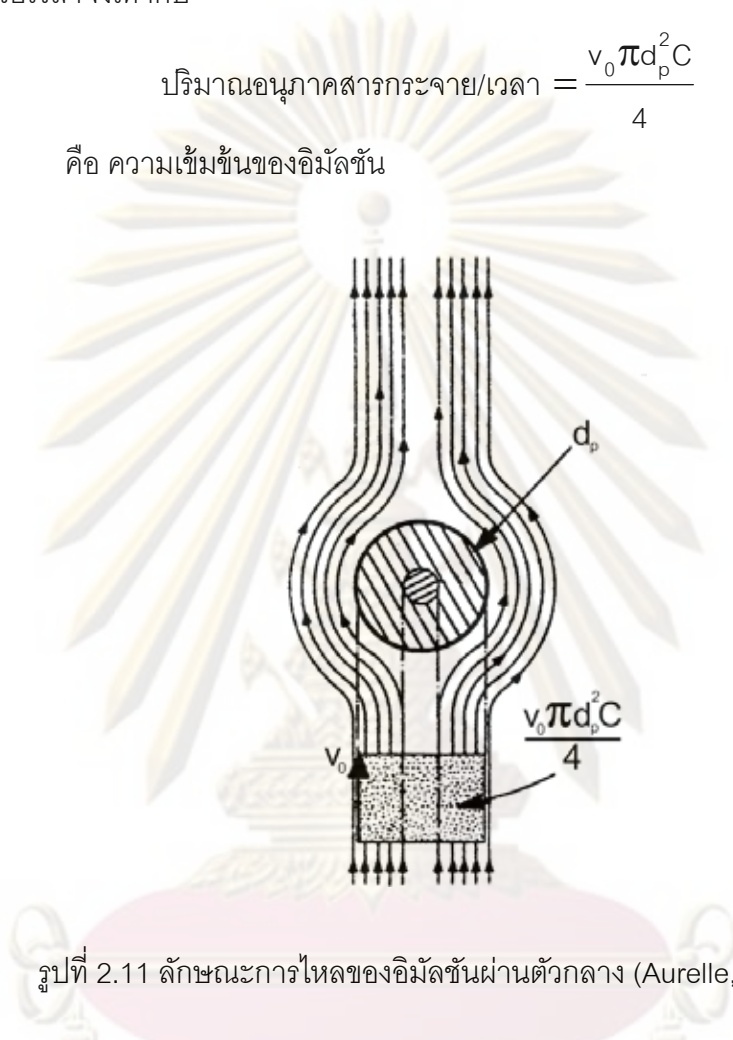
(5) ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลางรูปทรงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_p$  และชั้นของตัวกลางสูง  $H$  สามารถคำนวณได้จากการส่งถ่ายรวมของสารกระจายเข้าสัมผัสกับตัวกลางหนึ่งอนุภาคดังนี้

จากรูปที่ 2.11 พื้นที่ฉาย (Projection area) และพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางหนึ่งอนุภาคมีค่าเท่ากับ  $\frac{\pi d_p^2}{4}$  ดังนั้นปริมาณอนุภาคสารกระจายที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยเวลาจึงเท่ากับ

$$\text{ปริมาณอนุภาคสารกระจาย/เวลา} = \frac{v_0 \pi d_p^2 C}{4} \tag{2.15}$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของอิมัลชัน



รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลของอิมัลชันผ่านตัวกลาง (Aurelle, 1985)

เมื่ออิมัลชันไหลผ่านตัวกลาง จะมีอนุภาคของสารกระจายบางส่วนเท่านั้นที่ถูกจับอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง ถ้าสมมติให้ปริมาณของสารกระจายที่ถูกจับโดยหนึ่งอนุภาคเท่ากับ  $x$  จะได้ว่าประสิทธิภาพทั้งหมดของตัวกลางหนึ่งอนุภาคจะมีค่าดังนี้

$$\eta_T = \frac{x}{v_0 \pi d_p^2 C / 4} \tag{2.16 ก}$$

หรือปริมาณของสารกระจายที่ถูกดักจับโดยตัวกลางหนึ่งอนุภาคจะมีค่าเท่ากับ

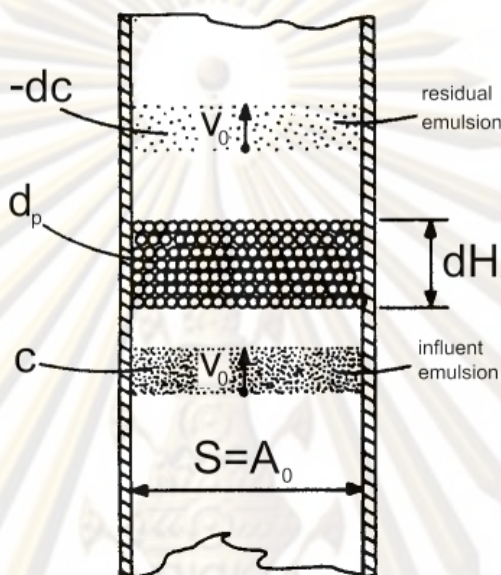
$$x = \eta_T \frac{v_0 \pi d_p^2 C}{4} \tag{2.16 ข}$$

เมื่อพิจารณาชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีความหนา  $dH$  ถ้าความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่า  $\epsilon$  และชั้นตัวกลางมีพื้นที่หน้าตัด  $A_0$  จะได้ว่าจำนวนอนุภาค

ตัวกลางในชั้นตัวกลางความหนาดังกล่าวมีจำนวนเท่ากับ  $\frac{A_0 dH(1-\epsilon)}{\pi d_p^3/6}$  ดังนั้นปริมาณของ

สารกระจายทั้งหมดที่ถูกจับโดยชั้นตัวกลางจะมีค่าเท่ากับ

$$\text{ปริมาณของสารกระจายทั้งหมดที่ถูกดักจับ} = x \frac{A_0 dH(1-\epsilon)}{\pi d_p^3/6} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของโคเอเลสเซอร์ที่มีตัวกลางขนาด  $d_p$  และสูง  $H$  (Aurelle, 1985)

ถ้า  $\alpha$  คือ ประสิทธิภาพในการเกาะติด (Collision efficiency) ของอนุภาคสารกระจายกับพื้นผิวของตัวกลาง จะได้ว่าปริมาณสารกระจายที่เกาะติดอยู่ที่ผิวของชั้นตัวกลางมีค่าดังนี้

$$\text{ปริมาณของสารกระจายที่เกาะติดชั้นตัวกลาง} = \alpha x \frac{A_0 dH(1-\epsilon)}{\pi d_p^3/6} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.16 ข และ 2.18 อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของสารกระจายที่ถูกดักจับและเกิดการเกาะติดที่พื้นผิวของชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์จะมีค่าเท่ากับปริมาณของสารกระจายที่ถูกกำจัดออกจากอิมัลชัน ดังสมการที่ 2.19

$$-v_0 A_0 dC = \frac{3}{2} \alpha \eta_T \frac{A_0 v_0 C(1-\epsilon)dH}{d_p} \quad (2.19 ก)$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{3}{2} (1-\epsilon) \alpha \eta_T \frac{dH}{d_p} \quad (2.19 ข)$$

โดยที่  $dC$  คือ ความเข้มข้นของอิมัลชันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านโคเอเลสเซอร์

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.19 ข จะได้

$$\ln \frac{C_s}{C_0} = -\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T \frac{H}{d_p} \quad (2.20)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของอิมัลชันที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์

$C_s$  คือ ความเข้มข้นของอิมัลชันที่ออกจากโคเอเลสเซอร์

ดังนั้นประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21

ดังนี้

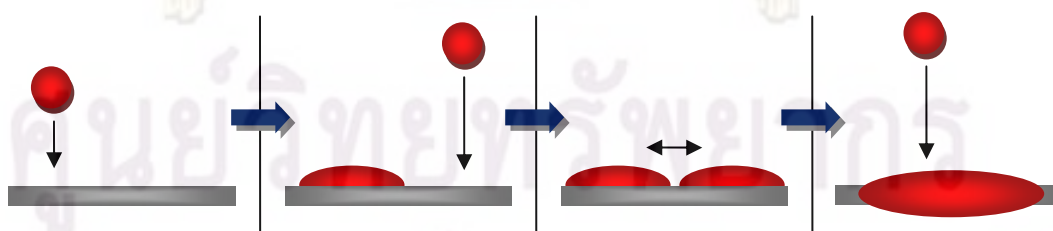
$$1 - \frac{C_s}{C_0} = 1 - e^{-\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T \frac{H}{d_p}} \quad (2.21)$$

2.4.2.2 ขั้นที่สอง : การจับยึดระหว่างอนุภาคสารกระจายกับตัวกลาง และการไหลผ่านตัวกลาง (Adhesion and coalescence stage)

ขั้นตอนนี้เกิดหลังจากสารกระจายถูกส่งถ่ายเข้าสู่ชั้นตัวกลางและเกิดการสัมผัสกับพื้นผิวที่อยู่ภายในชั้นตัวกลางแล้ว อนุภาคสารกระจายเหล่านี้จะไม่หลุดออกจากชั้นตัวกลางในทันที แต่จะค้างอยู่ในชั้นตัวกลางจนกระทั่งรวมตัวกับอนุภาคสารกระจายอื่นจนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยปรากฏการณ์ในการจับยึดอนุภาคสารกระจายของโคเอเลสเซอร์เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

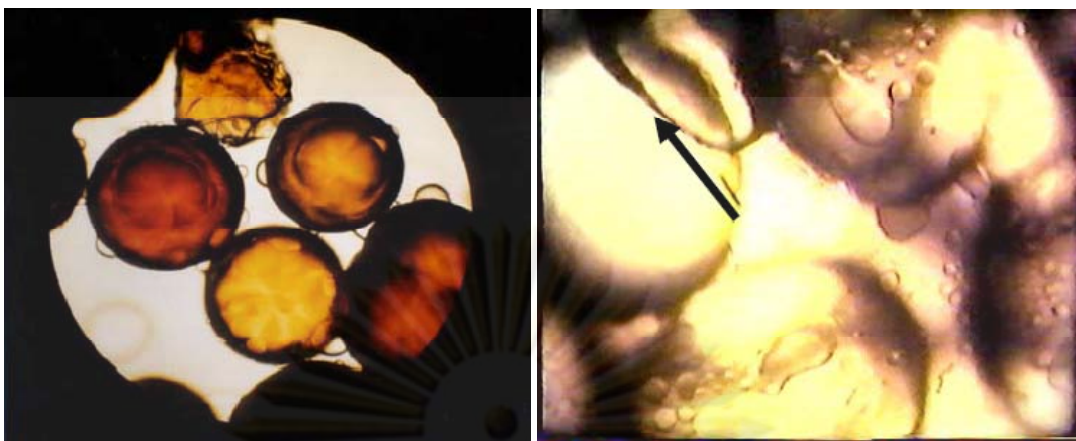
(1) ในกรณีที่ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย

อนุภาคสารกระจายจะถูกจับยึดอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางและเกิดการเปียกพื้นผิวขึ้น จากนั้นจะถูกสะสมและเกิดการรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่เปียกอยู่บนพื้นผิวเช่นกันกลายเป็นชั้นฟิล์มต่อเนื่องเคลือบอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง ถ้ามีอนุภาคอื่นมาสัมผัสกับฟิล์มก็จะเกิดการรวมตัวกัน และไหลแยกจากการไหลของสารต่อเนื่องผ่านตัวกลางไป ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของขั้นที่สองในกรณีที่ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย

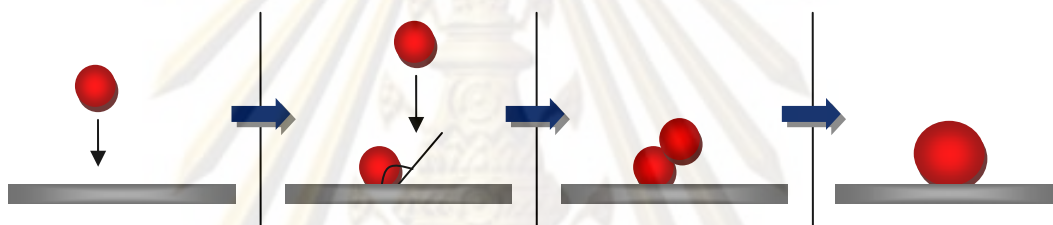
(Wanichkul, 2000)



ก)

ข)

รูปที่ 2.14 ตัวกลางเปียกได้ด้วยสารกระจาย ก) สารกระจายจับยึดกับตัวกลาง ข) หยดของสารกระจายที่รวมตัวกันเป็นฟิล์มไหลแยกจากการไหลของอิมัลชัน (Rachu, 2005)



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิดขึ้นของชั้นที่สองในกรณีในตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย (Wanichkul, 2000)



ก)

ข)

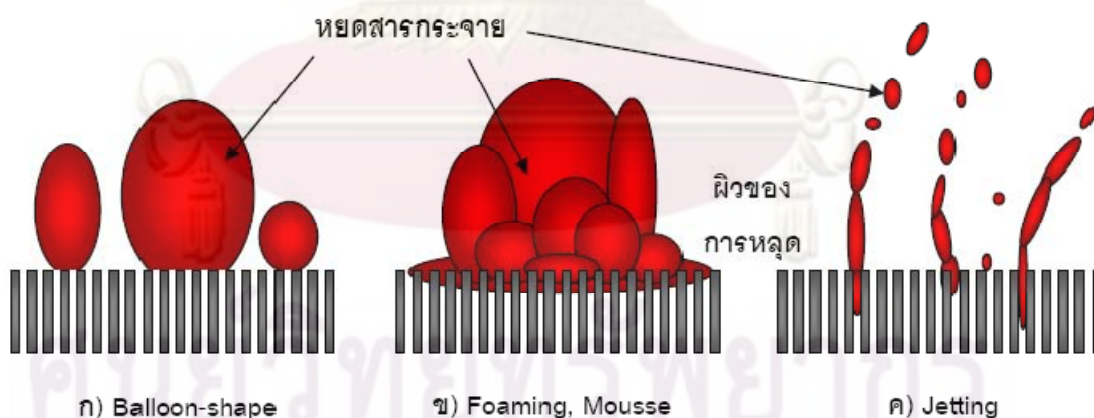
รูปที่ 2.16 ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย ก) สารกระจายถูกดักให้ค้างอยู่ระหว่างตัวกลาง (สังเกตว่ามุมสัมผัส  $> 90^\circ$ ) ข) เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคสารกระจายในช่องว่างระหว่างตัวกลาง (Rachu, 2005)

## (2) ในกรณีที่ตัวกลางเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย

อนุภาคสารกระจายจะถูกดักให้ติดค้างอยู่ภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางแต่จะไม่เกิดการเปียกพื้นผิวหรือเป็นฟิล์มขึ้น จากนั้นอนุภาคที่ถูกดักอยู่เหล่านี้จะรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่มาสัมผัสอยู่ภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางกลายเป็นหยดสารกระจายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และไหลผ่านช่องว่างระหว่างตัวกลางออกไปกับสารต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางซึ่งสามารถเปียกได้หรือไม่ได้ด้วยสารกระจายเป็นตัวแปรที่ควบคุมกลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์ในขั้นตอนนี้ หากวัสดุที่ใช้ทำตัวกลางมีคุณสมบัติเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย แรงจับยึดและชนิดการไหลของสารกระจายผ่านตัวกลางจะถูกจำกัดด้วยความเร็วของอิมัลชันที่ไหลผ่านตัวกลาง ส่วนวัสดุที่เปียกได้ด้วยสารกระจายแรงจับยึดระหว่างสารกระจายกับตัวกลางจะมีค่าสูง เนื่องจากแรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายกับตัวกลางมีค่าสูงและมุมสัมผัสมีค่าน้อยตามสมการของยังและดูเปร (สมการที่ 2.5) ทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราการไหลที่สูงกว่าและรับอัตราการบำบัดที่สูงกว่าได้ หรือสามารถบำบัดได้เท่ากับด้วยขนาดของชั้นตัวกลางที่เล็กกว่า ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของโคเอเลสเซอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรเลือกวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางให้มีคุณสมบัติเปียกได้ด้วยสารกระจาย

### 2.4.2.3 ขั้นที่สาม : การหลุดออกจากชั้นตัวกลาง (Salting out stage)



รูปที่ 2.17 หยดของสารกระจายที่ออกมาจากโคเอเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000)

การหลุดออกจากชั้นตัวกลางเกิดขึ้นเนื่องจากการที่สารกระจายซึ่งรวมตัวกันแล้วเคลื่อนผ่านช่องว่างสุ่มหน้าด้านบนของชั้นตัวกลางและหลุดออกจากชั้นตัวกลางอันเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการโคเอเลสเซนซ์ ซึ่งขั้นตอนนี้ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ในการ

แยกสารกระจายออกจากสารต่อเนื่อง เนื่องจากการหลุดออกจากชั้นตัวกลางเป็นตัวกำหนดลักษณะและขนาดของหยดสารกระจายที่รวมตัวกันและจะออกมาจากโคเอเลสเซอร์ โดยลักษณะของหยดของสารกระจายที่ออกมาจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ (Wanichkul, 2000) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โคเอเลสเซอร์ที่ได้นั้นหยดของสารกระจายที่หลุดออกจากชั้นตัวกลางจะมีขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 3 มม.หรือมากกว่า)

จากการศึกษาพบว่า การเกิดหยดสารกระจายของผิวของการหลุดที่เปียกได้และไม่ได้ด้วยสารกระจายมีความแตกต่างกันดังนี้

(1) ผิวของการหลุดเปียกได้ด้วยสารกระจาย ( $\theta_{dc}$  มีค่าต่ำ)

สารกระจายที่รวมตัวกันแล้วจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างตัวกลางออกมาที่ผิวด้านบนที่เรียกว่า จุดหยด (Drip point) โดยสารกระจายจะเกิดฟิล์มและหุ้มผิวของการหลุด ถ้าความเร็วในการไหลมีค่าสูงจะเกิดเป็นฟอง (Foaming หรือ Mousse) โดยมีฟิล์มของสารกระจายหุ้มน้ำอยู่ภายในซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบในปริมาณมากและการไหลของน้ำจะทำให้ฟองของสารกระจายเหล่านี้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง (Re-fragmentation) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยเฉพาะในกรณีที่แรงตึงระหว่างผิวของสารกระจายและสารต่อเนื่องมีค่าน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ลดลง



ก)

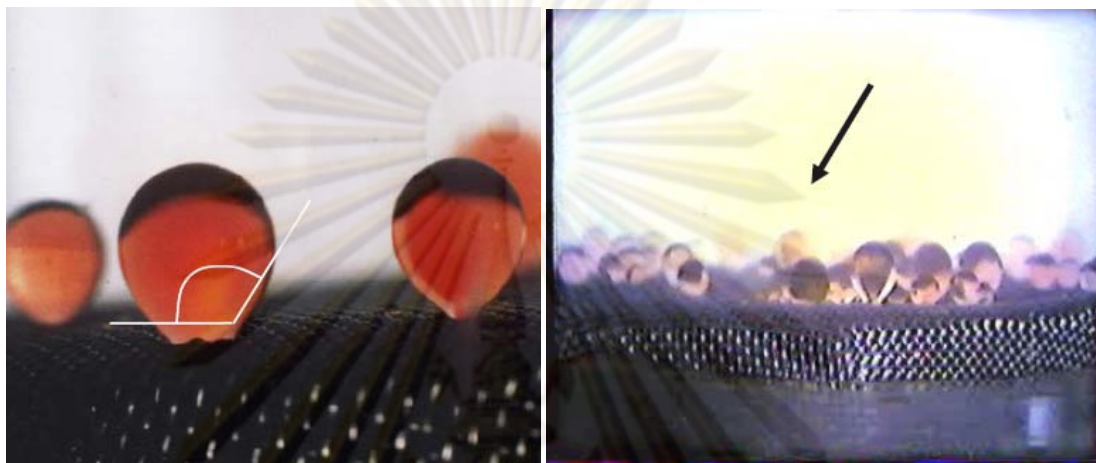
ข)

รูปที่ 2.18 เมื่อผิวของการหลุดเปียกได้ด้วยสารกระจาย ก) เกิดฟองของสารกระจายที่ผิวของการหลุด ข) เมื่อฟองเกิดการแตกกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (Rachu, 2005)

(2) ผิวของการหลุดเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย ( $\theta_{dc}$  มีค่าสูง)

ที่ผิวด้านบนของชั้นตัวกลางจะเกิดจุดหยดเช่นเดียวกับกรณีเปียกได้ด้วยสารกระจาย แต่สารกระจายจะไม่เกิดฟิล์มขึ้นหุ้มผิวของการหลุด แต่จะเกิดเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่คล้ายลูกบอลลูก (Balloon-shape) ขึ้นระหว่างตัวกลางหรือที่จุดหยด โดยไม่เกิดเป็นฟองของ

สารกระจายและหลุดออกจากโคเอเลสเซอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วในการไหลของอิมัลชันหรืออัตราส่วนของสารกระจายและสารต่อเนื่องมีค่าสูงขึ้นจะเกิดจุดหยุดมากขึ้น พร้อมกับการเกิด เจ็ต (Jetting) ฟันหยุดสารกระจายขนาดเล็กออกมาเป็นสาย ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นในถังตกตะกอนได้ยาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19



ก)

ข)

รูปที่ 2.19 เมื่อผิวของการหลุดเปียกไม่ได้ด้วยสารกระจาย ก) การเกิดหยุดของสารกระจายขนาดใหญ่คล้ายลูกบอลกลิ้ง (สังเกตว่ามุมสัมผัส  $> 90^\circ$ ) ข) การเกิดเจ็ตเนื่องจากความเร็วในการไหลหรืออัตราส่วนของสารกระจายและสารต่อเนื่องมีค่าสูง (Rachu, 2005)

จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนนี้ มีตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะของการหลุดออกจากชั้นของตัวกลางที่สำคัญอยู่ 4 ตัวแปร (Rachu, 2005) คือ

- (1) ความเปียกได้ของผิวของชั้นที่หยุดสารกระจายหลุด
- (2) แรงดึงระหว่างผิวของสารกระจายและสารต่อเนื่อง
- (3) ความเร็วในการไหลของอิมัลชัน
- (4) อัตราส่วนของสารกระจายต่อสารต่อเนื่องของอิมัลชันที่นำมาแยก

ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการโคเอเลสเซนซ์ขั้นตอนนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแยกน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันที่อยู่ในลักษณะของอิมัลชันตรง (O/W emulsion) จึงควรออกแบบให้มีลักษณะดังนี้

- (1) มีความเร็วในการไหลของอิมัลชันที่ผ่านโคเอเลสเซอร์ที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กอีกครั้ง (Re-fragmentation) ของหยดน้ำมัน
- (2) ใช้วัสดุตัวกลางที่พื้นผิวมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่ชั้นบนสุดของชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองของหยดน้ำมัน และที่ประสิทธิภาพใน



การกำจัดน้ำมันเท่ากัน ตัวกลางที่มีพื้นผิวบนสุดมีคุณสมบัติชอบน้ำสามารถทำงานได้ที่ความเร็วการไหลที่สูงกว่าตัวกลางที่มีพื้นผิวบนสุดมีคุณสมบัติชอบน้ำมัน

#### 2.4.3 ปัจจัยที่ควบคุมประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเส้นใย

ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางแบบเส้นใยสามารถควบคุมได้โดยปัจจัยหลายอย่างแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มปัจจัยหลักดังนี้

##### 2.4.3.1 ลักษณะหรือคุณสมบัติของอิมัลชัน

ลักษณะหรือคุณสมบัติของอิมัลชันจะมีผลกระทบต่อกลไกการรวมตัวกันของอนุภาคสารกระจาย โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของลักษณะหรือคุณสมบัติของอิมัลชันต่อโคเอเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ขนาดสารกระจาย	ระดับของการรวมตัวกันจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคที่เข้าใหญ่ขึ้น
ความหนืด	ประสิทธิภาพจะลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับความหนืด
สารลดแรงตึงผิว	สารลดแรงตึงผิวจะลดอัตราการไหลออกของฟิล์มและลดประสิทธิภาพ
มวลโมเลกุล	ประสิทธิภาพในการรวมตัวกันจะลดลงเมื่อมวลโมเลกุลลดลง
ของแข็งแขวนลอย	ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง

##### 2.4.3.2 ลักษณะหรือคุณสมบัติของเส้นใยตัวกลาง

ลักษณะหรือคุณสมบัติของเส้นใยตัวกลางจะมีผลกระทบต่อกลไกการรวมตัวกันของอนุภาคสารกระจาย โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5

##### 2.4.3.3 เงื่อนไขการดำเนินการ

เงื่อนไขการดำเนินการของโคเอเลสเซอร์จะมีผลกระทบต่อกลไกการรวมตัวกันของอนุภาคสารกระจาย โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของลักษณะหรือคุณสมบัติของเส้นใยตัวกลางต่อโคเอเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความขรุขระ	ความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใยเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากในการแยกอิมัลชันชั้นที่สอง เนื่องจากแรงที่กระทำที่ผิวของอนุภาคจะมีค่ามากกว่าแรงลอยตัวสูงมาก ดังนั้นอนุภาคบนพื้นผิวจะมีรูปร่างเกือบเป็นทรงกลม
	การเปลี่ยนวัสดุเส้นใยจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยก ถ้าความขรุขระของผิวไม่เปลี่ยนแปลง
ความสูงของชั้นตัวกลาง	อิมัลชันของไซโคลเฮกเซนขนาด 3 ไมครอนในน้ำ ที่แยกด้วยตะแกรงนิกเกิล จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของตะแกรง
	การเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางทำให้การรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามจะทำให้เกิดความดันลดยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคที่รวมตัวกันแล้ว
	การรวมตัวกันของอนุภาคจะมากขึ้นเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อขนาดของเส้นใยและความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น
	ความสูงของชั้นตัวกลางมีผลไม่มากนักกับประสิทธิภาพของการแยก
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	การรวมตัวกันจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อขนาดของเส้นใยลดลง
	ในทางทฤษฎีเสนอว่า เส้นใยขนาดเล็กลง ตัวกลางที่ยาวขึ้น และขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า จะส่งผลให้เกิดการรวมตัวสูงขึ้น
แรงกระทำที่ผิว (Surface force)	เมื่อแรงกระทำที่ผิวของตัวกลางลดลง ประสิทธิภาพการแยกจะลดลง
	เส้นใยสเตนเลสจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นใยแก้วและเส้นใย PTFE
	ประสิทธิภาพของการรวมตัวกันจะสัมพันธ์กับค่าซีตาโพเทนเชียลและสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง

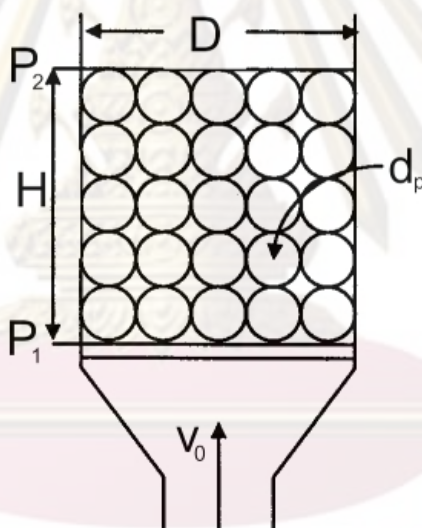
ตารางที่ 2.6 ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการต่อโคเอเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความเร็วการไหล	ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น
	ความเร็วของการไหลผ่านชั้นตัวกลางแบบเส้นใยสูงสุด คือ 0.5 - 1 ซม./วินาที
	ความเร็วตามผิวสูงสุด คือ 4 ซม./วินาที

ตารางที่ 2.6 ผลกระทบของเงื่อนไขการดำเนินการต่อโคเอเลสเซอร์ (Wanichkul, 2000) (ต่อ)

ตัวแปร	ผลกระทบ
ความเร็วการไหล (ต่อ)	ภายใต้ขอบเขตของความเร็วตามผิว กลไกการชนจะมีค่ามากกว่ากลไกอื่นๆและจึงมีผลกระทบมากที่สุด
	เมื่อความเร็วตามผิวมีค่ามากกว่า 1 ซม./วินาที ประสิทธิภาพการแยกอิมัลชันของโพลีเมอร์ในน้ำด้วยตัวกลางแบบเส้นใยซึ่งหนา 5 และ 12 ไมครอน จะมีค่าลดลง
	การรวมตัวกันของอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วการไหลลดลง
อุณหภูมิ	อุณหภูมิจะมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อประสิทธิภาพของการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย

## 2.5 การไหลในชั้นตัวกลางบรรจุ



รูปที่ 2.20 คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  สูง  $H$  บรรจุตัวกลางทรงกลมขนาด  $d_p$  (มะลิ, 2551)

ชั้นตัวกลางบรรจุ (Packed bed) คือ คอลัมน์หรือถังปฏิกรณ์กลวงที่บรรจุตัวกลางไว้ภายใน ซึ่งตัวกลางที่ถูกบรรจุอยู่ภายในนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและมักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาค 2 วัฏภาค เช่น การดูดซับสารหรือการกรอง เป็นต้น รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะทั่วไปของคอลัมน์ตัวกลางบรรจุ ซึ่งการไหลผ่านชั้นตัวกลางที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ของของไหลนั้น มีลักษณะเหมือนกับการไหลผ่าน

ช่องว่างที่มีความซับซ้อนหรือท่อที่คดเคี้ยวและมีขนาดพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันตามความยาว ดังนั้นเราสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีของการไหลในท่อมาคำนวณเกี่ยวกับการไหลผ่านชั้นตัวกลางบรรจุเหล่านี้ได้ โดยกำหนดให้มีพื้นที่ผิวและช่องว่างภายในท่อเท่ากับลักษณะของชั้นตัวกลางบรรจุจริง ซึ่งตัวกลางที่ถูกบรรจุอยู่ในชั้นจะทำให้เกิดความต้านทานการไหลของของไหลที่ผ่านชั้นตัวกลางนั้น โดยผลของความต้านทานที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วน ลักษณะการไหล และรูปร่างของตัวกลางที่บรรจุ

สำหรับการคำนวณความดันตกที่เกิดขึ้นในชั้นตัวกลางบรรจุจะประมาณได้จากผลของความต้านทานการไหลผ่านช่องว่างทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดทั้งชั้นตัวกลาง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วช่องว่างเหล่านี้มีลักษณะรูปทรง ขนาดพื้นที่หน้าตัด และทิศทางที่ไม่แน่นอนดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวัดขนาดที่แท้จริงหรือการคำนวณเป็นไปได้ยาก จึงต้องทำการคำนวณผ่านตัวแปรอื่น ๆ ที่สามารถวัดได้ และทำการคำนวณบนข้อสมมติฐาน คือ ตัวกลางถูกบรรจุอยู่สม่ำเสมอและทั่วถึงในชั้นตัวกลางบรรจุ ช่องว่างการไหลในชั้นตัวกลางบรรจุมีลักษณะกระจายอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดการแหวกเป็นช่องเมื่อมีการไหลของของไหลผ่านชั้นตัวกลางบรรจุ (Channeling) และตัวกลางที่บรรจุมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของคอลัมน์หรือถังปฏิกรณ์

ตัวกลางที่ถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface,  $a_v$ ) หรือพื้นที่ผิวทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอนุภาคตัวกลางดังนี้

$$a_v = \frac{S_p}{V_p} \quad (2.22 \text{ ก})$$

โดยที่  $S_p$  คือ พื้นที่ผิวของตัวกลาง

$V_p$  คือ ปริมาตรของตัวกลาง

สำหรับตัวกลางบรรจุรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ คือ

$$a_{v,\text{Sphere}} = \frac{S_{p,\text{Sphere}}}{V_{p,\text{Sphere}}} = \frac{\pi d_p^2}{\frac{1}{6} \pi d_p^3} = \frac{6}{d_p} \quad (2.22 \text{ ข})$$

แต่ในความเป็นจริงแล้วตัวกลางบรรจุมักมีรูปร่างที่แตกต่างออกไปไม่เป็นทรงกลมแท้จริง แต่สามารถบอกได้ว่ามีความกลมมากน้อยด้วยดัชนีความกลม (Sphericity,  $\Psi$ ) หรืออัตราส่วนของพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับตัวกลางต่อพื้นที่ผิวของตัวกลาง ( $V_{p,\text{Sphere}} = V_p$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.23

$$\Psi = \frac{S_{p,\text{Sphere}}}{S_p} = \frac{S_{p,\text{Sphere}}/V_{p,\text{Sphere}}}{S_p/V_p} = \frac{6/d_p}{S_p/V_p} \quad (2.23)$$

สำหรับตัวกลางที่มีลักษณะกลมแท้จริงจะมีค่าดัชนีความกลมเท่ากับ 1 และจากสมการที่ 2.22 ก และ 2.23 จะได้ว่า

$$a_v = \frac{6}{\Psi d_p} \quad (2.24)$$

ภายในชั้นตัวกลางบรรจุที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ชั้นตัวกลางจะมีความพรุน (Porosity,  $\epsilon$ ) หรือสัดส่วนของปริมาตรช่องว่างภายในชั้นตัวกลาง ( $V_{\text{void}}$ ) ต่อปริมาตรทั้งหมดของชั้นตัวกลาง (ช่องว่างรวมกับตัวกลางบรรจุ,  $V_{\text{bulk}}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\epsilon = \frac{V_{\text{void}}}{V_{\text{bulk}}} \quad (2.25)$$

ในกรณีนี้ที่เส้นรอบวงของช่องว่างการไหลภายในชั้นตัวกลางมีเส้นรอบวงไม่เป็นวงกลม (Noncircular channel) ดังเช่นการไหลในท่อปกติ จึงต้องหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent diameter,  $D_{\text{eq}}$ ) หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าท่อปกติที่ทำให้เกิดความดันลดเท่ากับการไหลภายในชั้นตัวกลางในการคำนวณ ซึ่งพิจารณาจากพื้นที่ผิวของช่องว่างการไหลภายในชั้นตัวกลาง โดยสมมติให้ช่องว่างการไหลเป็นช่องขนาดเล็กหลายช่องและเป็นท่อตรงขนานกันตลอดความยาวของชั้นตัวกลาง ดังนี้

$$n\pi D_{\text{eq}} H = A_0 L (1 - \epsilon) \frac{6}{\Psi d_p} \quad (2.26)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนช่องว่างตรงและขนานกัน

$H$  คือ ความสูงของชั้นตัวกลาง

$A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชั้นตัวกลางบรรจุ

และพิจารณาจากปริมาตรของช่องว่างภายในชั้นตัวกลางตามสมการที่ 2.27

$$A_0 H \epsilon = \frac{1}{4} n \pi D_{\text{eq}}^2 H \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) จะได้  $D_{\text{eq}}$  มีค่าดังนี้

$$D_{\text{eq}} = \frac{2}{3} \Psi d_p \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)} \quad (2.28)$$

นอกจากนี้ในการคำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นจากชั้นตัวกลางในคอลัมน์พบว่าความเร็วเฉลี่ยในช่องว่างของไหล (Interstitial velocity,  $v_{\text{av}}$ ) จะไม่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณนัก แต่จะใช้ความเร็วในรูปของความเร็วมวล (Superficial หรือ Empty-tower velocity,  $v_0$ ) มากกว่า โดยคำนวณได้จาก

$$v_0 = v_{\text{av}} \epsilon \quad (2.29)$$

เมื่อนำ  $D_{\text{eq}}$  และ  $v_0$  มาคำนวณเลขเรย์โนลด์สำหรับชั้นตัวกลาง ( $N_{\text{Re,p}}$ ) จะได้ดังสมการที่

$$N_{Re,p} = \frac{d_p v_0 \rho}{(1-\varepsilon)\mu} \quad (2.31)$$

ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ ( $N_{Re,p} < 10$ ) ความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อกลมตรงจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วและขนาดของช่องว่างยกกำลัง 2 ตามสมการของฮาร์เกน-ปัวเซย์ (Hagen-Poiseuille equation) แต่เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วช่องว่างการไหลของชั้นตัวกลางในคอลัมน์มีลักษณะคดเคี้ยวไม่เป็นท่อตรงหรือขนานกันตลอดความยาว จึงต้องมีการเพิ่มค่าแก้ไข  $\lambda_1$  ลงในสมการดังนี้

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{32v_{av}\mu}{D_{eq}^2} = \frac{72\lambda_1 v_0 \mu (1-\varepsilon)^2}{\psi^2 d_p^2 \varepsilon^3} \quad (2.32)$$

โดยที่  $\Delta P$  คือ ความดันตกที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสมการนี้ถูกต้อง โดยมีค่าคงที่จากการทดลอง คือ 150 หรือ  $\lambda_1$  มีค่าเท่ากับ 2.1 และเรียกสมการนี้ว่า สมการของคาร์เมน-โคเซนี (Carman-Kozeny equation) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150v_0 \mu (1-\varepsilon)^2}{\psi^2 d_p^2 \varepsilon^3} \quad (2.33)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมตรง ความดันตกที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของของไหลยกกำลัง 2 และเนื่องจากการไหลในชั้นตัวกลางมีลักษณะคดเคี้ยวและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ จึงต้องมีการเพิ่มค่าแก้ไข  $\lambda_2$  ลงในสมการเช่นเดียวกับการไหลแบบราบเรียบ ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{2f\rho v_{av}^2}{D_{eq}} = \frac{3f\lambda_2 \rho v_0^2 (1-\varepsilon)}{\psi d_p \varepsilon^3} \quad (2.34)$$

จากการทดลองที่การไหลแบบปั่นป่วนและเลขเรย์โนลด์มีค่าสูง ( $N_{Re,p} > 1,000$ ) ค่าคงที่ในสมการที่ 2.34 มีค่าเท่ากับ 1.75 และมีความสัมพันธ์ตามสมการของเบิร์ก-พลัมเมอร์ (Burke-Plummer equation) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{1.75\rho v_0^2 (1-\varepsilon)}{\psi d_p \varepsilon^3} \quad (2.35)$$

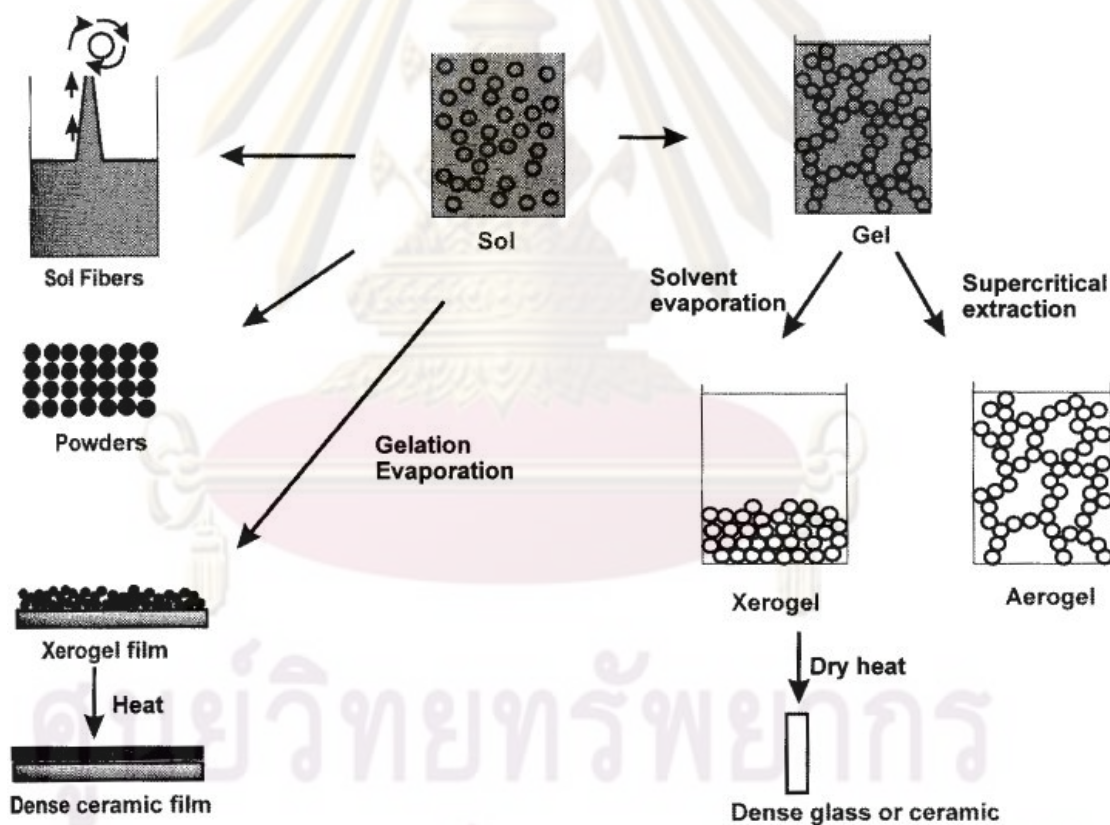
และเมื่อนำสมการที่ 2.33 และ 2.35 มาบวกกัน จะได้สมการสำหรับการคำนวณที่ครอบคลุมทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งรวมผลของการสูญเสียเนื่องจากความหนืดของของไหลและการสูญเสียพลังงานจลน์ของของไหล และเรียกว่าสมการของเออร์กัน (Ergun equation) คือ

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150v_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\psi^2 d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho v_0^2(1-\varepsilon)}{\psi d_p \varepsilon^3} \quad (2.36)$$

## 2.6 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel process)

โซล (Sol) คือ สารละลายคอลลอยด์ของของแข็งหรือพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) หรือไม่เป็นผลึก (Amorphous) ก็ได้

เจล (Gel) คือ สารที่มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลของของแข็งที่มีความพัวพันต่อเนื่องกันเป็นเครือข่ายอยู่ในเฟสของเหลว โดยลักษณะของเจลจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างเครือข่ายของของแข็งและของเหลวที่อยู่ หากของเหลวนั้นเป็นน้ำจะเรียกว่า อควาเจล (Aquagel) แต่ถ้าของเหลวนั้นประกอบด้วยแอลกอฮอล์จะเรียกว่า แอลโคเจล (Alcogel)

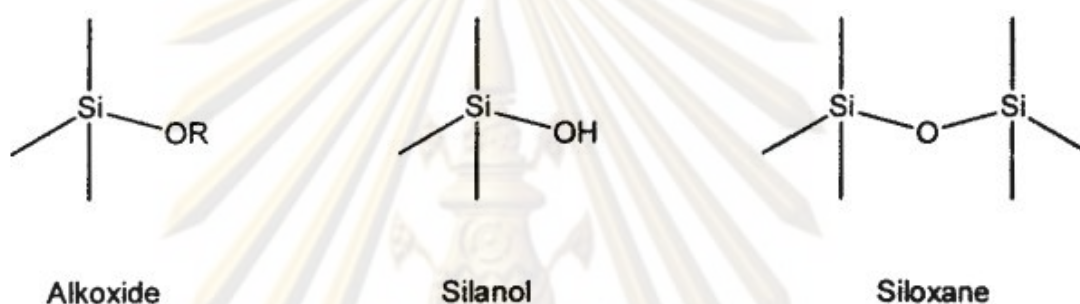


รูปที่ 2.21 กระบวนการโซลเจลแบบต่างๆ (Schubert และ Husing, 2005)

กระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการสังเคราะห์โครงสร้างเครือข่ายของออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Condensation) โดยเริ่มต้นจาก

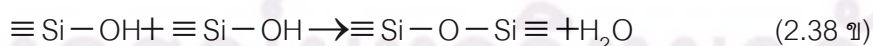
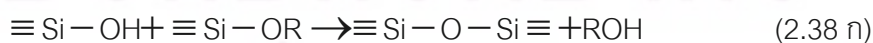
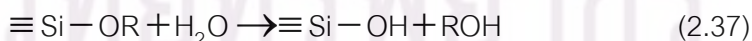
การสังเคราะห์โซลซึ่งไม่มีความเสถียรให้เกิดการรวมตัวกันในลักษณะเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆจนได้โครงสร้างที่รวมตัวกันแน่นขึ้นหรือเป็นการเกิดเป็นเจล (Gelation) นั้นเอง ซึ่งเราสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆตามต้องการ เช่น การปั่น (Spinning) เป็นวิธีขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นเส้นใย การเคลือบผิว (Coating) เพื่อให้ได้เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนพื้นผิว หรือการตกตะกอน (Precipitating) ทำให้ได้วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่เป็นระเบียบ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21

### 2.6.1 กระบวนการโซลเจลของซิลิเกต (Silicate sol-gel process)



รูปที่ 2.22 หมู่ซิลิคอน-ออกซิเจนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโซลเจล (Schubert และ Husing, 2005)

หลักการเบื้องต้นทางเคมีของกระบวนการโซลเจลของซิลิเกต คือ การเปลี่ยนสารตั้งต้น (Precursor) เช่น หมู่อัลโคไซด์ (Alkoxide, Si-OR) และหมู่ซิลานอล (Silanol, Si-OH) ให้อยู่ในรูปของซิลอกเซน (Siloxane) ให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เพื่อให้เกิดอนุภาคหรือเจลในลักษณะที่เราต้องการ โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นนั้นจะทำการสร้างหมู่ซิลานอลจากหมู่อัลโคไซด์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการที่ 2.37 ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเช่นกันขึ้น ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 แบบตามผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ เกิดแอลกอฮอล์ (สมการที่ 2.38 ก) หรือเกิดน้ำ (สมการที่ 2.38 ข)

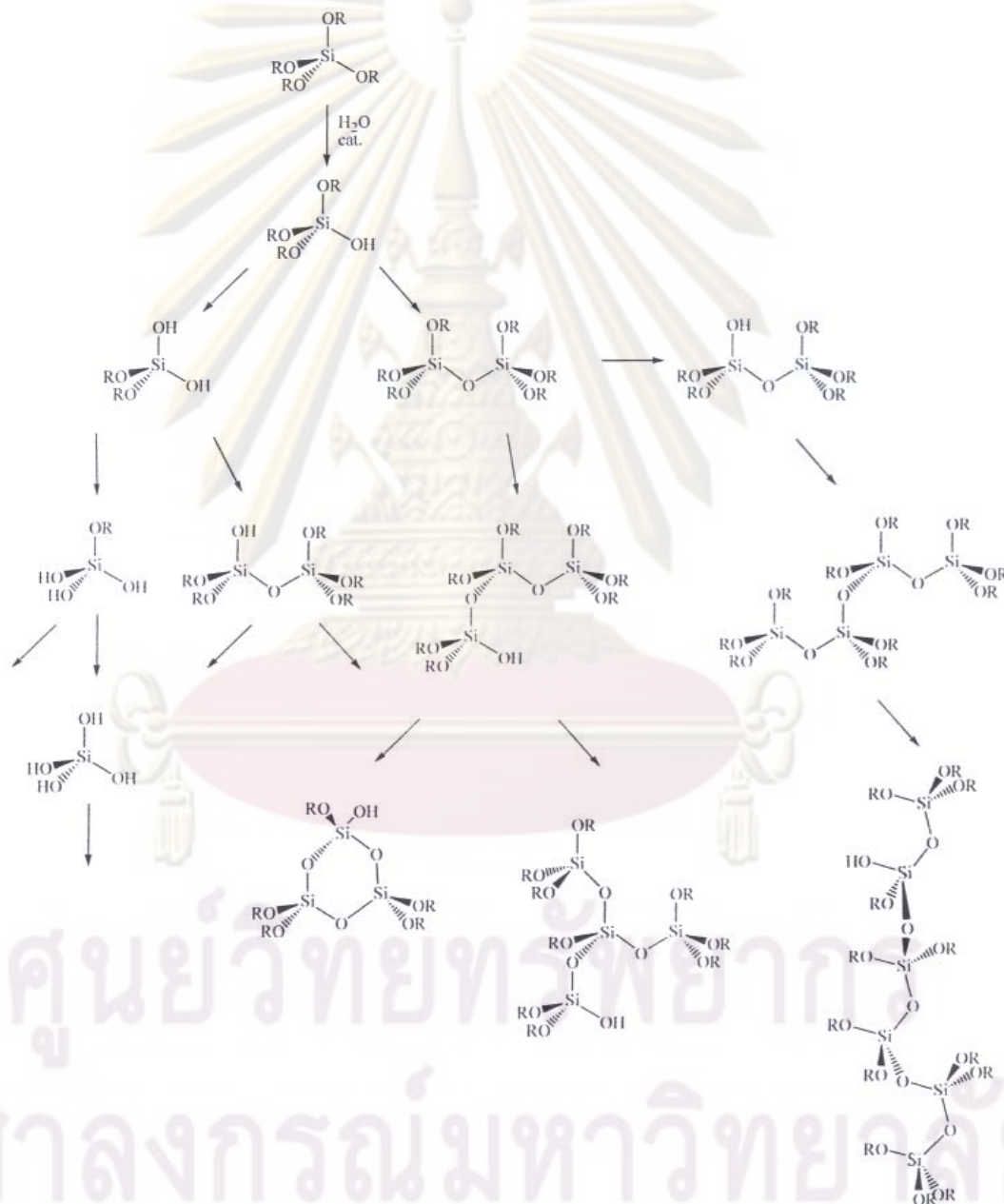


สำหรับปฏิกิริยารวมของกระบวนการโซลเจลของซิลิคอนเตตระอัลโคไซด์ (Silicon tetraalkoxide) แสดงได้ดังสมการที่ 2.39





โดยสารเตตระอัลโคซีซิลเลน (Tetraalkoxysilane,  $\text{Si}(\text{OR})_4$ ) ที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล ได้แก่ เตตระเมทอกซีซิลเลน (Tetramethoxysilane, TMOS) และเตตระเอทอกซีซิลเลน (Tetraethoxysilane, TEOS) ซึ่งสารอัลโคซีซิลเลนเหล่านี้มักไม่รวมตัวกับน้ำ จึงต้องใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายให้เกิดการผสมและเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของของผสมระหว่างเตตระอัลโคซีซิลเลน น้ำ และแอลกอฮอล์เกิดได้ช้า จึงต้องมีการเติมกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซนซ์อีกด้วย



รูปที่ 2.23 เส้นทางการดำเนินไปของกระบวนการโซลเจลของ  $\text{Si}(\text{OR})_4$  ขึ้นกับปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น

(Schubert และ Husing, 2005)

จากปฏิริยารวมของกระบวนการโซลเจลที่กล่าวถึงข้างต้น จะเห็นได้ว่าปฏิริยาตามสมการมีลักษณะที่ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วปฏิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนเนื่องจากการไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันต่างเกิดขึ้นพร้อมๆกันและแข่งขันกัน ทำให้เกิดการสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นกับเส้นทางของปฏิริยาที่ดำเนินไปตลอดกระบวนการโซลเจลดังแสดงในรูปที่ 2.23 ดังนั้นปัจจัยที่กำหนดเส้นทางของปฏิริยาที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ คือ อัตราการเกิดปฏิริยาของปฏิริยาทั้งสอง (ไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

- (1) ชนิดของสารตั้งต้น
- (2) อัตราส่วนระหว่างหมู่อัลโคซีและน้ำ
- (3) ชนิดของตัวเร่งปฏิริยา
- (4) ชนิดของตัวทำละลาย
- (5) อุณหภูมิ
- (6) พีเอช
- (7) ความเข้มข้นและความเข้มข้นสัมพัทธ์ของของผสมที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

#### 2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการโซลเจล

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการโซลเจลสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการโซลเจล (Pierre, 1998)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถสังเคราะห์วัสดุผสมอนินทรีย์-อินทรีย์ชนิดใหม่ที่ไม่ได้อยู่ตามธรรมชาติได้ 2. สามารถสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ 3. กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ	1. สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการมักมีราคาสูง 2. สารตั้งต้นหรือสารทำละลายบางชนิดมีความเป็นพิษ (Toxic)

#### 2.6.3 วัสดุผสมอนินทรีย์-อินทรีย์ (Inorganic-organic hybrid material)

จากข้อดีที่สำคัญประการหนึ่งของกระบวนการโซลเจล คือ เราสามารถสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ขึ้นได้ ซึ่งวัสดุผสมจากกระบวนการนี้มีชื่อเรียกได้หลากหลาย เช่น ORMOSILs (Organically modified silicates), ORMOCERs (Organically

modified ceramics), CERAMERs (Ceramic polymers) หรือ POLYCERAMERs (Polymeric ceramics) เป็นต้น โดยวัสดุเหล่านี้จะรวมเอาคุณสมบัติที่ดีของสารอินทรีย์ (มีหมู่ฟังก์ชันแบบต่างๆ, สังเคราะห์ได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ) และสารอนินทรีย์ (ความแข็ง, ทนทานต่อสภาพอุณหภูมิหรือสารเคมี) ให้อยู่ในวัสดุเดียวกัน ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์อื่นๆอาจทำไม่ได้

การเกิดการรวมตัวกันของหมู่อินทรีย์ลงในโครงสร้างของสารอนินทรีย์เพื่อให้เกิดวัสดุผสมเกิดขึ้นได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ

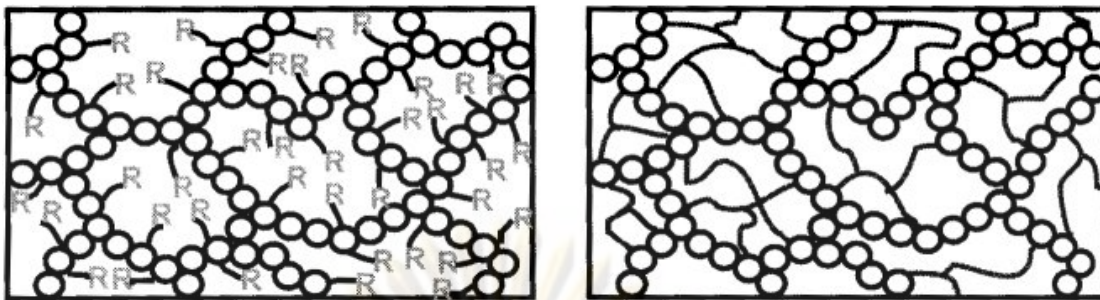
2.6.3.1 การฝังโมเลกุลสารอินทรีย์ลงในโครงสร้าง (Embedding of organic molecules) โดยไม่เกิดพันธะเคมีกันขึ้น เกิดขึ้นโดยเจลที่เกิดจากกระบวนการโซลเจลจะสร้างโครงสร้างเครือข่ายล้อมรอบและกักโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในสารตั้งต้น และหากเป็นพอลิเมอร์ของสารอินทรีย์ โครงสร้างเครือข่ายของสารอินทรีย์นั้นจะเกิดซ้อนกันไปมากับเครือข่ายของโครงสร้างอนินทรีย์โดยไม่เกิดพันธะเคมีต่อกันขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 โมเลกุลอินทรีย์ถูกกักอยู่ในโครงสร้างของเจล (ซ้าย) โครงสร้างพอลิเมอร์ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดซ้อนกัน (ขวา) โดยไม่เกิดพันธะเคมีกันขึ้น (Schubert และ Husing, 2005)

2.6.3.2 การรวมตัวกันของหมู่อินทรีย์ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Incorporation of organic groups via covalent bonding) เป็นการเชื่อมหมู่อินทรีย์เข้ากับโครงสร้างสารอนินทรีย์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งในกระบวนการโซลเจลของซิลิเกตเราอาจใช้สารตั้งต้นเป็นสารออกาโนอัลโคซีซิลเลนต่างๆ เช่น  $R'Si(OR)_3$  (Organotrialkoxysilanes) หรือ  $R'_2Si(OR)_2$  (Diorganodialkoxysilanes) แทนเตตระอัลโคซีซิลเลนได้ โดยหมู่  $R'$  จะเกิดเชื่อมต่อกับโครงสร้างอนินทรีย์ที่สร้างขึ้นในโมเลกุลด้วยพันธะของ Si-C ซึ่งพันธะนี้ทนทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังสมการที่ 2.40





รูปที่ 2.25 การรวมตัวของหมู่อินทรีย์เข้ากับโครงสร้างของเจลด้วยพันธะโควาเลนต์ (ซ้าย) โครงสร้างสารอินทรีย์และอนินทรีย์จะเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน (ขวา) (Schubert และ Husing, 2005)

การใช้สารออกาโนอัลโคซีซิลเลนแทนเตตระอัลโคซีซิลเลนเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการโซลเจลของซิลิเกต จะส่งผลต่อเจลที่เกิดขึ้นหลายอย่างตามลำดับดังนี้

(1) ความหนาแน่นครอสลิงก์ของโครงสร้างอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นลดลง เช่น การใช้ออกาโนไดอัลโคซีซิลเลนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโซ่ตรงแทนโครงสร้างเครือข่ายเจลที่เป็น 3 มิติ หรือการใช้ออกาโนไตรอัลโคซีซิลเลนจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกรงแยกกัน  $(\text{RSiO}_{1.5})_n$  ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ทำให้การนำไปใช้สังเคราะห์จริงมักใช้เป็นสารตั้งต้นควบคู่ไปกับเตตระอัลโคซีซิลเลน



รูปที่ 2.26 โครงสร้างโมเลกุลคล้ายกรงของ  $(\text{XSiO}_{1.5})_n$  เมื่อ  $n = 6, 8, 10$  และ  $X = \text{R}, \text{H}, \text{OH}$   
(Schubert และ Husing, 2005)

(2) การใช้ไตรอัลโคซีซิลเลนที่มีหมู่อินทรีย์จะทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันที่เปลี่ยนไป การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบสจะต้องเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อควบคุมพีเอชให้เกิดปฏิกิริยาตามที่ต้องการ

(3) โครงสร้างอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะถูกดัดแปลงโครงสร้างหรือถูกต่อติดด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ตามสารตั้งต้นที่ใช้

(4) หมู่อินทรีย์จะทำให้สภาพผิวของระบบเปลี่ยนแปลงไป


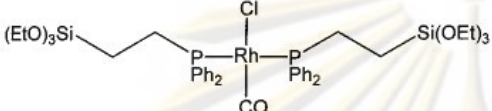
2.6.4 การปรับปรุงโครงสร้างโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ (Organic modification and functionalization)

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างซิลิโคนอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเจลยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานในหลายๆด้าน เราสามารถเพิ่มการใช้งานของเจลที่สังเคราะห์ให้มีความหลากหลายหรือเฉพาะเจาะจงมากขึ้นได้ เช่น เพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา การดูดซับ หรือการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น โดยการปรับปรุงพื้นผิวหรือโครงสร้างด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ต่างๆ ดังตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สารออกาโนไตรอัลโคซีซิลอนบางชนิดที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุผสมอินทรีย์-อินทรีย์ด้วยกระบวนการไฮโดรเจล (Schubert และ Husing, 2005)

$R'Si(OR)_3$	Function
	Polymerizable group for the preparation of hybrid polymers
	Crosslinking sites
	Group for organic polyaddition reactions; generation of hydrophilic diols by opening of the epoxide ring
	Hydrophilicity, coupling sites, coordination sites for metals
	Hydrophobicity
	Crosslinking site in thiol-ene UV cure systems, coordination site for metals
	Chromophoric substituent (non-linear optic NLO dye)

ตารางที่ 2.8 สารออกาโนไตรอัลโคซีซิลเลนบางชนิดที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุผสมอินทรีย์-อินทรีย์ด้วยกระบวนการโซลเจล (Schubert และ Husing, 2005) (ต่อ)

R'Si(OR) <sub>3</sub>	Function
	Fluorescent substituent (pyrene derivative)
	Coordination of transition metal complexes, catalysis

ดังที่กล่าวมาแล้ว พันธะโควาเลนต์ของหมู่อินทรีย์ที่ไปต่อกับโครงสร้างอินทรีย์นั้นจะทนทานต่อการถูกทำลายด้วยการไฮโดรไลซิส เราจึงสามารถเพิ่มความสามารถของหมู่อินทรีย์ที่ต้องการลงไปโครงสร้างอินทรีย์นั้นได้ โดยวิธีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันสามารถจำแนกได้ 2 วิธี ได้แก่

(1) การต่อติดหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีการกราฟต์ (Grafting method)

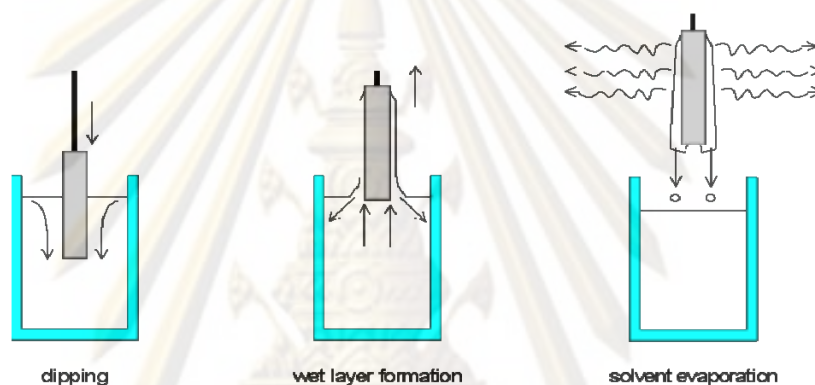
วิธีการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเป็นการต่อติดที่ทำหลังการสังเคราะห์โครงสร้างอินทรีย์ขึ้นแล้ว (Post synthesis modification) โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์เข้าไปฝั่งหรือรวมตัวบนโครงสร้างหรือเจล จึงเป็นการสังเคราะห์ที่ทำ 2 ขั้นตอน คือ สร้างโครงสร้างหรือเจล และการกราฟต์เพิ่มหมู่ฟังก์ชันลงไป

(2) การต่อติดหมู่ฟังก์ชันโดยตรงขณะผลึกก่อตัว (Direct co-condensation method)

ในบางกรณีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันที่ต้องการลงไป จะเกิดการต่อติดด้วยลักษณะพันธะโควาเลนต์แบบ Si-O-Si-C ซึ่งพันธะของ Si-O ถูกทำลายได้ง่ายด้วยบางสภาวะของปฏิกิริยา เราจึงต้องการให้เกิดการต่อติดของหมู่ฟังก์ชันด้วยพันธะโควาเลนต์ของ Si-C โดยตรงที่ถูกทำลายได้ยากกว่า ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้เกิดการคอนเดนเซชันของเตตระอัลโคซีซิลเลนและออกาโนอัลโคซีซิลเลนไปพร้อมๆ กันหรือเกิดการโคคอนเดนเซชัน (Co-condensation) ขึ้นในกระบวนการโซลเจล การต่อติดฟังก์ชันด้วยวิธีนี้จึงเป็นการสังเคราะห์ที่สามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว จึงเป็นข้อได้เปรียบกว่าวิธีการกราฟต์ข้อหนึ่ง แต่การสังเคราะห์ก็ไม่สามารถใช้ความร้อนที่สูงในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากความร้อนอาจไปทำลายหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้

### 2.6.5 การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม

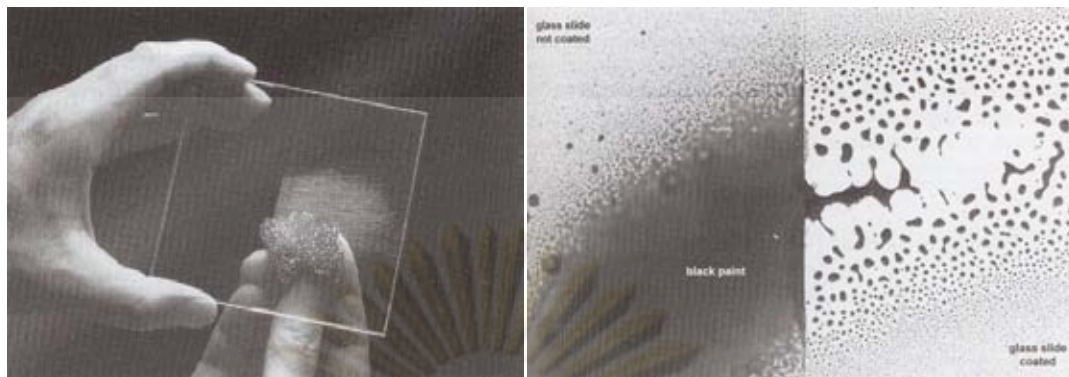
การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coat technique) เป็นวิธีเคลือบผิวที่สามารถทำได้ง่าย ซึ่งทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบมาจุ่มลงในสารละลายโซลที่เตรียมไว้ แล้วดึงขึ้น สารละลายจะติดอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานในลักษณะของฟิล์มบาง (Thin film) เมื่อตัวทำละลายในฟิล์มบางระเหยออกไปก็จะเกิดโครงสร้างเจลที่ต้องการเคลือบเหลืออยู่บนผิวนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ความหนืดของสารละลาย และมุมในการดึงขึ้น นอกจากนี้แรงตึงผิวของสารละลาย ความดันไอ และความชื้นจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นด้วย (Dislich, 1988)



รูปที่ 2.27 การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม

การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถเคลือบผิวชิ้นงานที่มีรูปร่างได้หลากหลายแบบ การควบคุมความหนาที่ต้องการทำได้ง่าย สามารถทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องหรือทีละชิ้น (Continuous or batch process) และยังสามารถทำการเคลือบผิวที่มีหลายชั้น (Multi-layer coating) ได้

เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการโซลเจลที่สารตั้งต้นมักมีราคาแพง การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการนี้จึงมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจไม่เหมาะสมในการนำมาใช้จริง การประยุกต์ใช้กระบวนการโซลเจลสำหรับการเคลือบผิว จึงมีความเป็นไปได้เหนือข้อจำกัดนี้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การเคลือบเพื่อเพิ่มความคงทนต่อการขีดข่วนของพื้นผิว หรือเพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะความชอบน้ำ-ไม่ชอบน้ำของพื้นผิว เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แก้วที่ทำการเคลือบและไม่เคลือบพื้นผิวมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน  
(Schubert และ Husing, 2005)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการศึกษาการใช้ตัวกลางชนิดต่างๆ รวมถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์อย่างหลากหลาย เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลในการหาสมการสำหรับการคำนวณและออกแบบหรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโคเอเลสเซอร์ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีดังนี้

2.7.1 Li และ Gu (2005) ศึกษาการรวมอนุภาคคิมัลชันของน้ำมันในน้ำด้วยชั้นตัวกลางแบบเม็ดและเส้นใย (Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds)

งานวิจัยนี้ทำการทดลองการรวมอนุภาคน้ำมันในน้ำด้วยโคเอเลสเซอร์ที่มีการไหลในแนวนอน (Horizontal flow) โดยใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยไนลอน และโพลีโพรพิลีนชนิดเม็ดเป็นชั้นตัวกลาง เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ต่างกัน คือ 206.21, 308.92, 468.59 และ 542.68 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย คือ 2,000, 5,000 และ 10,000 ส่วนในล้านส่วน ความยาวของชั้นตัวกลาง คือ 20, 40 และ 70 เซนติเมตร โดยที่ขนาดของเส้นใยที่ใช้ทั้งสองชนิดแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์มีลักษณะไม่เป็นฟังก์ชันแบบเส้นตรงกับความเร็วการไหลของน้ำเสียโดยจะมีประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วบางค่า ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ลดลง และความยาวของชั้นตัวกลางส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อยต่อการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันในช่วงที่ทำการทดลองสำหรับตัวกลางแบบเม็ด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่าตัวกลางชนิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่ดีกว่าเส้นใยที่มีขนาดใหญ่



2.7.2 Sokolovic และคณะ (1997) ศึกษาผลของลักษณะการทำงานของชั้นตัวกลางเม็ดโฟมโพลียูรีเทนต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ของอิมัลชันน้ำมันในน้ำ (Effect of working conditions on bed coalescence of an oil-in-water emulsion using a polyurethane foam bed)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแยกอนุภาคอิมัลชันน้ำมันในน้ำในช่วงสถานะคงตัว โดยใช้เม็ดโฟมโพลียูรีเทนเป็นตัวกลาง โดยการทดลองศึกษาผลของสภาพการทำงานต่างๆ ได้แก่ ความเร็วการไหลของน้ำเสีย 10 - 45 เมตรต่อชั่วโมง ความยาวของชั้นตัวกลาง 3 - 15 เซนติเมตร และความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย 500 - 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าน้ำเสียที่ออกจากโคเอเลสเซอร์มีความเข้มข้นของน้ำมันระหว่าง 3.12 - 138 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคอิมัลชันระหว่างร้อยละ 82 - 99.8 โดยผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบและความหนาของชั้นตัวกลางจะมีน้อยเมื่อความเร็วการไหลมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต และเมื่อความเร็วการไหลมีค่าเกินค่าวิกฤต การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบจะส่งผลให้น้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของน้ำมันสูงขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้สรุปสมการอย่างง่ายสำหรับการคำนวณสภาพการทำงานของโคเอเลสเซอร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากระบบตามต้องการด้วย

2.7.3 Sokolovic และคณะ (2007) ศึกษาผลของความยาวของชั้นตัวกลางต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ของอิมัลชันน้ำมันในน้ำที่สถานะคงตัว (Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion)

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบของความยาวของชั้นตัวกลางต่อการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความยาวของชั้นตัวกลางระหว่าง 3 - 5 เซนติเมตร ตัวกลางเส้นใยโพลียูรีเทนที่มีความพรุนระหว่าง 0.85 - 0.96 ความเร็วการไหลของน้ำเสียระหว่าง 16 - 50 เมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย 500 - 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และลักษณะการไหลของน้ำเสีย คือ การไหลในแนวราบ การไหลลงในแนวตั้ง และการไหลขึ้นในแนวตั้ง ในการทดลองนี้ความเร็ววิกฤต คือ ความเร็วการไหลที่ทำให้ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งมีค่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อความยาวของชั้นตัวกลางมีค่ามากขึ้น จะทำให้ความเร็ววิกฤตสูงขึ้น (นั่นคือสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ในอัตราที่สูงขึ้น) นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของชั้นตัวกลางลดลงความเร็ววิกฤตจะมีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้ในกรณีที่ความยาวของตัวกลางมีค่าน้อย ความเร็ววิกฤตจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อตัวกลางมีความยาวมากขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันจะไม่มีผลต่อความเร็ววิกฤต ดังนั้นจากการทดลองสรุปได้ว่าค่าความยาวที่น้อยที่สุดของชั้นตัวกลางหรือความยาววิกฤตมีค่า

ขึ้นกับหลายตัวแปร คือ ลักษณะการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นได้ของชั้นตัวกลาง และความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย โดยในการออกแบบโคเอเลสเซอร์ควรออกแบบให้ชั้นตัวกลางมีความยาวมากกว่าความยาววิกฤตของระบบนั้น

2.7.4 Rebelein และ Blass (1990) ศึกษาการแยกอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กด้วยชั้นตัวกลางเส้นใย (Separation of micro-dispersions in fibre-beds)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคอิมัลชันขนาดเล็กในถังตกตะกอนด้วยชั้นตัวกลางเส้นใย โดยตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง คือ เส้นใยสแตนเลส เส้นใยแก้ว และเส้นใย PTFE ขนาดระหว่าง 5 - 50 ไมครอน ชั้นตัวกลางยาว 5 - 60 มิลลิเมตร โดยอนุภาคอิมัลชันที่ใช้ในการทดลองมีขนาดระหว่าง 1 - 100 ไมครอนและเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันลดลงหากอนุภาคอิมัลชันที่เข้าสู่ระบบมีขนาดเล็กหรือมีความเร็วในการไหลที่สูงขึ้น และประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันมีผลโดยตรงกับลักษณะการเปียกได้ของวัสดุเส้นใยและขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลาง ส่วนความยาวของชั้นตัวกลางในการวิจัยนี้พบว่าเมื่อผลต่อประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อย

2.7.5 Madia และคณะ (1976) ศึกษาอิทธิพลของความสามารรถเปียกได้ของชั้นตัวกลางชนิดเม็ดต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ (Granular packed bed coalescer: Influence of packing wettability on coalescence)

งานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงความสามารถเปียกได้ของชั้นตัวกลางต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองด้วยชั้นตัวกลางแบบเม็ด 4 ชนิด คือ ถ่านแอนทราไซต์ ทราयोออกตาวา โพลีโพรพิลีน และ XAD-2 polymeric adsorbent โดยบรรจุในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สูง 2 นิ้ว และมีอัตราการไหลของอิมัลชันระหว่าง 0.1 - 0.5 ลิตรต่อนาที ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดความเปียกได้ของชั้นตัวกลางโดยดัดแปลงวิธี Gas chromatography วัดระยะเวลาที่ไอน้ำและไอของเฮกเซนใช้ในการผ่านชั้นตัวกลาง ซึ่งสารที่มีความสามารถเปียกได้ด้วยน้ำมันมากจะมีอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ไอของเฮกเซนต่อเวลาที่ใช้ไอน้ำในการไหลผ่านชั้นตัวกลางมาก จากการทดลองพบว่าการใช้ชั้นตัวกลางที่เปียกได้ด้วยอนุภาคอิมัลชันในโคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคอิมัลชันได้ดีกว่า และประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ในการแยกอนุภาคอิมัลชันจะเพิ่มขึ้นตามความสามารถเปียกได้ด้วยอิมัลชันที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาทางานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวกลางชนิดเส้นใยมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากอิมัลชันได้ค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวกลางชนิดเม็ด และคุณสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ต่อไปจึงควรศึกษาอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ชั้นตัวกลางชนิดเส้นใย และศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในด้านคุณสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตัวกลาง ซึ่งเป็นแนวทางการวิจัยที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของสแตนเลส นั้น งานวิจัยส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับ การปรับปรุงพื้นผิวเพื่อป้องกันกัดกร่อนหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มเติมลักษณะความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวสแตนเลสที่น่าสนใจและนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่

2.7.6 Bhagat และคณะ (2006) ศึกษาการเคลือบผิวโดยวิธีการจุ่มด้วยสารสังเคราะห์ซิลิกาที่ไม่ชอบน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง (Room temperature synthesis of water repellent silica coatings by the dip coat technique)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารเคลือบผิวของซิลิกาที่ไม่ชอบน้ำบนแผ่นสแตนเลสที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ 1,1,1,3,3,3-เฮกซะเมทิลไดไซลาเซนเป็นสารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifying agent) ให้เกิดความไม่ชอบน้ำ และสามารถเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวที่เคลือบให้มากขึ้นด้วยการเพิ่มความขรุขระของโครงสร้างที่เคลือบอยู่บนผิวพื้นผิวนั้น โดยการควบคุมสัดส่วนโมลาร์ระหว่างเมทานอลกับเตตระเมทอกซีซิลอนในสารเคลือบผิว จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลาร์เป็น 9.1, 18.2 และ 36.4 ทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำขนาด 10 ไมโครลิตรบนพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $72^{\circ}$ ,  $98^{\circ}$  และ  $145^{\circ}$  ตามลำดับ โดยมุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโมลาร์นี้ เกิดจากผลของปริมาณซิลิกาในสารเคลือบผิวที่ลดลง ทำให้โครงสร้างของสารที่เคลือบผิวมีความพรุนสูงและพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้นของพื้นผิวนั้นเอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้บอกถึงข้อดีของวิธีเคลือบผิวสแตนเลสด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และสามารถทำได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง

จากงานวิจัยดังกล่าวมาทั้งหมด พบว่าเส้นใยสแตนเลสมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันได้ดีกว่าตัวกลางชนิดเม็ด อีกทั้งสามารถยังสามารถหาได้ง่าย การปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการ

โคเอเลสเซนส์ได้ จึงเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยทำการศึกษาคำแนะนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้ในโคเอเลสเซอร์ และทำการศึกษาคำแนะนำเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวในงานวิจัยนี้ด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

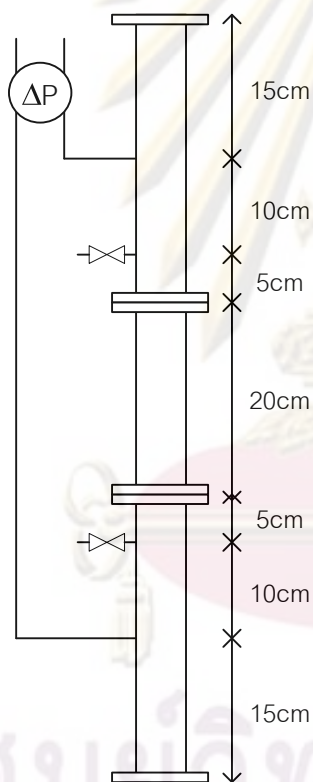
## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

(1) คอลัมน์โคเอเลสเซอร์ ทำจากท่อพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร) ความหนา 3 มิลลิเมตร และมีความสูงรวม 0.8 เมตร โดยมีจุดเก็บตัวอย่างและจุดวัดความดันดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 คอลัมน์โคเอเลสเซอร์

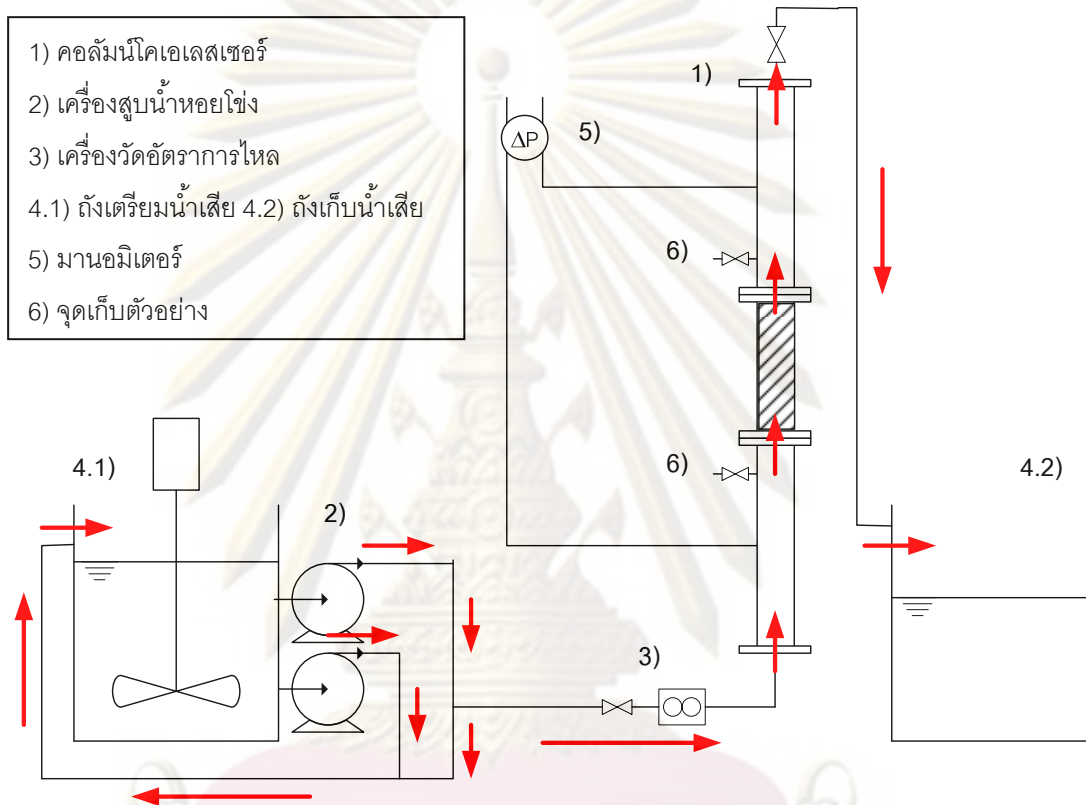
(2) ถังพลาสติก ขนาด 80 ลิตร จำนวน 2 ถัง สำหรับเตรียมและเก็บน้ำเสีย

(3) เครื่องสูบน้ำหยดเชิง อัตราการไหลสูงสุด 35 ลิตรต่อนาที ขนาดกำลัง 0.5 แรงม้า จำนวน 2 เครื่อง

(4) เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ของบริษัท New-Flow Technologies รุ่น FBC-V-S-W-25-LH ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตรต่อชั่วโมง และรุ่น FBC-V-S-W-100-LH ขนาดอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตรต่อชั่วโมง

(5) มานอมิเตอร์ สำหรับวัดความดันลด

โดยติดตั้งอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง โดยลูกศรแสดงทิศทางการไหลของน้ำเสีย

3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสีย

(1) ตู้อบ (Hot air oven) ของบริษัท Memmert รุ่น 600 ที่ให้ความร้อนอุณหภูมิระหว่าง  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส

(2) หลอดย่อยซีโอดี ขนาด 20x150 มิลลิเมตร

(3) บีเวต

(4) บีเปต

(5) ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

(6) กล้องจุลทรรศน์ ของบริษัท Nikon รุ่น YS2-H

(7) กล้องถ่ายภาพดิจิทัลของบริษัท Canon รุ่น EOS 350D

(8) สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate digestion,  $K_2Cr_2O_7$ )

(9) สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) และซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate,  $Ag_2SO_4$ )

(10) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate, FAS)

(11) สารละลายเฟโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator)

(12) น้ำกลั่น

### 3.1.3 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลส

(1) บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

(2) ปากคีบ

(3) แท่งแก้วคนสาร

(4) สารเตตระเอทอกซีซิลเลน (Tetraethoxysilane, TEOS) ของบริษัท Fluka

(5) สารเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน (Hexamethyldisilazane, HMDS) ของบริษัท Acros Organics

(6) เอทานอล (Ethanol, EtOH) ของบริษัท Merck

(7) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

(8) สารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) ของบริษัท Carlo Erba

(9) แผ่นสแตนเลสชนิด 304 ขนาดความกว้าง 1 นิ้ว และความยาว 1 นิ้ว

### 3.1.4 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งเตรียมจากน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน พีทีที วี-120 ชนิดเกรดเดี่ยว SAE 40 มาตรฐาน API SD/CC ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โดยนำน้ำมันเครื่องเทลงในถังเตรียมน้ำเสีย ผสมน้ำประปาให้มีความเข้มข้นของน้ำมันประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำมาปั่นกวนผสมด้วยเครื่องสูบน้ำหยิ่งโดยเปิดเครื่องสูบน้ำเพื่อเวียนน้ำในถังเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันเกิดการกวนผสมเป็นอิมัลชันของน้ำมันในน้ำและกระจายตัวทั่วตลอดทุกส่วนในถังเตรียมน้ำเสีย สามารถอธิบายขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน  
ความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 ลิตร

### 3.1.5 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

(1) เส้นใยสแตนเลสที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

โดยใช้เส้นใยฝอยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ตราฟูจิไบรท์ ของบริษัท ยูนิเวลล์ (เอเชีย)  
จำกัด ขนาดน้ำหนักสุทธิ 14 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวกลางเส้นใยฝอยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง

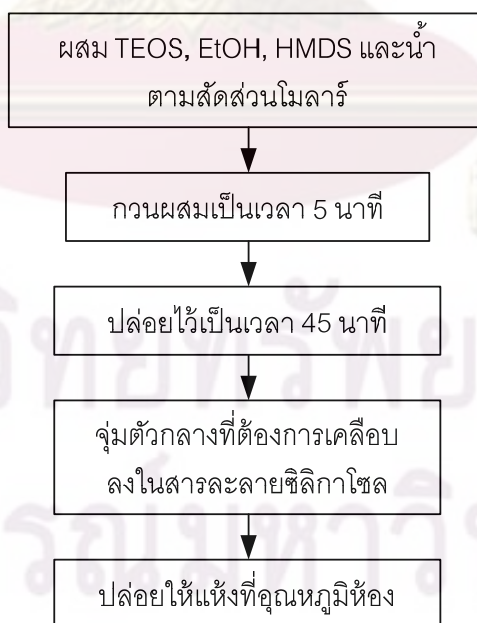


## (2) เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสโดยการเคลือบผิวด้วยสารประกอบของซิลิกา และเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม ซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Bhagat และคณะ (2006) ทำได้โดยการเตรียมสารละลายซิลิกาโซล (Silica sol) ด้วยการผสมสารเตตระเอทอกซีซีลีเนน, เฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน, เอทานอล และน้ำปราศจากไอออน โดยใช้สัดส่วนโมลาร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการกวนผสมสารละลายเป็นเวลา 5 นาทีและปล่อยให้เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นทำการเคลือบผิวสแตนเลสด้วยการจุ่มตัวกลางลงในสารละลายซิลิกาโซลและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง สามารถสรุปขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวได้ดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนโมลาร์ของซิลิกาโซลต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว

ซิลิกาโซล	สัดส่วนโมลาร์			
	TEOS	EtOH	HMDS	H <sub>2</sub> O
A	1	9.1	1	6.6
B	1	18.2	1	6.6
C	1	36.4	1	6.6
D	1	54.6	1	6.6
E	1	72.8	1	6.6



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิว

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ จะดำเนินการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ

#### 3.2.1 ส่วนที่ 1 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 การทดลองที่ 1.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆของตัวกลางเส้นใยสแตนเลส เช่น ลักษณะภายนอก ขนาดหน้าตัด ความหนาแน่นของเส้นใยสแตนเลส และศึกษาพื้นผิวของตัวกลางสแตนเลสและตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายซิลิกาชนิดต่างๆตามวิธีในหัวข้อ 3.1.5 โดยเปรียบเทียบความชอบน้ำของพื้นผิวสแตนเลสและพื้นผิวที่ทำการปรับปรุงด้วยสารละลายซิลิกาชนิดที่ใช้ในการทดลอง เพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยสแตนเลสสำหรับใช้ในการทดลองต่อไป โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.6 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.2



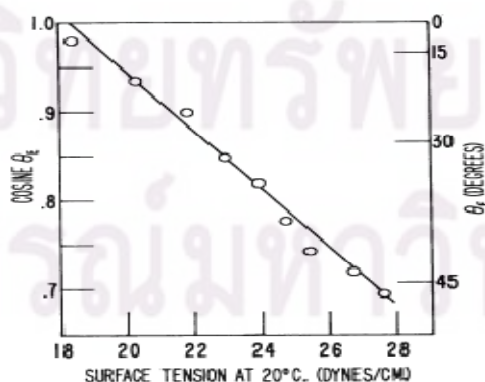
รูปที่ 3.6 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลส และเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการทดลองที่ 1.1

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ชนิดของตัวกลาง	1) แผ่นสแตนเลสและแผ่นสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายซิลิกาโซลชนิด A, B, C, D และ E
ตัวแปรควบคุม 1) วัสดุของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำ	1) แผ่นสแตนเลสชนิด SS304 2) น้ำกลั่น
ตัวแปรตาม 1) ความชอบน้ำของพื้นผิว	1) มุมสัมผัสของของหยดน้ำ

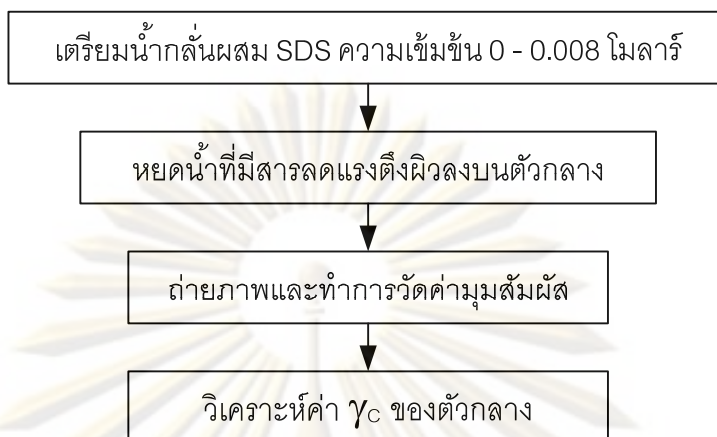
## 3.2.1.2 การทดลองที่ 1.2 การหาค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง

ทำการทดลองหาค่าแรงตึงผิววิกฤต ( $\gamma_c$ ) ของพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสและตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีของซิสแมน (Zisman, 1964) ซึ่งอธิบายว่าเมื่อค่าแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าแรงตึงผิวของพื้นผิวนั้น ของเหลวจะเกิดการเปียก (Wet) บนพื้นผิวหรือมุมสัมผัสของของหยดน้ำบนพื้นผิว ( $\theta$ ) จะมีค่าเท่ากับ 0 องศา โดยวิธีของซิสแมนจะทำการหาค่าของของเหลวต่างๆที่ทราบค่าแรงตึงผิว เช่น น้ำกลั่นผสมสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นต่างๆกัน ลงบนพื้นผิวของตัวกลางและทำการวัดมุมสัมผัส เมื่อนำค่าแรงตึงผิวนี้มาหาความสัมพันธ์กับค่าโคไซน์ของมุมสัมผัสจะได้ความสัมพันธ์เป็นรูปเส้นตรงดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.7 ซึ่งค่าแรงตึงผิวของของเหลวที่ทำให้ค่าโคไซน์ของมุมสัมผัสเท่ากับ 1 ( $\theta = 0$  องศา) คือค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิว ( $\gamma_c$ ) และเท่ากับค่าแรงตึงผิวของพื้นผิวนั้นนั่นเอง



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการหาค่าแรงตึงผิววิกฤตด้วยวิธีของซิสแมน (Zisman, 1964)

โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.8 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.3



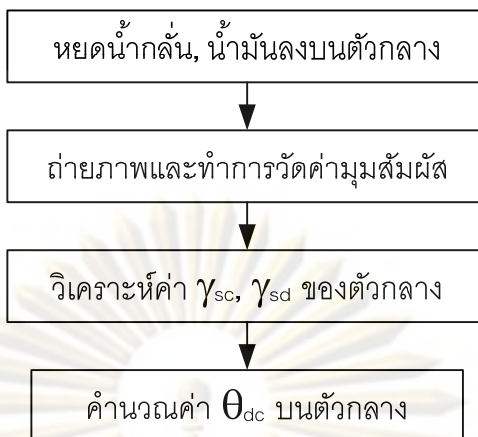
รูปที่ 3.8 การหาค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการทดลองที่ 1.2

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	1) แผ่นสเตนเลสและแผ่นสเตนเลสที่ทำกรปรับปรุงพื้นผิว 2) 0 - 0.008 โมลาร์
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของน้ำ 2) ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	1) น้ำกลั่น 2) SDS
ตัวแปรตาม 1) ค่าแรงตึงผิววิกฤตของตัวกลาง	1) ค่าแรงตึงผิว, มุมสัมผัสของของเหลว

3.2.1.3 การทดลองที่ 1.3 การหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวตัวกลางในน้ำ

ทำการทดลองหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวตัวกลางสเตนเลสและตัวกลางสเตนเลสที่ทำกรปรับปรุงพื้นผิวในน้ำ และทำการคำนวณมุมสัมผัสจากสมการของยัง (สมการที่ 2.4) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลางทั้ง 2 ชนิด โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.9 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 การหาค่ามุมสัมพันธ์ของน้ำมันบนพื้นผิวตัวกลางในน้ำ

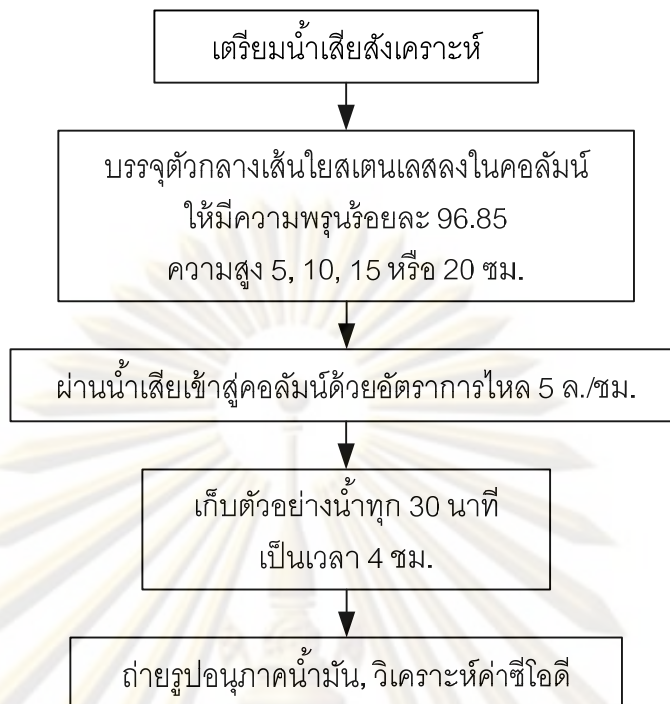
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองที่ 1.3

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ชนิดของตัวกลาง	1) แผ่นสเตนเลสและแผ่นสเตนเลสที่ทำกรปรับปรุงพื้นผิว
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของน้ำ 2) ชนิดของน้ำมัน	1) น้ำกลั่น 2) น้ำมันเครื่อง
ตัวแปรตาม 1) คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวกลาง	1) มุมสัมพันธ์ของน้ำและน้ำมันบนตัวกลาง

3.2.2 ส่วนที่ 2 การศึกษาการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสเตนเลสเป็นตัวกลาง

3.2.2.1 การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสเตนเลสต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.10 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.5

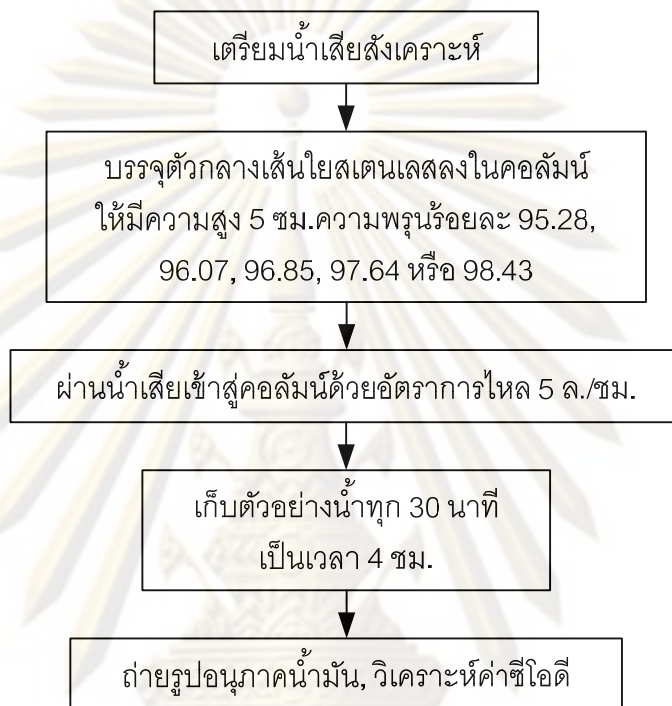


รูปที่ 3.10 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองที่ 2.1

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ความสูงของชั้นตัวกลาง	1) 5, 10, 15 และ 20 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสี้ยว 3) อัตราการไหลของน้ำเสี้ยว 4) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลส 2) น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 ลิตรต่อชั่วโมง 4) ร้อยละ 96.85
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.2.2 การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลาง  
 ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใย  
 สเตนเลสต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.11  
 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.11 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสเตนเลส

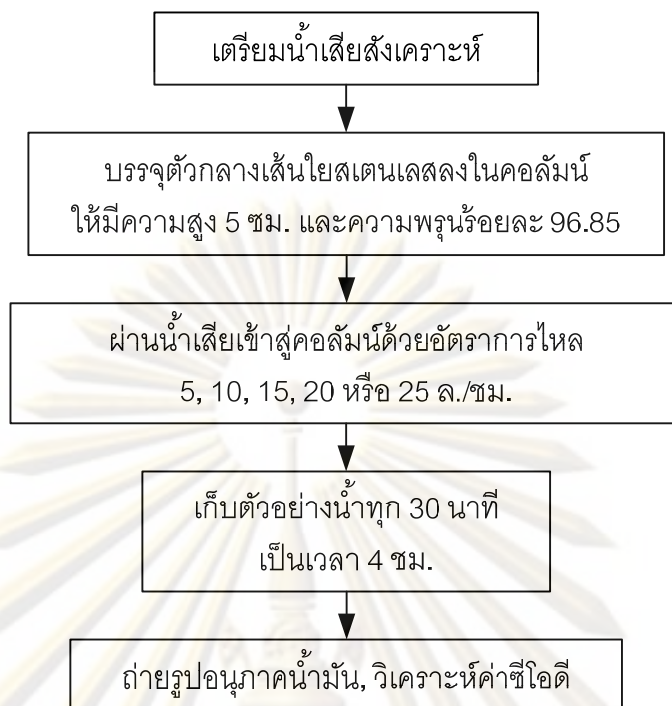
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองที่ 2.2

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) ร้อยละ 95.28, 96.07, 96.85, 97.64 และ 98.43
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสีย 3) อัตราการไหลของน้ำเสีย 4) ความสูงของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลส 2) น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 ลิตรต่อชั่วโมง 4) 5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.2.3 การทดลองที่ 2.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย  
ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพ  
ในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ตัวกลางเส้นใยสแตนเลส โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.12  
และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





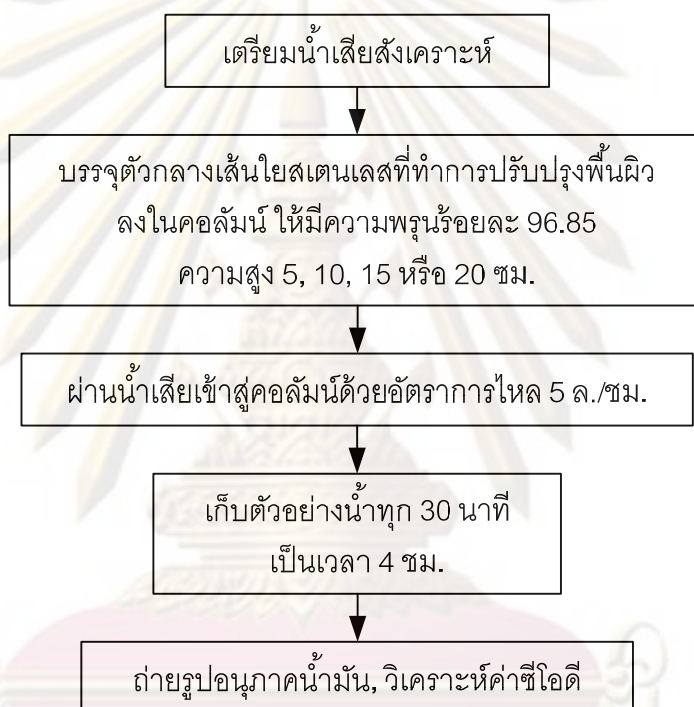
รูปที่ 3.12 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการทดลองที่ 2.3

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) อัตราการไหลของน้ำเสีย	1) 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสีย 3) ความสูงของชั้นตัวกลาง 4) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลส 2) น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 เซนติเมตร 4) ร้อยละ 96.85
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

### 3.2.3 ส่วนที่ 3 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ด้วยตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

3.2.2.1 การทดลองที่ 3.1 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.13 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.8

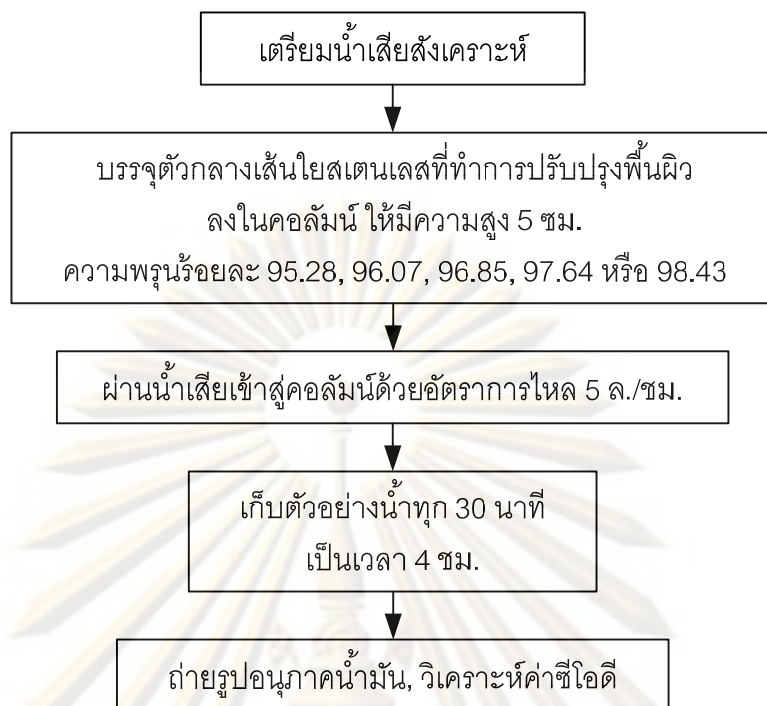


รูปที่ 3.13 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรในการทดลองที่ 3.1

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ความสูงของชั้นตัวกลาง	1) 5, 10, 15 และ 20 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสีย 3) อัตราการไหลของน้ำเสีย 4) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว 2) น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 ลิตรต่อชั่วโมง 4) ร้อยละ 96.85
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.2.2 การทดลองที่ 3.2 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลาง ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.14 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.9

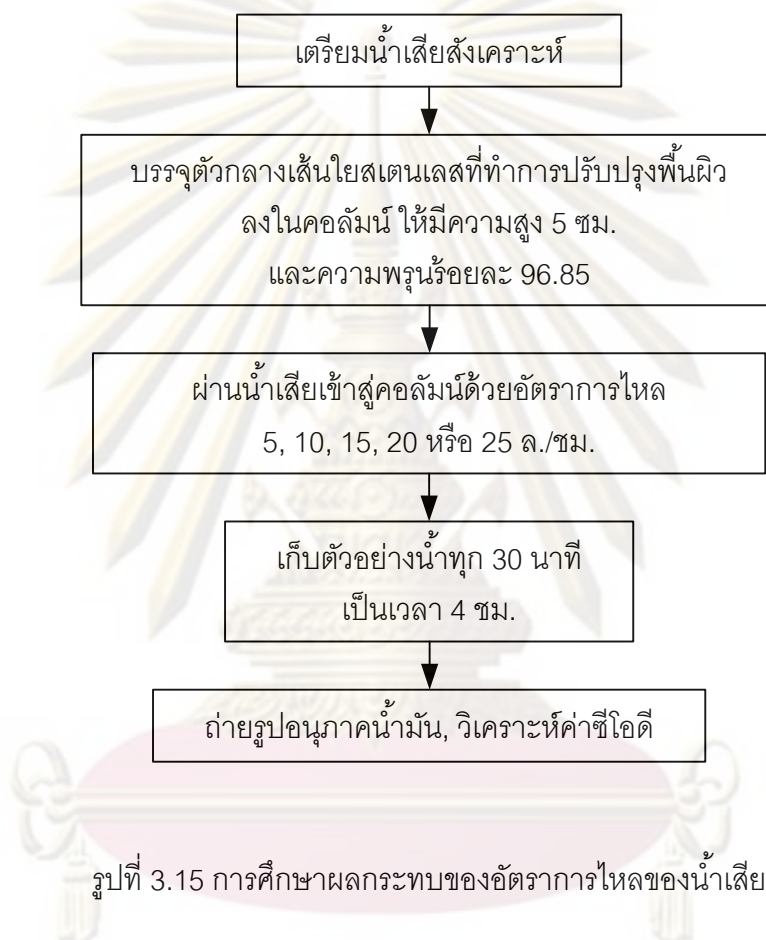


รูปที่ 3.14 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการทดลองที่ 3.2

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) ร้อยละ 95.28, 96.07, 96.85, 97.64 และ 98.43
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสีย 3) อัตราการไหลของน้ำเสีย 4) ความสูงของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว 2) น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 ลิตรต่อชั่วโมง 4) 5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.2.3 การทดลองที่ 3.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย  
 ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพ  
 ในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว โดยมี  
 วิธีการทดลองดังรูปที่ 3.15 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.10



ตารางที่ 3.10 ตัวแปรในการทดลองที่ 3.3

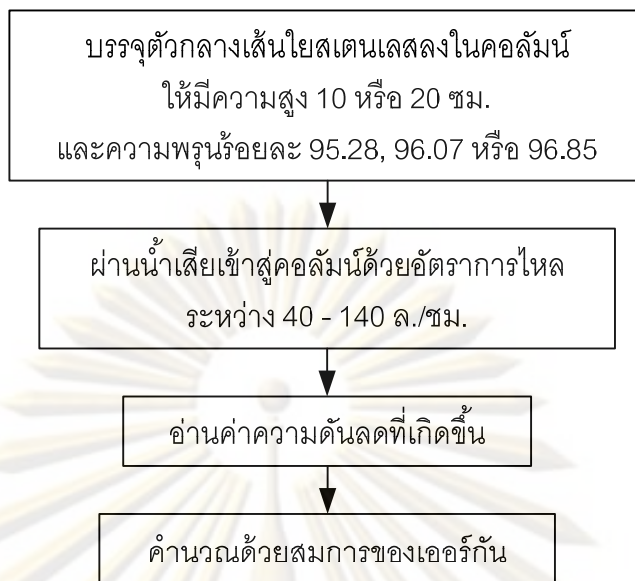
ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) อัตราการไหลของน้ำเสีย	1) 5, 10, 15, 20 และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำเสีย 3) ความสูงของชั้นตัวกลาง 4) ความพรุนของชั้นตัวกลาง	1) เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว 2) น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) 5 เซนติเมตร 4) ร้อยละ 96.85
ตัวแปรตาม 1) ประสิทธิภาพการบำบัด 2) ร้อยละการกระจายขนาดอนุภาคน้ำมัน	1) ค่าซีไอดี 2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน

3.2.4 ส่วนที่ 4 การศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไว้หน่วยกับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

3.2.4.1 การทดลองที่ 4 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในรูปทรงกลม

ทำการทดลองเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยให้อยู่ในรูปของทรงกลม ( $d_p$ ) ด้วยการวัดค่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากชั้นตัวกลางที่มีความพรุนต่างๆ และคำนวณจากสมการของเออร์กัน (Ergun's equation) โดยมีวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.16 และมีตัวแปรต่างๆในการศึกษาดังตารางที่ 3.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในรูปทรงกลม

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรในการทดลองที่ 4

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง, ทำการวัด
ตัวแปรอิสระ 1) อัตราการไหลของน้ำเสีย 2) ความพรุนของชั้นตัวกลาง 3) ความสูงของชั้นตัวกลาง	1) 40 - 140 ลิตรต่อชั่วโมง 2) ร้อยละ 95.28, 96.07 และ 96.85 3) 10 และ 20 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม 1) ชนิดของตัวกลาง 2) ชนิดของน้ำ	1) เส้นใยสแตนเลส 2) น้ำประปา
ตัวแปรตาม 1) ความดันตก	1) ความดันตก

### 3.3 วิธีวิเคราะห์ตัวแปรที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรหรือตัวอย่างที่ทำการศึกษาดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ค่าที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1) ซีไอดี	1) Dichromate close reflux method <sup>(n)</sup>
2) ขนาดอนุภาคน้ำมัน	2) กล้องจุลทรรศน์
4) ความดันลด	4) วัดด้วยมานอมิเตอร์
5) มุมสัมผัสของหยดน้ำ/น้ำมัน	5) วัดด้วย Contact angle tester

ที่มา : (n) APHA, AWWA และ WEF, 1998

โดยทำการวัดประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ด้วยค่าร้อยละการกำจัดซีไอดีของน้ำเสีย ซึ่งสามารถคำนวณค่าร้อยละการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียได้จากสมการที่ 3.1

$$\% \text{COD}_{\text{Removal}} = \frac{\text{COD}_{\text{Influent}} - \text{COD}_{\text{Effluent}}}{\text{COD}_{\text{Influent}}} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่  $\% \text{COD}_{\text{Removal}}$  คือ ร้อยละการกำจัดซีไอดีของน้ำเสีย

$\text{COD}_{\text{Influent}}$ ,  $\text{COD}_{\text{Effluent}}$  คือ ค่าซีไอดีของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดตามลำดับ

และขนาดอนุภาคน้ำมันจะใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Diameter,  $d_{\text{mean}}$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter,  $d_{32}$ ) เป็นตัวแทนขนาดอนุภาคน้ำมัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$d_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3.2)$$

โดยที่  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน

$n$  คือ จำนวนอนุภาคน้ำมัน

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3.3)$$

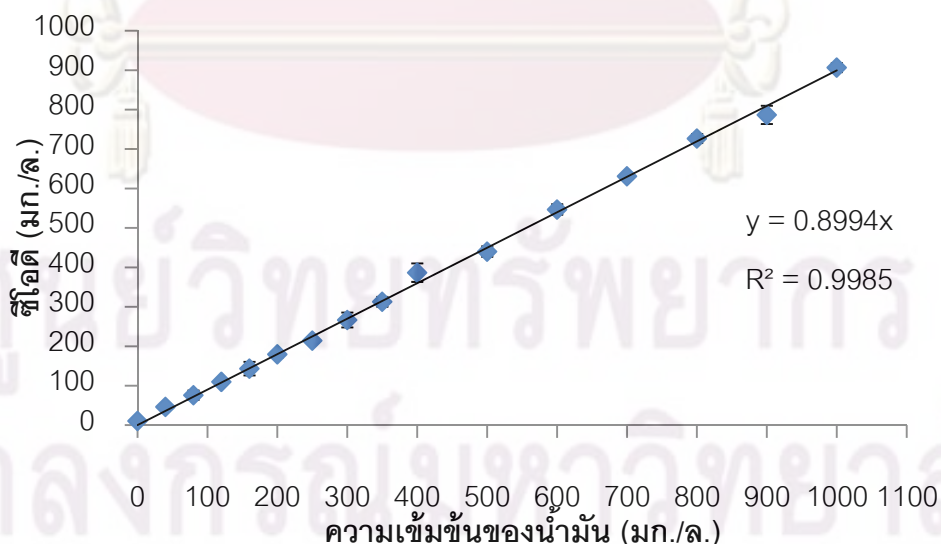


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เตรียมได้ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นจึงสูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่คอลัมน์โคเอเลสเซอร์ แต่เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว อิมัลชันของน้ำมันที่อยู่ในน้ำจึงมีลักษณะเป็นอิมัลชันที่ไม่คงตัว จึงมีน้ำมันบางส่วนที่เกิดการรวมตัวกันและติดอยู่ตามผิวของท่อหรืออุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างการไหลผ่านของน้ำเสียก่อนเข้าสู่คอลัมน์โคเอเลสเซอร์ ทำให้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่คอลัมน์มีความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียน้อยกว่าความเข้มข้นที่เตรียมได้ในถังเตรียมน้ำเสีย โดยในแต่ละการทดลองจะมีความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ทำการลดความแตกต่างและความผิดพลาดนี้ด้วยการทำความสะอาดอุปกรณ์ก่อนการเริ่มต้นในแต่ละรอบการทดลอง และในการศึกษานี้ทำการวัดความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียด้วยการวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD) จึงต้องมีการทำแผนภูมิมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีและความเข้มข้นของน้ำมันที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีและความเข้มข้นของน้ำมัน

ซึ่งจากการศึกษาปริมาณซีไอดีและความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในแผนภูมิมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยปริมาณซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าประมาณร้อยละ 89.94 ของค่าความเข้มข้นน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ และเนื่องจากค่าซีไอดีสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันในน้ำเสีย จึงใช้เป็นหนึ่งในตัวแปรเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโดยการวัดขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ซึ่งจะใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Diameter,  $d_{\text{mean}}$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter,  $d_{32}$ ) เป็นตัวแทนขนาดอนุภาคน้ำมัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$d_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3.2)$$

โดยที่  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน

$n$  คือ จำนวนอนุภาคน้ำมัน

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

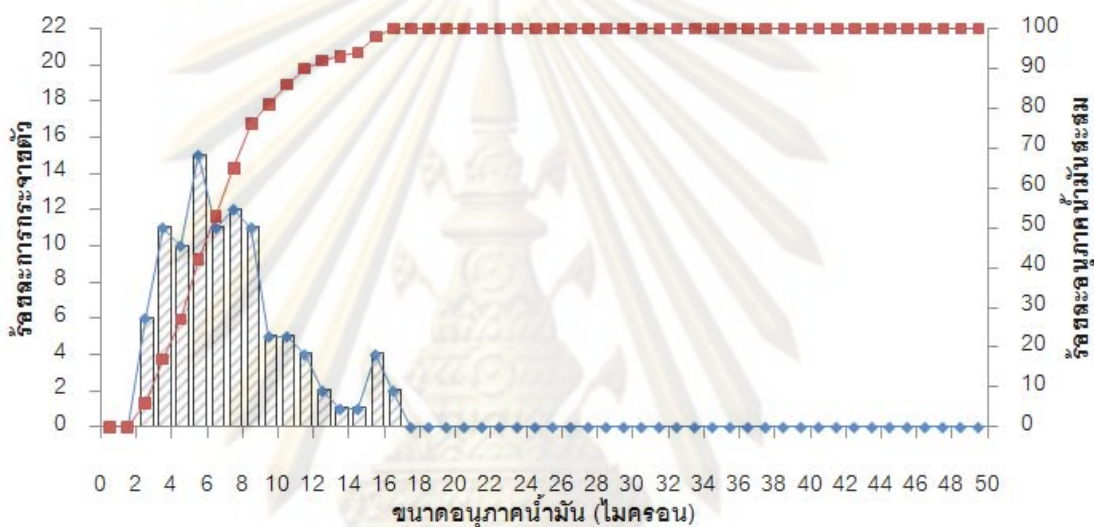
$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีมีลักษณะแตกต่างกัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจะคำนวณบนพื้นฐานของจำนวนอนุภาคน้ำมันที่วัดเป็นหลัก (Number of particles) แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์จะคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยจากเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวที่เท่ากัน (Volume to surface area ratio) ซึ่งนิยมใช้ในการคำนวณการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) หรือทางปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ที่พื้นผิวมีความสำคัญ (พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา) มากกว่า (Allen, 1981)

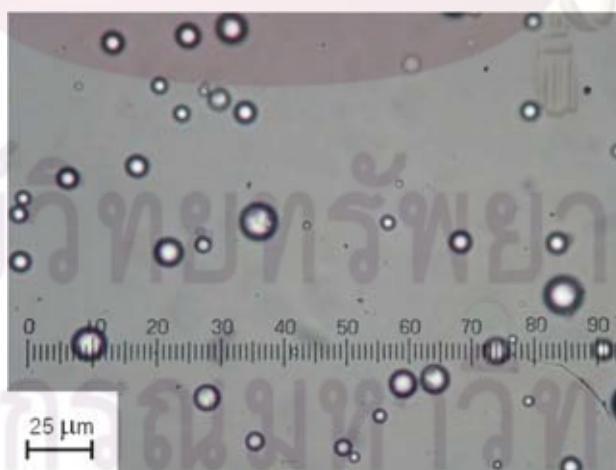
จากการศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เตรียมขึ้นในถังเตรียมน้ำเสีย มีลักษณะสมบัติต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 และมีร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีค่าซีไอดีเท่ากับ 899 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 7.3 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์เท่ากับ 10.5 ไมครอน และอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาแน่นของน้ำ, $\rho_{H_2O}$ (กก./ลบ.ม.)	997
ความหนาแน่นของน้ำมัน, $\rho_{Oil}$ (กก./ลบ.ม.)	880
ความเข้มข้นน้ำมัน (มก./ล.)	1,000
ปริมาณซีไอดี (มก./ล.)	899
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, $d_{mean}$ (ไมครอน)	7.3
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์, $d_{32}$ (ไมครอน)	10.5



รูปที่ 4.2 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.3 อนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ (กำลังขยาย 400 เท่า)

จากร้อยละการกระจายขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ในรูปที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสี้ยวมีขนาดอยู่ระหว่าง 2 - 17 ไมครอน โดยอนุภาคขนาดระหว่าง 5 - 6 ไมครอนมีจำนวนมากที่สุด คือ ร้อยละ 15 ของจำนวนอนุภาคน้ำมันทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นนอกจากมีลักษณะเป็นอิมัลชันตรงของน้ำมันในน้ำและเป็นอิมัลชันที่ไม่คงตัวดังกล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ยังมีลักษณะเป็นอิมัลชันชั้นที่สอง (Secondary emulsion) อีกด้วย (Rachu, 2005) เนื่องจากขนาดของอนุภาคน้ำมันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน จากกฎของของสโตกส์ (สมการที่ 2.9) จะสามารถคำนวณความเร็วในการลอยตัว ( $w$ ) ของอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยที่ขนาด 10.5 ไมครอน ได้เท่ากับ  $7.94 \times 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที หรือต้องใช้เวลาประมาณ 35 ชั่วโมง ในการลอยขึ้นเป็นระยะทาง 1 เมตร ทำให้น้ำเสี้ยวสังเคราะห์นี้ทำการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสี้ยวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกหรือในถังปกติได้ยาก แต่เนื่องจากน้ำเสี้ยวสังเคราะห์เป็นอิมัลชันที่ไม่คงตัว เพราะ ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ทำให้มีความเป็นไปได้ในการรวมอนุภาคน้ำมันในน้ำเสี้ยวด้วยกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมันและสามารถแยกออกจากน้ำเสี้ยวได้ง่ายขึ้น

#### 4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ คือ เส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการวัดลักษณะทางกายภาพภายนอกต่างๆและคำนวณจะมีลักษณะสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.2

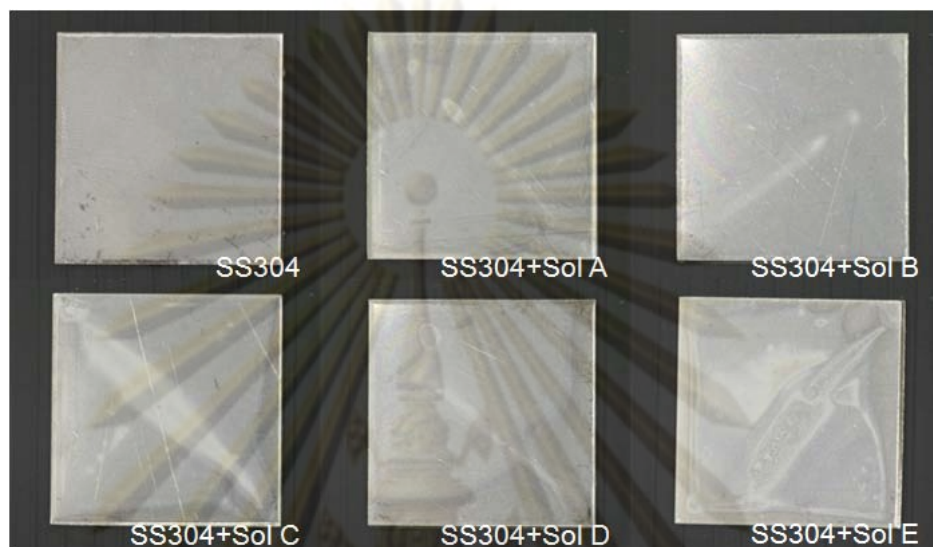
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของวัสดุ	Stainless steel 304 (SS304)
ลักษณะเส้นใย	เป็นมันเงา, แบน
ขนาดหน้าตัดของเส้นใย (กว้างxหนา, ไมครอน)	470x40
ความหนาแน่นของเส้นใย (กก./ลบ.ม.)	5855.79
พื้นที่ผิวสัมผัส (ตร.ซม./ก.)	92.65

##### 4.2.1 ตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

จากการทดลองปรับปรุงพื้นผิวของสแตนเลสด้วยกระบวนการโซลเจล โดยทำการเคลือบผิวของสแตนเลสด้วยสารประกอบของซิลิกาและเฮกซะเมทิลไดซิลานเซน (HMDS) ด้วยวิธีการจุ่ม

ตามวิธีการและสัดส่วนของสารละลายโซลที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะได้พื้นผิวที่มีลักษณะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.4 และทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของสแตนเลสได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5

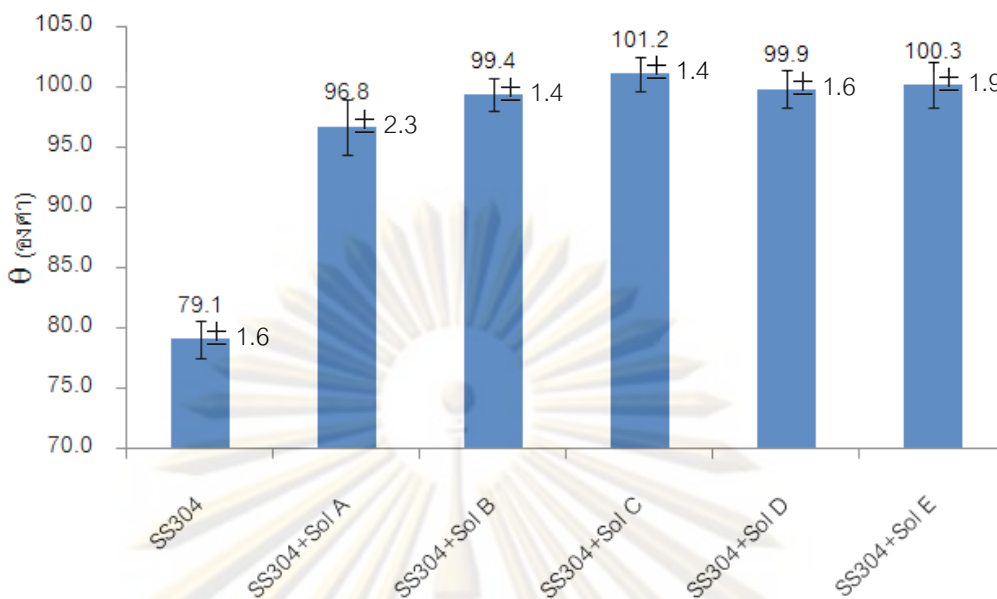


รูปที่ 4.4 พื้นผิวสแตนเลสและพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงด้วยสารละลายโซลสัดส่วนต่างๆ

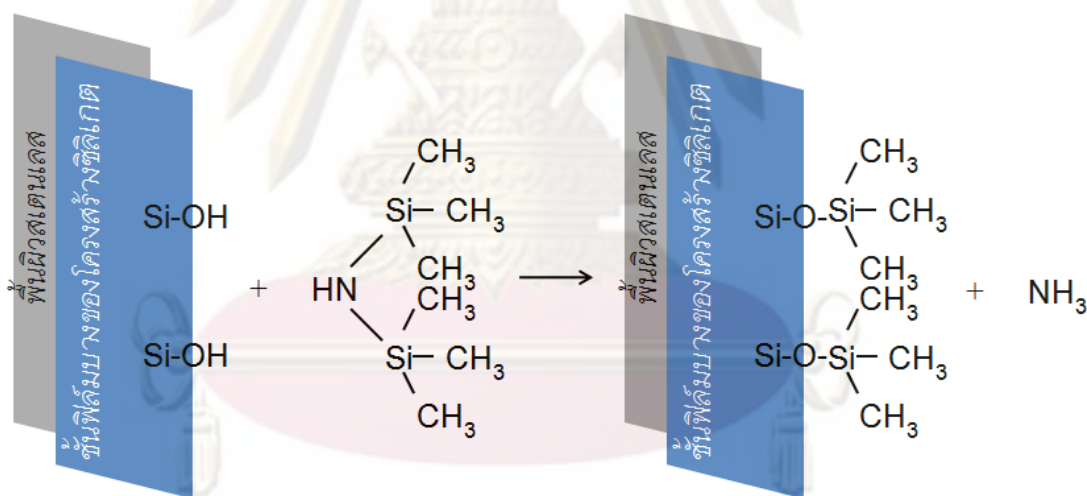
ตารางที่ 4.3 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวดังกล่าวต่างๆ

ชนิดของพื้นผิวดังกล่าว	มุมสัมผัส, $\theta$ (องศา)
สแตนเลส (SS304)	$79.1 \pm 1.6$
สแตนเลสเคลือบด้วย Sol A (SS304+Sol A)	$96.8 \pm 2.3$
สแตนเลสเคลือบด้วย Sol B (SS304+Sol B)	$99.4 \pm 1.4$
สแตนเลสเคลือบด้วย Sol C (SS304+Sol C)	$101.2 \pm 1.4$
สแตนเลสเคลือบด้วย Sol D (SS304+Sol D)	$99.9 \pm 1.6$
สแตนเลสเคลือบด้วย Sol E (SS304+Sol E)	$100.3 \pm 1.9$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



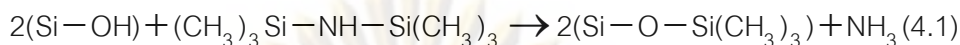
รูปที่ 4.5 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางต่างๆ



รูปที่ 4.6 การต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการเคลือบผิว

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของตัวกลางสแตนเลสที่ถูกจุ่มลงในสารละลายซิลิกาไฮดรอกไซด์ส่วนต่างๆมีลักษณะที่เปลี่ยนไปจากพื้นผิวของสแตนเลสที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยพื้นผิวของตัวกลางที่ถูกจุ่มนี้จะมีลักษณะของชั้นฟิล์มบางสีขาวเคลือบอยู่บนแผ่นสแตนเลส แสดงว่าน่าจะเกิดโครงสร้างของสารอนินทรีย์ที่สามารถเคลือบติดอยู่บนพื้นผิวของสแตนเลส และเมื่อพิจารณามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางพบว่า มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวสแตนเลสมีค่า 79.1 องศา ในขณะที่เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของสแตนเลสจะทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำบน

พื้นผิวมีค่าสูงชันอยู่ระหว่าง 96.8 - 101.2 องศา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 แสดงว่าพื้นผิวที่ถูกปรับปรุงนี้มีความไม่ชอบน้ำสูงชันจากพื้นผิวของสแตนเลสปกติ ซึ่งเกิดจากกลไกการต่อต้านหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์บนโครงสร้างอนินทรีย์หรือโครงสร้างซิลิเกตที่เกิดขึ้น ตามสมการที่ 4.1 และแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสาร TEOS ในสารตั้งต้น ทำให้เกิดโครงสร้างของซิลานอล (Si-OH) ในกระบวนการคอนเดนเซชันที่จะเกิดขึ้นต่อมา ซึ่งทำให้เกิดการสร้างโครงสร้าง 3 มิติของซิลิเกตขึ้น แต่ในสารละลายซิลตั้งต้นมีการเติมสารที่มีหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ คือ สาร HMDS เป็นสารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifying agent) จึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างโครงสร้างของซิลานอลและสารปรับปรุงพื้นผิวขึ้นด้วย ซึ่งทำให้พื้นผิวของโครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้มีความไม่ชอบน้ำซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชัน  $\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  ที่ไปต่อติดกลายเป็นโครงสร้างผสมอนินทรีย์-อินทรีย์ โดยการต่อต้านหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นนี้เป็นการต่อต้านหมู่ฟังก์ชันโดยตรงขณะผลึกก่อตัว (Direct co-condensation) ซึ่งจะได้หมู่ฟังก์ชันไปต่อติดอยู่บนโครงสร้างซิลิเกต ทำให้โครงสร้างที่มีการต่อต้านหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นนี้มีความทนทานต่อการถูกทำลายด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสของโมเลกุลน้ำมากกว่าวิธีการต่อต้านหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีการกราฟต์ (Grafting) ซึ่งจะต่อต้านหมู่ฟังก์ชันเข้ากับหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวที่มีโครงสร้างสมบูรณ์แล้ว

เมื่อพิจารณาเฉพาะมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่ถูกปรับปรุงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของสแตนเลสที่ถูกปรับปรุงด้วยสารละลายซิลิกาซิลิเกตสัดส่วนต่างๆ มีขนาดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นบนตัวกลางสแตนเลสน่าจะไม่มี ความแตกต่างกัน อาจเกิดจากกระบวนการในการสังเคราะห์ที่ดัดแปลงจากวิธีของ Bhagat และคณะ (2006) โดยสารสารเตตระอัลโคซีซิลเลนที่ใช้เป็นสารตั้งต้นแตกต่างกัน คือ TMOS และ TEOS ซึ่งปกติแล้วสาร TEOS จะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าสาร TMOS ในสภาวะเดียวกัน (Schubert และ Husing, 2005) และในการทดลองนี้สัดส่วนปริมาณของสาร HMDS ที่ใช้ในสารตั้งต้นสัดส่วนต่างๆ มีปริมาณมากเกินไปในการทำปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้น จึงอาจทำให้ซิลิกาซิลิเกตที่เกิดขึ้นจากสารตั้งต้นสัดส่วนต่างๆ กันนี้เกิดโครงสร้างขึ้นเคลือบบนผิวตัวกลางที่ไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ต้องการปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางสแตนเลสให้มีความไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสารละลายซิลิเกตที่มีสัดส่วนโมลาร์ที่ทำให้เกิดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่มากที่สุด คือ ซิลิกาซิลิเกตชนิด C ซึ่งมีสัดส่วนของ TEOS:EtOH:HMDS:H<sub>2</sub>O เท่ากับ 1:36.4:1:6.6 ในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสสำหรับการทดลองต่อไป

#### 4.2.2 การหาค่าแรงตึงผิววิกฤต ( $\gamma_c$ ) ของพื้นผิวตัวกลางต่างๆ

ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสแตนเลสและพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวตามวิธีของซิสแมนดังกล่าวในบทที่ 3 เพื่อหาค่าแรงตึงผิวของพื้นผิวที่ต้องการซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าแรงตึงผิววิกฤต (Zisman, 1964) โดยการถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสของหยดของเหลวซึ่งมีแรงตึงผิวที่แตกต่างกันบนพื้นผิว ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

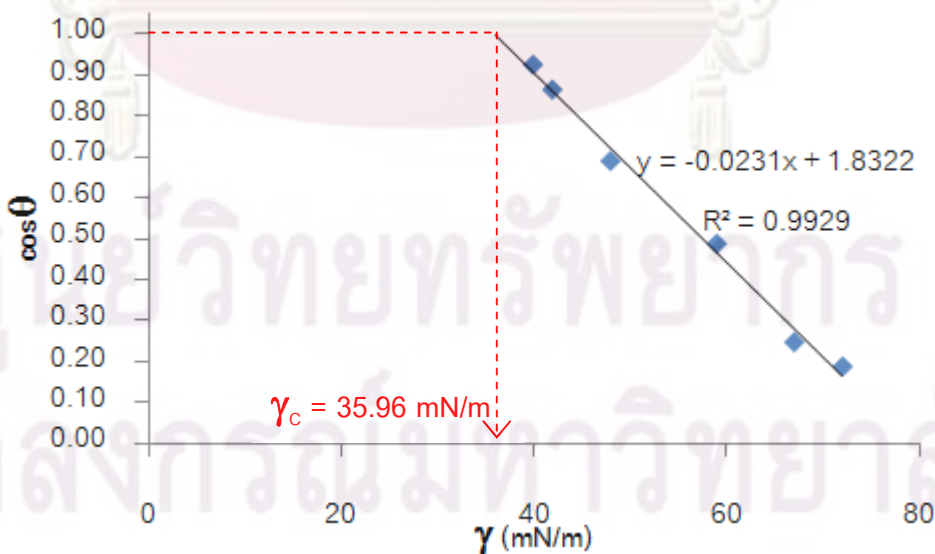
##### 4.2.2.1 พื้นผิวสแตนเลส

ผลการทดลองเพื่อคำนวณค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสแตนเลสแสดงในตารางที่

4.4 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ, แรงตึงผิว และมุมสัมผัสบนพื้นผิวสแตนเลส

ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ (โมลาร์)	แรงตึงผิว, $\gamma$ (mN/m)	มุมสัมผัส, $\theta$ (องศา)	$\cos\theta$
0	72	79.1	0.19
0.001	67	75.6	0.25
0.002	59	60.8	0.49
0.004	48	46.4	0.69
0.006	42	30.3	0.86
0.008	40	22.5	0.92



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและ  $\cos\theta$  ของพื้นผิวสแตนเลส



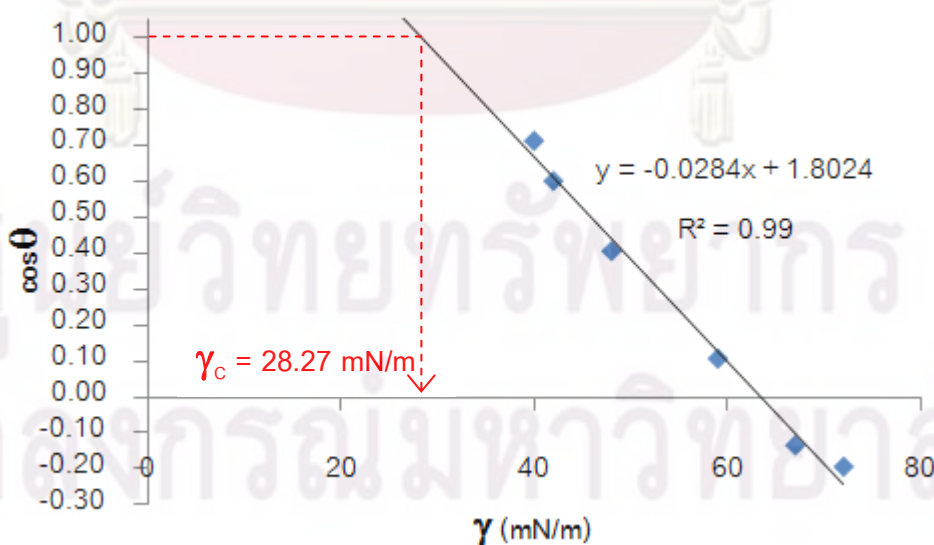
จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าลดลง มุมสัมผัสของของเหลว ก็จะมีขนาดลดลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่า  $\cos\theta$  มีค่าเข้าใกล้ 1 และเมื่อ  $\cos\theta$  มีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่าแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าเท่ากับ 35.96 มิลลินิวตันต่อเมตร ดังนั้นค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสแตนเลส ( $\gamma_{C,SS304}$ ) จึงมีค่าเท่ากับ 35.96 มิลลินิวตันต่อเมตร

#### 4.2.2.2 พื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ผลการทดลองเพื่อคำนวณค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ, แรงตึงผิว และมุมสัมผัสบนพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ความเข้มข้นของ SDS ในน้ำ (โมลาร์)	แรงตึงผิว, $\gamma$ (mN/m)	มุมสัมผัส, $\theta$ (องศา)	$\cos\theta$
0	72	101.1	-0.19
0.001	67	97.6	-0.13
0.002	59	83.8	0.11
0.004	48	66.0	0.41
0.006	42	53.0	0.60
0.008	40	44.5	0.71



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและ  $\cos\theta$  ของพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าลดลง มุมสัมผัสของของเหลว ก็จะมีขนาดลดลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่า  $\cos\theta$  มีค่าเข้าใกล้ 1 และเมื่อ  $\cos\theta$  มีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่าแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าเท่ากับ 28.27 มิลลินิวตันต่อเมตร ดังนั้นค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ( $\gamma_{C,MOD}$ ) จึงมีค่าเท่ากับ 28.27 มิลลินิวตันต่อเมตร

จากการทดลองคำนวณค่าแรงตึงผิววิกฤตของพื้นผิวดังกล่าวต่าง ๆ นี้ ทำให้สามารถหาค่าแรงตึงผิวของพื้นผิวสแตนเลสและพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวได้เท่ากับ 35.96 และ 28.27 มิลลินิวตันต่อเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ เพราะ พื้นผิวสแตนเลสมีแรงตึงผิวมากกว่า จึงทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมีขนาดเล็กกว่า

#### 4.2.3 การหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวดังกล่าวต่างๆในน้ำ ( $\theta_{dc}$ )

เนื่องจากเราไม่สามารถวัดขนาดมุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวดังกล่าวในน้ำได้โดยตรง จึงต้องทำการคำนวณมุมสัมผัสนี้จากค่าตัวแปรอื่นๆในสมการ ซึ่งจากสมการของยัง (สมการที่ 2.4) พบว่าเราสามารถคำนวณหาค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวดังกล่าวต่างๆในน้ำได้จากค่าแรงตึงระหว่างผิวต่างๆ คือ แรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำ ( $\gamma_{sc}$ ) ของตัวกลางกับน้ำมัน ( $\gamma_{sd}$ ) และของน้ำมันกับน้ำ ( $\gamma_{dc}$ ) ซึ่งค่าเหล่านี้ก็สามารถคำนวณได้จากสมการของยังระหว่างหยดของเหลวบนของแข็งในอากาศเช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 4.2 โดยคำนวณจากผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta_{lv} \quad (4.2)$$

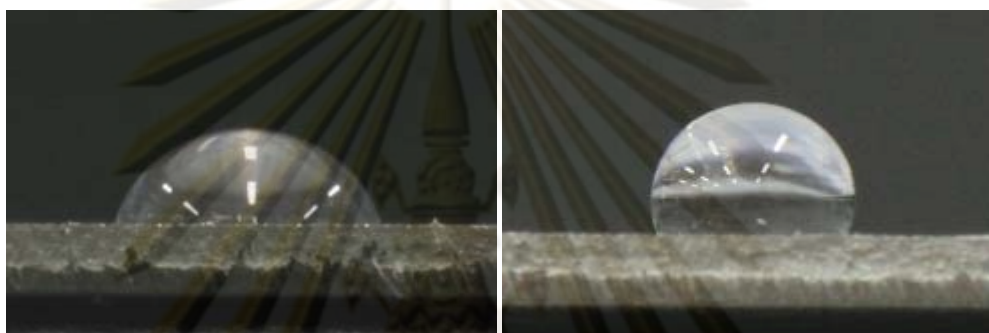
โดยที่	$\gamma_{sv}$	คือ แรงตึงระหว่างผิวของของแข็งกับอากาศ
	$\gamma_{sl}$	คือ แรงตึงระหว่างผิวของของแข็งกับของเหลว
	$\gamma_{lv}$	คือ แรงตึงระหว่างผิวของของเหลวกับอากาศ
	$\theta_{lv}$	คือ มุมสัมผัสบนของแข็งของหยดของเหลวในอากาศ

##### 4.2.3.1 การหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำ ( $\gamma_{sc}$ )

จากการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางต่างๆกับน้ำ โดยการหยดน้ำลงบนพื้นผิวดังกล่าวแล้วถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำในอากาศ จะสามารถคำนวณค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำที่ต้องการได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวดังกล่าวในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรในการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำ

ตัวแปร	สแตนเลส	สแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว
มุมสัมผัส, $\theta$ (องศา)	79.1	101.1
$\cos\theta$	0.19	-0.19
$\gamma_s$ , (mN/m)	35.96	28.27
$\gamma_c$ , (mN/m)	72.00	72.00
$\gamma_{sc}$ , (mN/m)	22.34	42.11



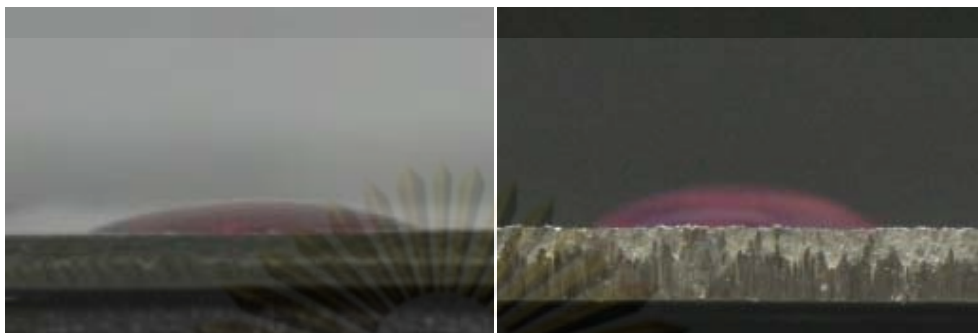
รูปที่ 4.9 หยดน้ำในอากาศบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย)  
และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา)

#### 4.2.3.2 การหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำมัน ( $\gamma_{sd}$ )

จากการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางต่างๆกับน้ำมัน โดยการหยดน้ำมันลงบนพื้นผิวตัวกลางแล้วถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำมันในอากาศ จะสามารถคำนวณค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำมันที่ต้องการได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปถ่ายหยดน้ำมันบนพื้นผิวตัวกลางในรูปที่ 4.10

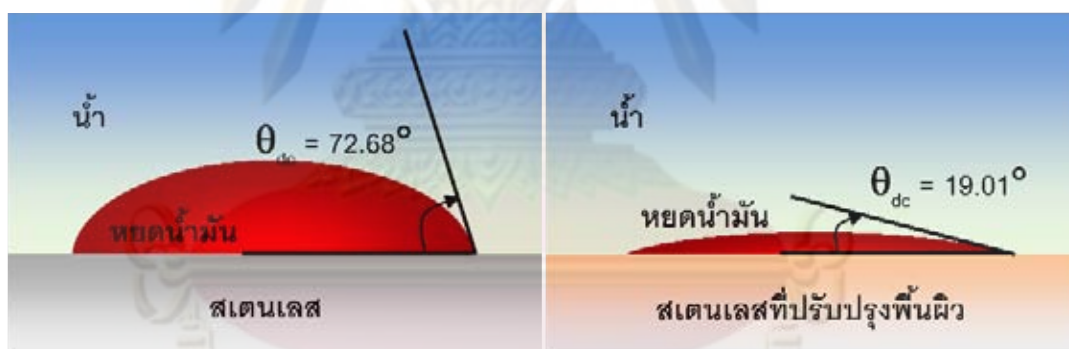
ตารางที่ 4.7 ตัวแปรในการทดลองหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำมัน

ตัวแปร	สแตนเลส	สแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว
มุมสัมผัส, $\theta$ (องศา)	24.6	32.6
$\cos\theta$	0.91	0.84
$\gamma_s$ , (mN/m)	35.96	28.27
$\gamma_d$ , (mN/m)	27.90	27.90
$\gamma_{sd}$ , (mN/m)	10.58	4.77



รูปที่ 4.10 หยดน้ำมันในอากาศบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย)  
และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา)

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าค่าแรงดึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำและค่าแรงดึงระหว่างผิวของตัวกลางกับน้ำมันของพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 22.34 และ 10.58 มิลลินิวตันต่อเมตร ตามลำดับ และสำหรับพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 42.11 และ 4.77 มิลลินิวตันต่อเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 มุมสัมผัสของหยดน้ำมันในน้ำบนพื้นผิวตัวกลางสแตนเลส (ซ้าย)  
และตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว (ขวา)

จากการคำนวณค่าแรงดึงระหว่างผิวของน้ำและน้ำมันกับตัวกลางต่างๆ ทำให้เราสามารถคำนวณมุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำได้ตามสมการของยังที่กล่าวถึงข้างต้น โดยแรงดึงระหว่างผิวของน้ำมันกับน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 39.50 มิลลินิวตันต่อเมตร ดังนั้นค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำสำหรับพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 72.68 องศา และสำหรับพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 19.01 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวกลางสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำ

มากกว่าพื้นผิวของสแตนเลสปกติ เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันในน้ำที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการนำเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมาเป็นตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียจากตัวกลางเส้นใยสแตนเลสปกติ เนื่องจากจะทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่เกิดการรวมตัวกันด้วยกลไกโคเอเลสเซนซ์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจากความชอบน้ำมันที่มากขึ้นของพื้นผิวได้ โดยจะได้ทำการศึกษาในการทดลองต่อไป

#### 4.3 การศึกษาอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความสูงของชั้นตัวกลาง ความพรุนของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสีย ซึ่งทำการวัดประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ด้วยค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของน้ำเสีย เนื่องจากในแต่ละการทดลองความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียดังกล่าวที่เข้าสู่คอลัมน์โคเอเลสเซอร์จะมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา โดยสามารถคำนวณค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียได้จากสมการที่ 3.1

$$\% \text{COD}_{\text{Removal}} = \frac{\text{COD}_{\text{Influent}} - \text{COD}_{\text{Effluent}}}{\text{COD}_{\text{Influent}}} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่  $\% \text{COD}_{\text{Removal}}$  คือ ร้อยละการกำจัดซีโอดีของน้ำเสีย

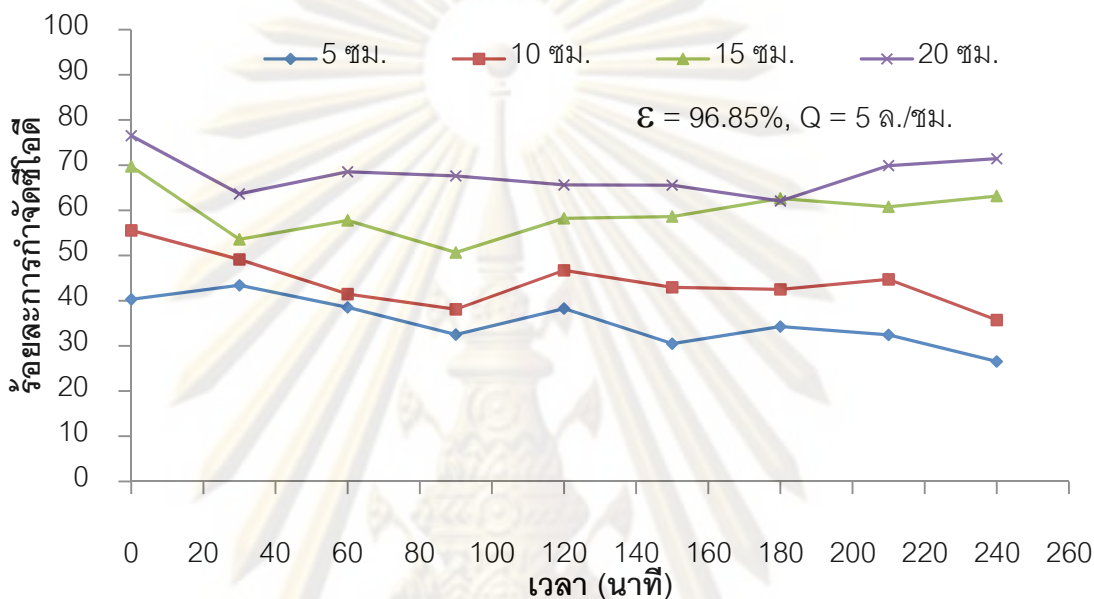
$\text{COD}_{\text{Influent}}$ ,  $\text{COD}_{\text{Effluent}}$  คือ ค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดตามลำดับ

และทำการวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากชั้นตัวกลางในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียกับน้ำเสียดังกล่าวด้วย

##### 4.3.1 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง

จากผลการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง และบรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสความพรุนร้อยละ 96.85 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าในช่วงความสูงของชั้นตัวกลางที่ทำการศึกษา คือ 5 - 20 เซนติเมตร อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 68 โดยเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางให้สูงขึ้น อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะสามารถกำจัดซีโอดีได้มากขึ้นด้วย และจะกำจัดซีโอดีได้

มากที่สุดที่ความสูงของชั้นตัวกลางมีค่า 20 เซนติเมตร ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความสูงของชั้นตัวกลางที่สูงขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณของตัวกลางมีมากขึ้นและการไหลผ่านชั้นตัวกลางของอนุภาคน้ำมันเกิดนานขึ้น ส่งผลให้เกิดการดักจับอนุภาคน้ำมันภายในชั้นตัวกลางในปริมาณที่มากขึ้นหรือเกิดกลไกของการกรองอนุภาคน้ำมันในชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีค่าที่มากขึ้นด้วย



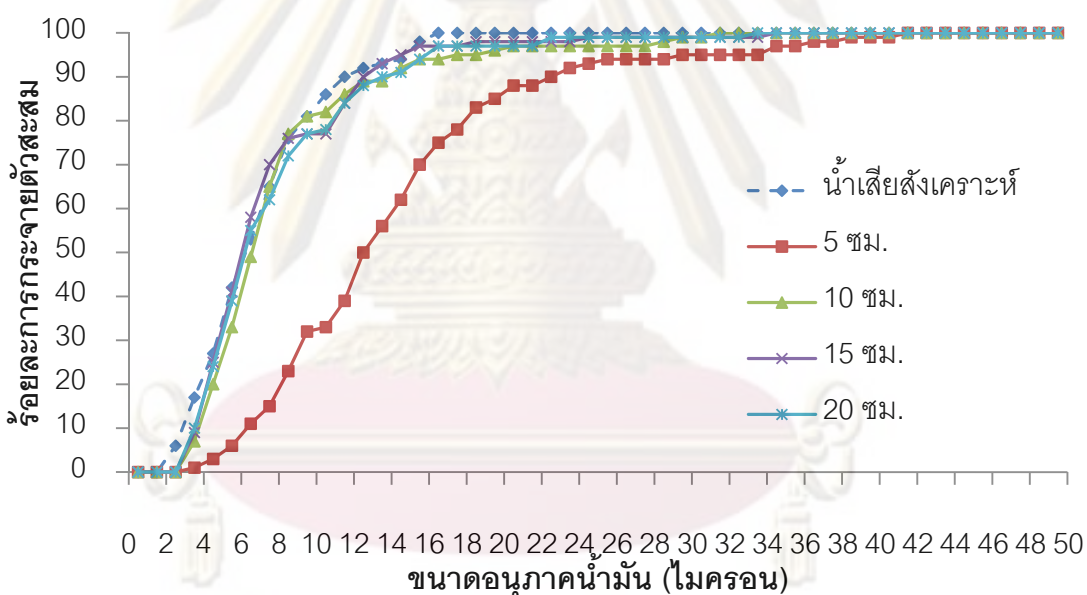
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของความสูงของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ความสูงต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{mean}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 7.3 ไมครอน เป็น 7.9 - 14.4 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 14.8 - 22.6 ไมครอน โดยน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางสูง 5 เซนติเมตร จะมีขนาดเฉลี่ยทั้งสองชนิดใหญ่ที่สุด คือ  $d_{mean} = 14.4$  ไมครอนและ  $d_{32} = 22.6$  ไมครอน ซึ่งเมื่อพิจารณาร้อยละการกระจายตัวสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางสูง 5 เซนติเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน แสดงว่าอนุภาคน้ำมันเกิดการรวมตัวกันได้มากกว่าก่อนจะหลุดออกจากชั้นตัวกลางหรือเกิดกลไกการโคเอเลสเซนซ์ได้มาก ทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น ต่างจากอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านตัวกลางสูง 10 - 20 เซนติเมตร ที่มีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวกลายเป็นอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กอีก

ครั้งเมื่ออนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันแล้วเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีความสูงมากเกินไป (Sokolovic และคณะ, 2007)

ตารางที่ 4.8 ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่ ความสูงต่างๆ

	$d_{mean}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )
น้ำเสียสังเคราะห์	7.3	10.5
ผ่านตัวกลางสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร	14.4	22.6
ผ่านตัวกลางสแตนเลสสูง 10 เซนติเมตร	8.4	16.5
ผ่านตัวกลางสแตนเลสสูง 15 เซนติเมตร	7.9	14.8
ผ่านตัวกลางสแตนเลสสูง 20 เซนติเมตร	8.2	14.9

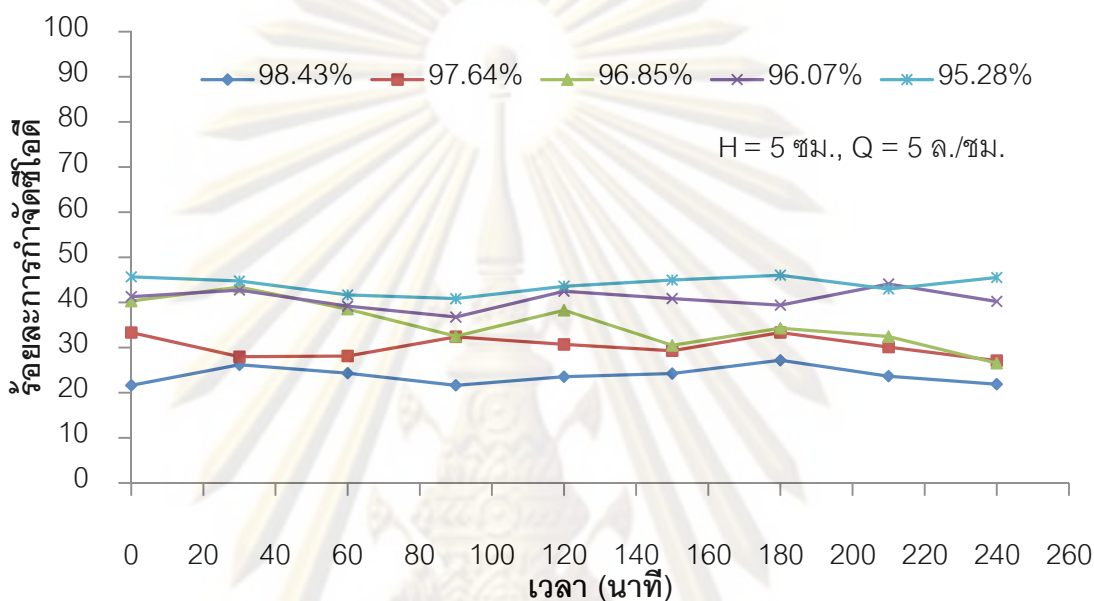


รูปที่ 4.13 ร้อยละการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน ในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่มีความสูงต่างๆ

จะเห็นได้ว่าความสูงของชั้นตัวกลางมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยเมื่อความสูงมีค่ามาก จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงซึ่งเกิดจากกลไกการกรองของชั้นตัวกลาง แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมาจากชั้นตัวกลางที่มีขนาดใหญ่มีจำนวนน้อย เนื่องจากอาจเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคนขนาดเล็กอีกครั้งได้

ซึ่งเป็นลักษณะที่เราไม่ต้องการ ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่าความสูงของชั้นตัวกลาง 5 เซนติเมตร จะทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งเกิดจากกลไกโคเอเลสเซนซ์และเป็นลักษณะของอนุภาคน้ำมันที่เราต้องการ

#### 4.3.2 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลาง



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความพรุนของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

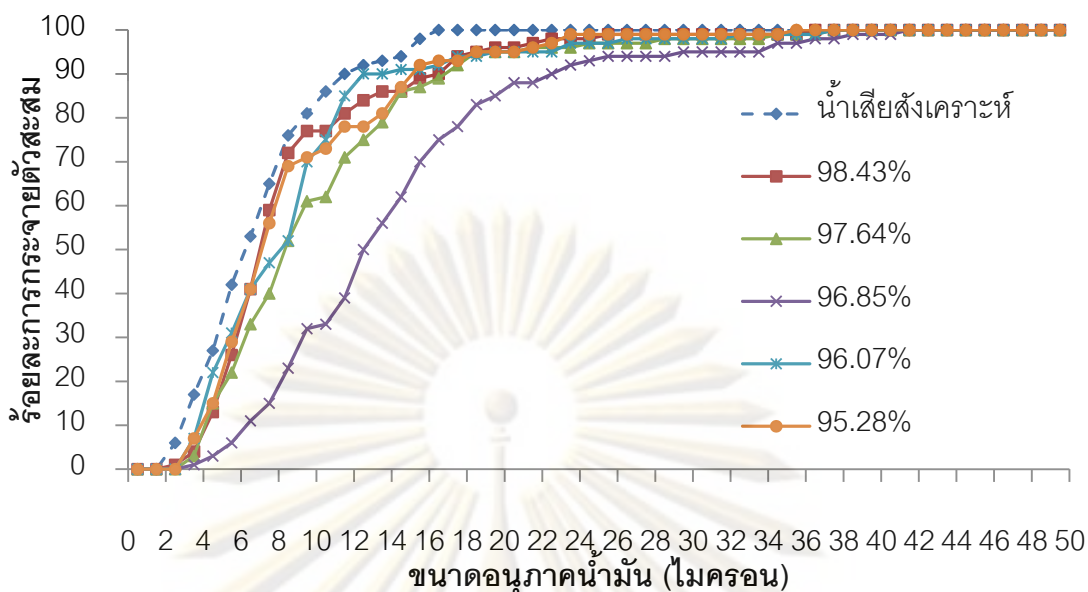
จากการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง และบรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสความสูง 5 เซนติเมตร ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าในช่วงความพรุนของชั้นตัวกลางที่ทำการศึกษา คือ ร้อยละ 98.43 - 95.28 อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 24 - 44 โดยความพรุนของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีความสามารถในการกำจัดซีไอดีได้ลดลง และกำจัดซีไอดีได้น้อยที่สุดที่ความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่าร้อยละ 98.43 ซึ่งค่าความพรุนของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้นนี้ (ปริมาณเส้นใยสแตนเลสน้อยลงในชั้นตัวกลางที่มีความสูงเท่ากัน) ทำให้พื้นที่ผิวภายในชั้นตัวกลางมีค่าลดลง ส่งผลต่อการเข้าชนตัวกลางของอนุภาคน้ำมันให้เกิดการยึดติดและรวมตัวกันได้น้อยลงหรือเกิดกลไกการกรองน้อยนั่นเอง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ลดลงด้วย



เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ ความพรุนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{mean}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 7.3 ไมครอน เป็น 9.1 - 14.4 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 16.3 - 22.6 ไมครอน โดยน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีความพรุนร้อยละ 96.85 จะมีขนาดเฉลี่ยทั้งสองชนิดใหญ่ที่สุด คือ  $d_{mean} = 14.4$  ไมครอนและ  $d_{32} = 22.6$  ไมครอน และจะเห็นได้ว่าร้อยละการกระจายตัวสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะมีอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีขนาดใหญ่จำนวนเพิ่มมากขึ้นในทุกๆค่าความพรุน โดยอนุภาคขนาดใหญ่จะมีจำนวนเพิ่มมากที่สุดเมื่อชั้นตัวกลางมีความพรุนร้อยละ 96.85 นอกจากนี้เมื่อแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่มีความพรุนน้อยกว่าร้อยละ 96.85 และมากกว่าร้อยละ 96.85 จะพบว่าทั้ง 2 ช่วงนี้ จะมีจำนวนอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่าน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีความพรุนร้อยละ 96.85 ซึ่งน่าจะเกิดจากช่วงที่มีค่าความพรุนน้อยกว่าค่านี้ พื้นที่ผิวภายในชั้นตัวกลางจะมีค่ามากเกินไปจึงทำให้เกิดการชนกับชั้นตัวกลางและเกิดกลไกการกรองมากกว่าการเกิดกลไกโคเอเลสเซนซ์ ในทางกลับกันช่วงที่มีค่าความพรุนมากกว่าค่านี้ พื้นที่ผิวภายในชั้นตัวกลางจะมีค่าน้อย ทำให้อนุภาคบางส่วนไม่เกิดการชนกับชั้นตัวกลางและรวมตัวกับอนุภาคอื่นๆหรือเกิดกลไกโคเอเลสเซนซ์ได้น้อย ทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมาจากทั้ง 2 ช่วงมีจำนวนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ น้อยนั่นเอง

ตารางที่ 4.9 ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่ ความพรุนต่างๆ

	$d_{mean}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )
น้ำเสียสังเคราะห์	7.3	10.5
ผ่านตัวกลางสแตนเลสความพรุน 98.43%	9.1	16.6
ผ่านตัวกลางสแตนเลสความพรุน 97.64%	10.4	18.5
ผ่านตัวกลางสแตนเลสความพรุน 96.85%	14.4	22.6
ผ่านตัวกลางสแตนเลสความพรุน 96.07%	9.3	18.2
ผ่านตัวกลางสแตนเลสความพรุน 95.28%	9.2	16.3



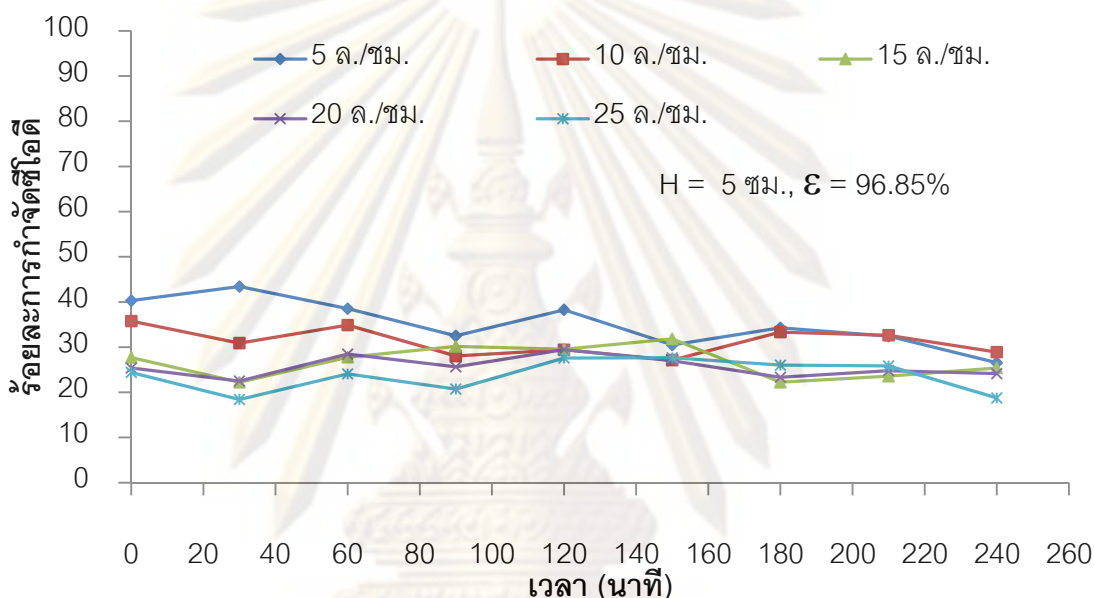
รูปที่ 4.15 ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมัน  
ในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่ความพรุนต่างๆ

จะเห็นได้ว่าความพรุนของชั้นตัวกลางมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยเมื่อความพรุนมีค่ามากประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะมีค่าน้อย เนื่องจากชั้นตัวกลางเกิดกลไกการกรองอนุภาคน้ำมันไว้ได้น้อย ในขณะที่เดียวกันจากการศึกษานี้พบว่าที่ค่าความพรุนร้อยละ 96.85 เป็นค่าความพรุนที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งเกิดจากกลไกโคเอเลสเซนซ์และเป็นลักษณะของอนุภาคน้ำมันที่เราต้องการ

#### 4.3.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสความสูง 5 เซนติเมตร และมีความพรุนร้อยละ 96.85 พบว่าในช่วงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ทำการศึกษา คือ 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมง อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 24 โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะลดลง เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดการเข้าชนของอนุภาคน้ำมันกับชั้นตัวกลางแต่ในขณะเดียวกันความเร็วการไหลที่สูงขึ้นนี้ก็ทำให้เกิดแรงเฉือนและความปั่นป่วนจึงส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่กับตัวกลางหลุดออกจากตัวกลางได้ง่ายเช่นกัน ทำให้มีค่าซีโอดีของน้ำมันอยู่ในน้ำที่ผ่านชั้นตัวกลางสูงขึ้น และอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

จะกำจัดซีไอได้ดีมากที่สุดที่อัตราการไหลของน้ำเสียมีค่า 5 ลิตรต่อชั่วโมง หรือมีความเร็วการไหลตามผิว (Superficial velocity,  $v_0$ ) เท่ากับ 0.91 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Sokolovic และคณะ (1997) ที่ความเร็วการไหลวิกฤตของชั้นตัวกลางเท่ากับ 0.89 มิลลิเมตรต่อวินาที และการทดลองของ Li และ Gu (2005) ที่ความเร็วการไหลตามผิวเท่ากับ 1.07 มิลลิเมตรต่อวินาที จะทำให้อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพดีที่สุด นอกจากนี้ Wanichkul (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วมวลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์และพบว่า การเพิ่มความเร็วการไหลจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงเช่นกัน



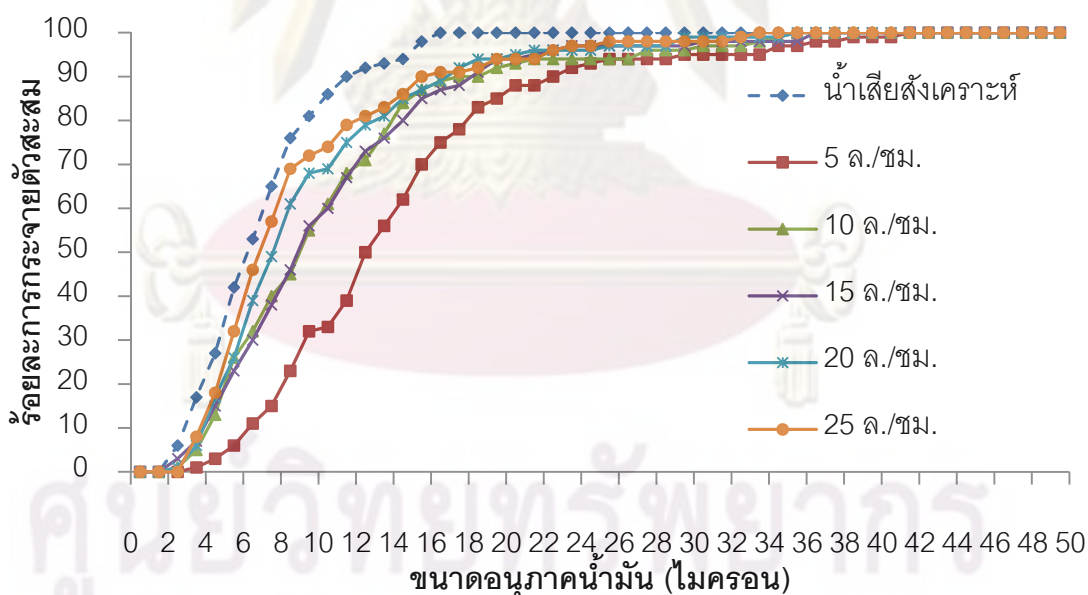
รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่มีอัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $d_{mean}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 7.3 ไมครอน เป็น 9.3 - 14.4 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 17.8 - 22.6 ไมครอน โดยอัตราการไหลของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลาง 5 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมา มีขนาดเฉลี่ยทั้งสองชนิดใหญ่ที่สุด คือ  $d_{mean} = 14.4$  ไมครอน และ  $d_{32} = 22.6$  ไมครอน ซึ่งเมื่อพิจารณาร้อยละการกระจายตัวสะสมของอนุภาคน้ำมันขนาดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าจะมีอนุภาคน้ำมันที่ผ่านชั้นตัวกลางขนาดใหญ่จำนวนเพิ่มขึ้นในทุกอัตราการไหลของน้ำเสีย โดยอนุภาคขนาดใหญ่จะมีจำนวนเพิ่มมากที่สุดที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อชั่วโมง และจำนวนอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีจำนวนน้อยลงตามอัตราการไหลของน้ำเสีย

ที่สูงขึ้น เนื่องจากความเร็วการไหลที่สูงขึ้นนี้ ทำให้เกิดแรงเฉือนและความปั่นป่วนภายในชั้นตัวกลาง (เลขเรย์โนลด์ตามสมการที่ 2.31 มีค่าสูงขึ้น) จึงส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่กับตัวกลางบางส่วนหลุดออกจากตัวกลางก่อนที่จะมีการรวมตัวกับอนุภาคอื่นให้มีขนาดใหญ่อีก อนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่ที่ออกมาจึงมีจำนวนน้อยกว่าของอัตราการไหลที่เหมาะสมนั่นเอง

ตารางที่ 4.10 ขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์เส้นใยสแตนเลสที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ

	$d_{mean}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{32}$ ( $\mu\text{m}$ )
น้ำเสียสังเคราะห์	7.3	10.5
อัตราการไหล 5 ลิตรต่อชั่วโมง	14.4	22.6
อัตราการไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง	10.9	20.2
อัตราการไหล 15 ลิตรต่อชั่วโมง	10.8	19.2
อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง	9.8	18.1
อัตราการไหล 25 ลิตรต่อชั่วโมง	9.3	17.8



รูปที่ 4.17 ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านโคเอเลสเซอร์ที่อัตราการไหลต่างๆ

จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำเสียมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียมีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคน้ำมันจะหลุดจากชั้นตัวกลางมาอยู่ในน้ำเสียได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจากการศึกษานี้พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด



รูปที่ 4.18 อนุภาคน้ำมันบางส่วนติดอยู่บนชั้นตัวกลาง (ซ้าย) และอนุภาคน้ำมันที่รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่หลุดออกจากชั้นตัวกลาง (ขวา)

จากการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางในหัวข้อนี้แล้ว จะเห็นได้ว่าตลอดช่วงเวลาของการเดินระบบจะมีน้ำมันบางส่วนที่หายไป (ปริมาณของค่าซีโอดีน้ำเสียที่เข้าและออกจากตัวกลางไม่เท่ากัน) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ภายในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งส่งผลให้มีน้ำมันบางส่วนติดค้างอยู่บนชั้นตัวกลางหรือเกิดกลไกการกรองขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ซ้าย) โดยอนุภาคน้ำมันที่ถูกกรองเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ก็จะหลุดออกจากชั้นตัวกลางเนื่องจากแรงเฉือนหรือความปั่นป่วนในชั้นตัวกลางจากการไหล ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ขวา) จึงทำให้เกิดการกรองและหลุดออกจากชั้นตัวกลางอยู่ตลอดเวลา หยดน้ำมันขนาดใหญ่เหล่านี้ที่แยกตัวออกจากน้ำเสียจะทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดีหรือขนาดอนุภาคน้ำมันกับน้ำที่ออกจากระบบได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีปริมาณซีโอดีที่หายไป และมีแนวโน้มเกิดขึ้นค่อนข้าง

คงที่ (จากผลประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) หรืออาจกล่าวได้ว่าทำให้ไม่เกิดการอุดตันโดยอนุภาคน้ำมันขึ้นในชั้นตัวกลางของโคเอเลสเซอร์ ซึ่งจัดเป็นข้อดีประการสำคัญของการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์นี้ได้ในระยะเวลานาน โดยไม่ต้องการบำรุงรักษาบ่อยๆ ซึ่งแตกต่างกับกระบวนการกรองอย่างชัดเจน (สุรพล สายพานิช, Y. Aurelle, และ H. Roques, 2526) แต่ทั้งนี้ น้ำเสียที่เข้าสู่อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์นั้นยังควรหลีกเลี่ยงน้ำเสียที่มีสารแขวนลอย (Suspended solid) เนื่องจากจะทำให้เกิดการกรองสารแขวนลอยและเกิดการอุดตันขึ้นในชั้นตัวกลางของโคเอเลสเซอร์ได้

จากการศึกษาอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางในหัวข้อที่ผ่านมาจะพบว่าตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ได้ จากการทดลองพบว่าความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ 5 เซนติเมตร บรรจุด้วยความพรุนที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์โดยกลไกโคเอเลสเซนซ์มีขนาดใหญ่ที่สุด และจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเนื่องจากกลไกการกรองเพียงประมาณร้อยละ 35 จึงจะได้ทำการศึกษาร่วมเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวในหัวข้อต่อไป

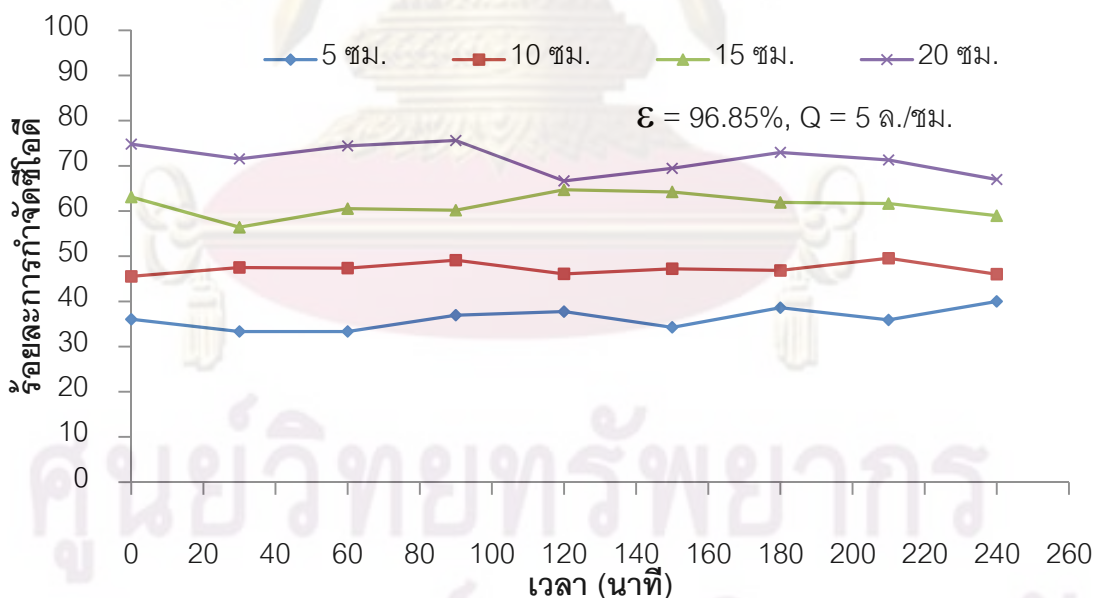
#### 4.4 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ด้วยตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลาง โดยใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มลงในสารละลายซิลิกาไฮล ซึ่งเลือกใช้สารละลายซิลิกาไฮลชนิด C ในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในส่วนนี้ได้แก่ ความสูงของชั้นตัวกลาง ความพรุนของชั้นตัวกลาง และอัตราการไหลของน้ำเสีย ซึ่งทำการวัดประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ด้วยค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของน้ำเสีย และทำการวัดขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากชั้นตัวกลางในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่แตกต่างกันทั้ง 2 ชนิด

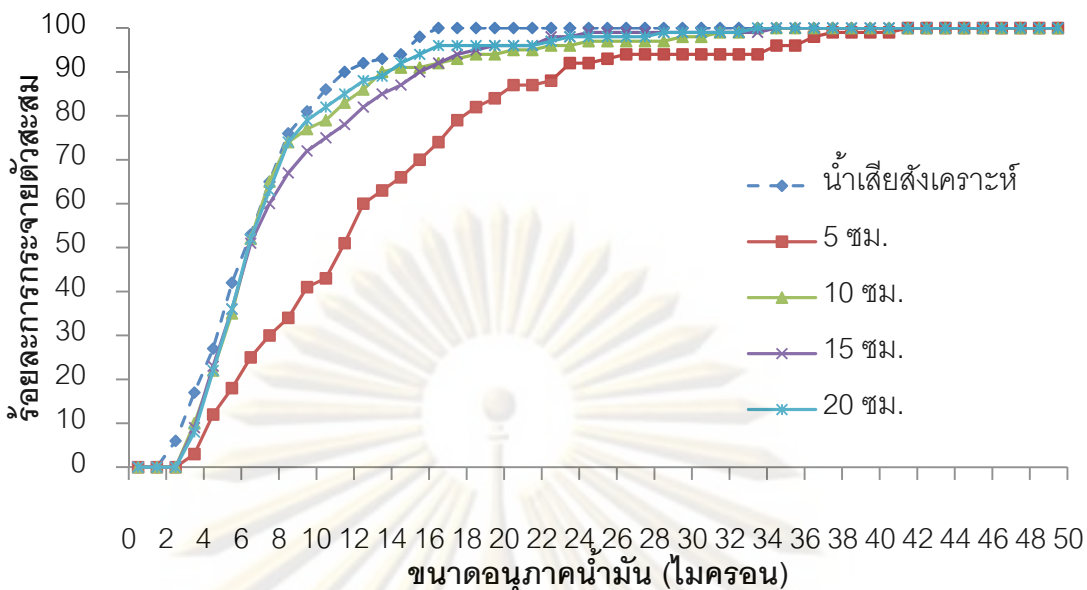
##### 4.4.1 การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลาง

จากผลการศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องด้วย

อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง และบรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสความพรุนร้อยละ 96.85 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าในช่วงความสูงของชั้นตัวกลางที่ทำการศึกษา คือ 5 - 20 เซนติเมตร อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 36 - 72 และจะกำจัดซีโอดีได้มากที่สุดที่ความสูงของชั้นตัวกลางมีค่า 20 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 16 - 24.9 ไมครอน และน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางสูง 5 เซนติเมตร จะมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ใหญ่ที่สุด คือ 24.9 ไมครอน และจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางให้สูงขึ้น อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะสามารถกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น และขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางสูง 5 เซนติเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ก่อนผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน ต่างจากอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านตัวกลางสูง 10 - 20 เซนติเมตร ที่มีอนุภาคน้ำมันขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเหมือนกับแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลางน่าจะเกิดในลักษณะเดียวกันกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ความสูงต่างๆดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 4.19 ผลกระทบของความสูงของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

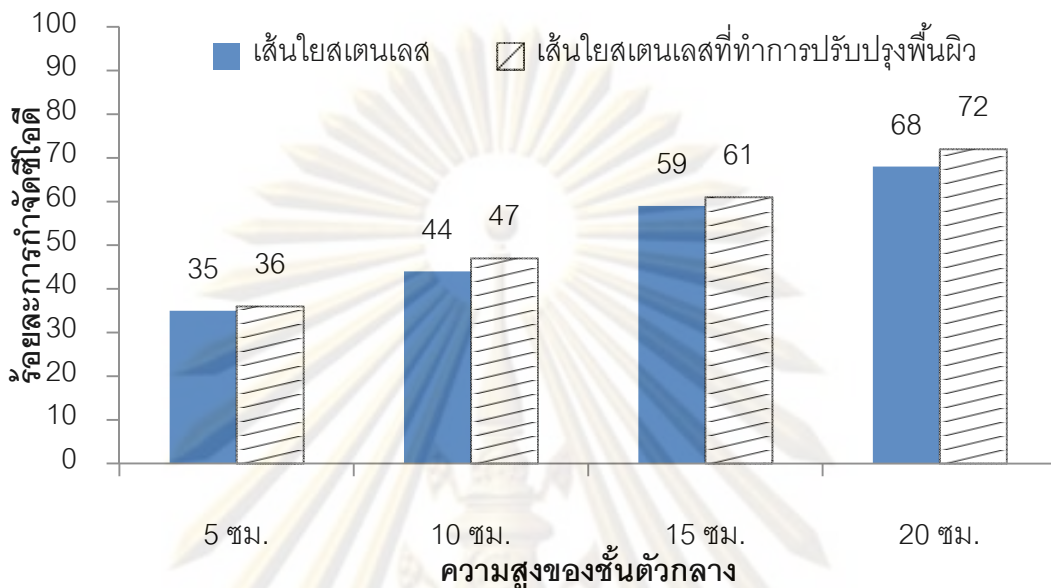


รูปที่ 4.20 ร้อยละการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงต่างๆ

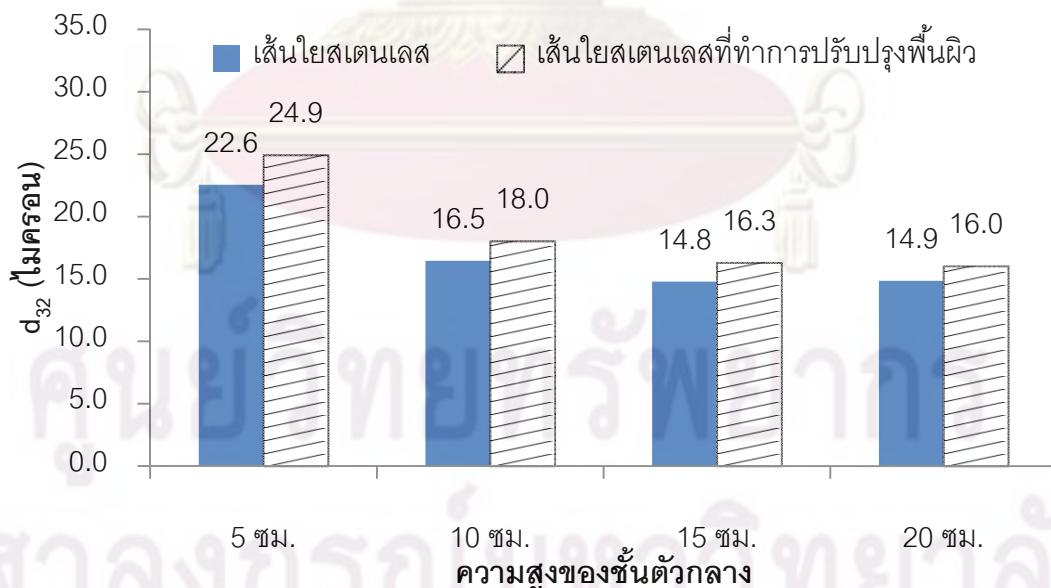
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางระหว่างอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามากกว่าของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกความสูงของชั้นตัวกลาง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.5 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีขนาดใหญ่กว่าที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกความสูงเช่นกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ที่ใหญ่ขึ้นเฉลี่ย 1.6 ไมครอน ซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนั้น ในกรณีที่ชั้นตัวกลางมีความสูงมากจะเกิดลักษณะของกลไกการกรองขึ้น ซึ่งปัจจัยความสูงและความสามารถในการจับยึดหรือขบน้ำมันของพื้นผิวตัวกลางมีผลกับกลไกนี้ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าเพิ่มมากขึ้นมากที่สุดเมื่อชั้นตัวกลางสูง 20 เซนติเมตร ในขณะที่ความสูงชั้นตัวกลาง 5 เซนติเมตรนั้นมีประสิทธิภาพเท่าเดิมหรือแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งน่าจะเกิดจากรูปแบบการไหลหรือสภาพทางกายภาพอื่นเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมประสิทธิภาพการบำบัดจากกลไกการกรอง แต่เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนั้น มีความแตกต่างระหว่างขนาดที่ไม่มากอย่างชัดเจน ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากกลไกโคเอเลสเซนซ์ในขั้นตอนสุดท้าย คือ การหลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งส่งผลต่อลักษณะของอนุภาค



น้ำมันที่ออกจากตัวกลางเช่นกัน ทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกมามีความแตกต่างกันอย่างไม่ชัดเจนมากนัก โดยในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาปัจจัยการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวสุดท้ายนี้



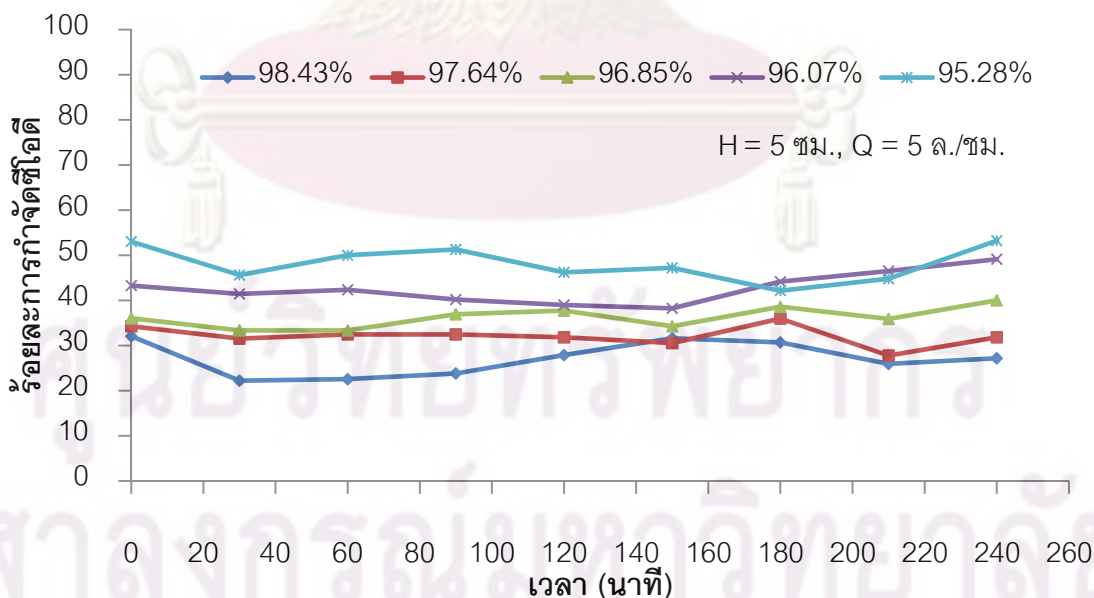
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงตัวกลางต่างๆ



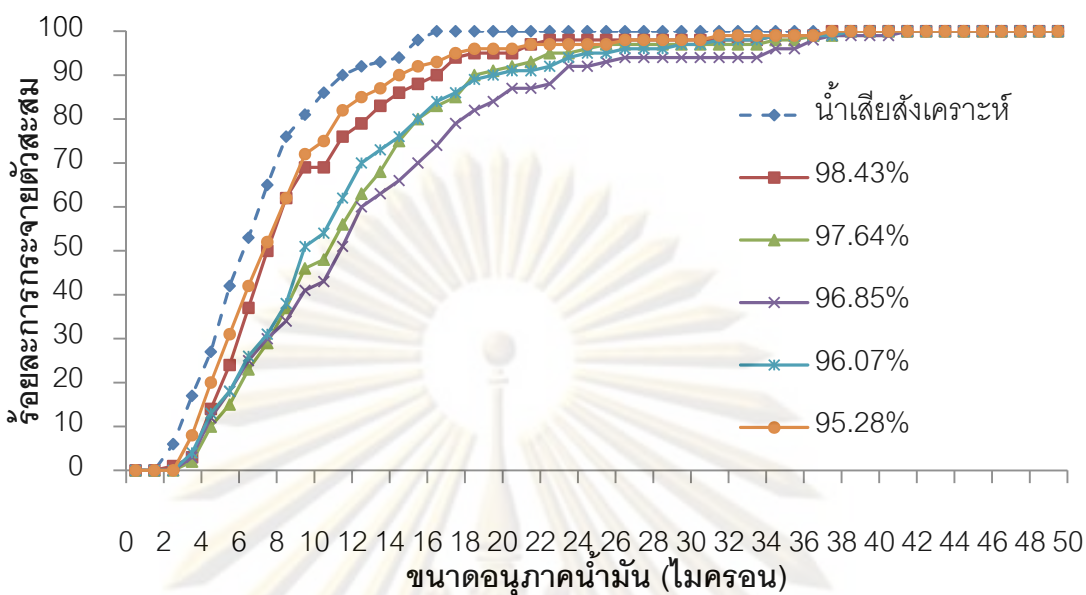
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความสูงตัวกลางต่างๆ

#### 4.4.2 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลาง

จากการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง และบรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสความสูง 5 เซนติเมตร ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าในช่วงความพรุนของชั้นตัวกลางที่ทำการศึกษา คือ ร้อยละ 98.43 - 95.28 อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 27 - 48 และกำจัดซีโอดีได้น้อยที่สุดที่ความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่าร้อยละ 98.43 เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 17.9 - 24.9 ไมครอน โดยน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีความพรุนร้อยละ 96.85 จะมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ใหญ่ที่สุด คือ 24.9 ไมครอน และจะเห็นได้ว่าความพรุนของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีความสามารถในการกำจัดซีโอดีได้ลดลง และขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางที่มีความพรุนน้อยกว่าร้อยละ 96.85 และมากกว่าร้อยละ 96.85 จะมีขนาดเล็กกว่าที่ผ่านชั้นตัวกลางความพรุนร้อยละ 96.85 ซึ่งลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเหมือนกับแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลส ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลางน่าจะเกิดในลักษณะเดียวกันกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่มีความพรุนต่างๆดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

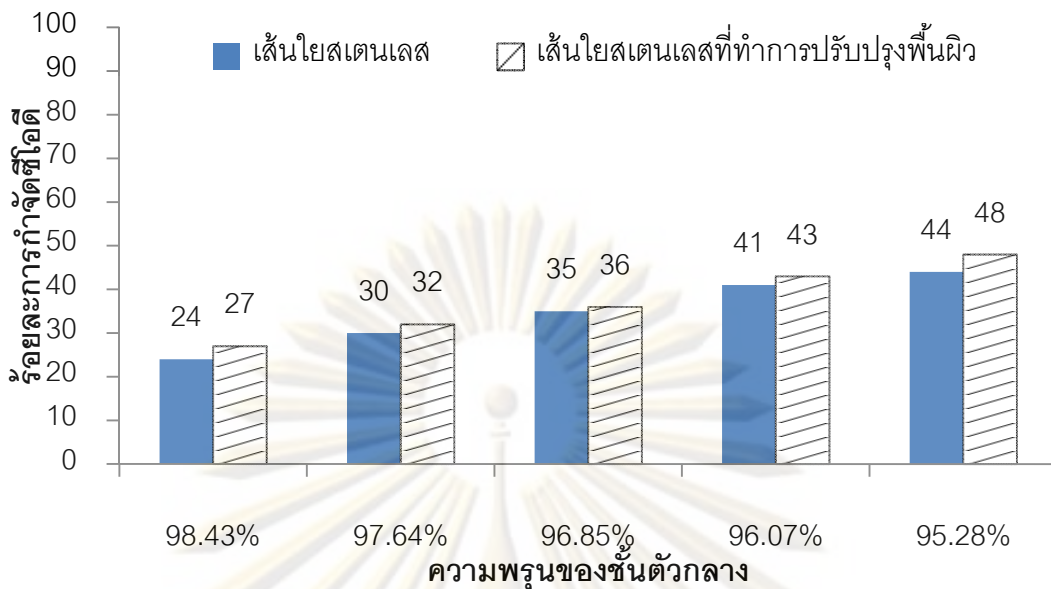


รูปที่ 4.23 ผลกระทบของความพรุนของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์

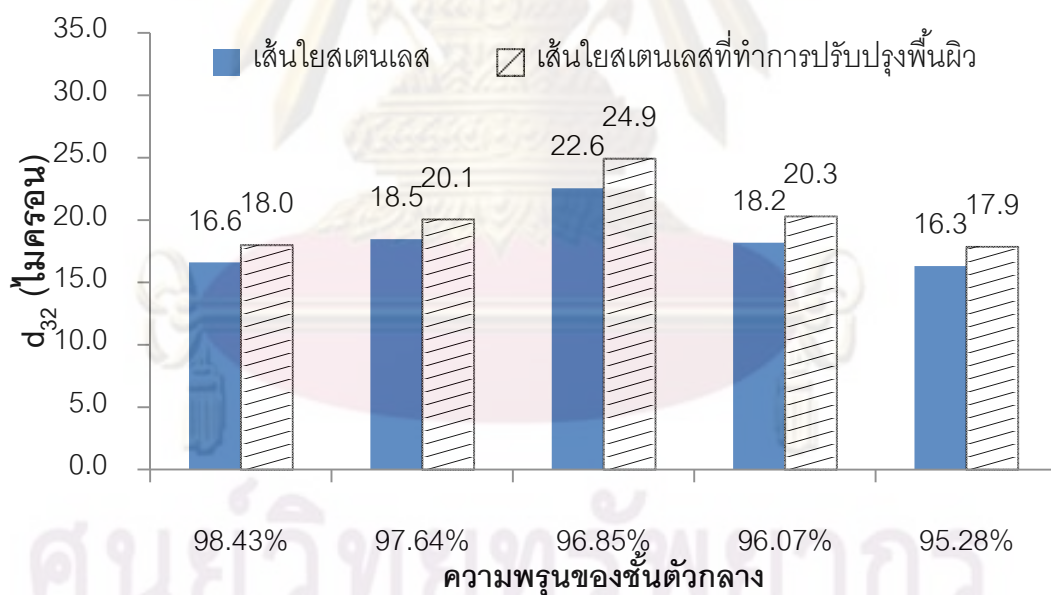


รูปที่ 4.24 ร้อยละการกระจายตัวละอองของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ความพรุนต่างๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางระหว่างอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามากกว่าของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกความพรุนของชั้นตัวกลาง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.4 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีขนาดใหญ่กว่าที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกความพรุนของตัวกลางเช่นกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ที่ใหญ่ขึ้นเฉลี่ย 1.8 ไมครอน

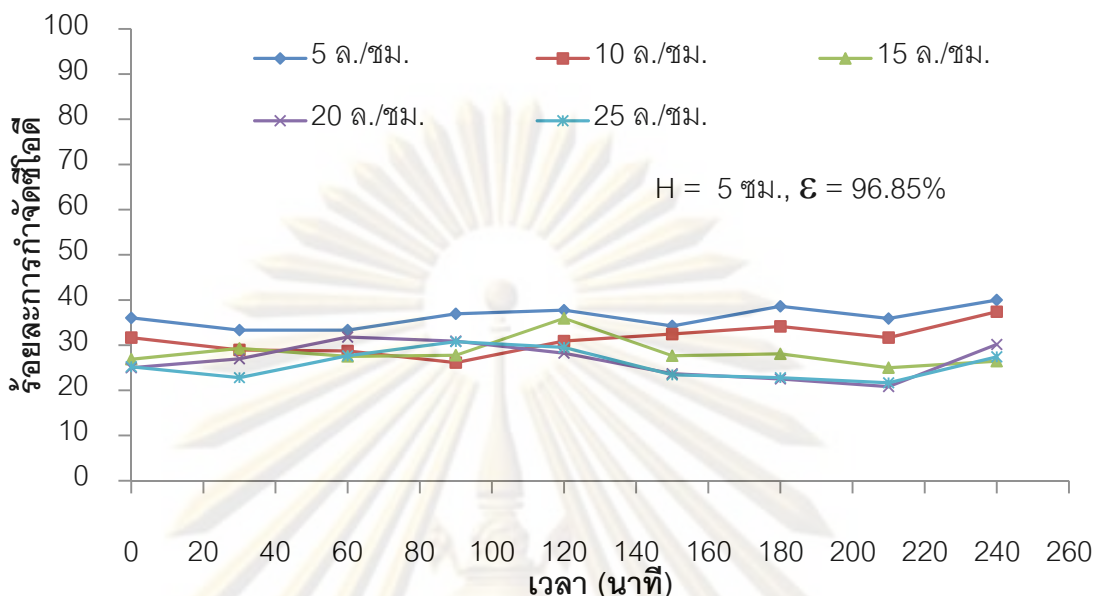


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ตัวกลางความพรุนต่างๆ

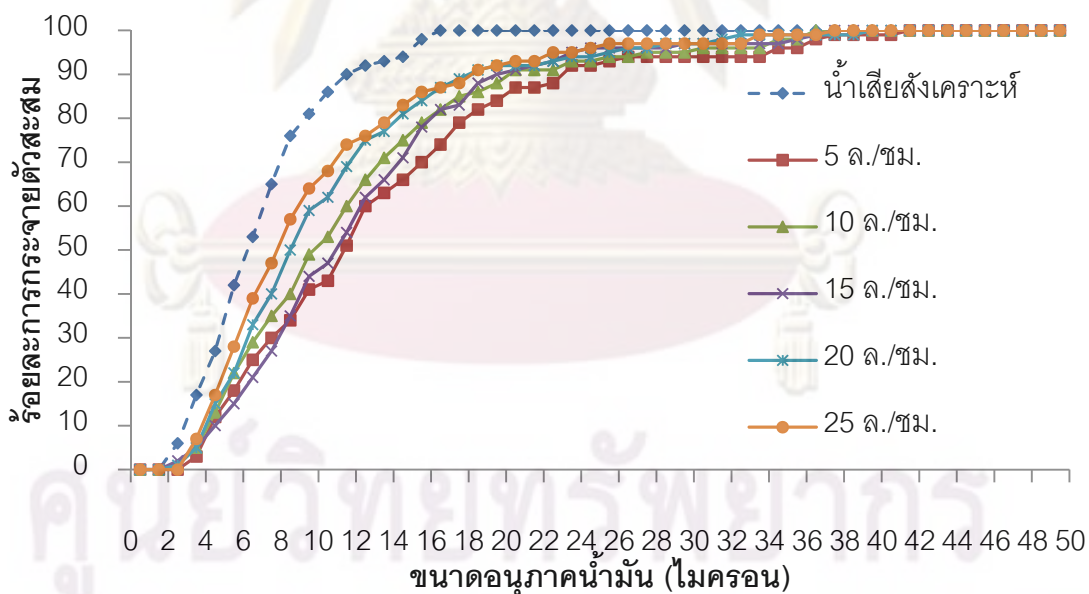


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่ตัวกลางความพรุนต่างๆ

4.4.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสีย



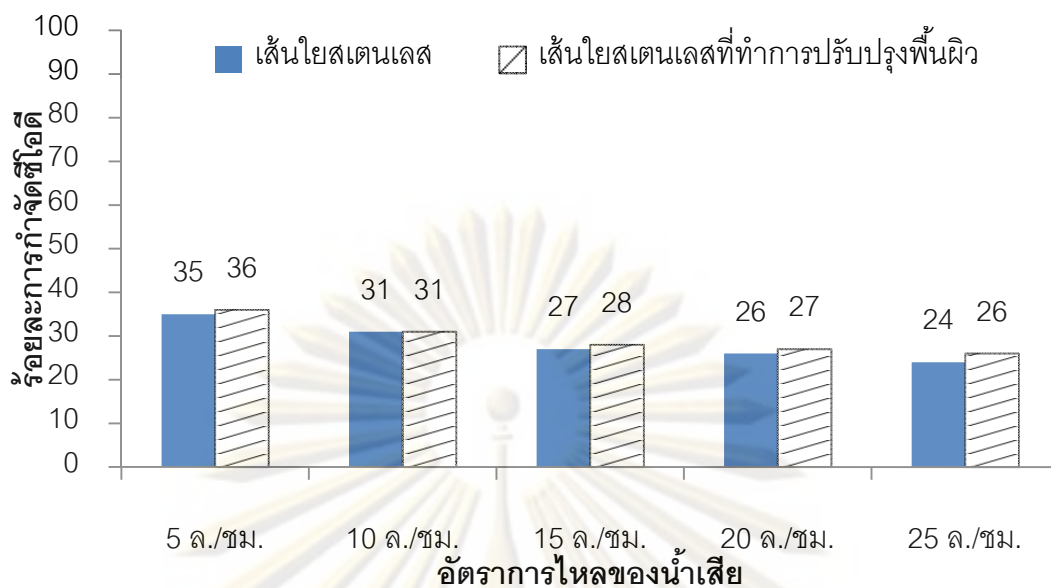
รูปที่ 4.27 ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์



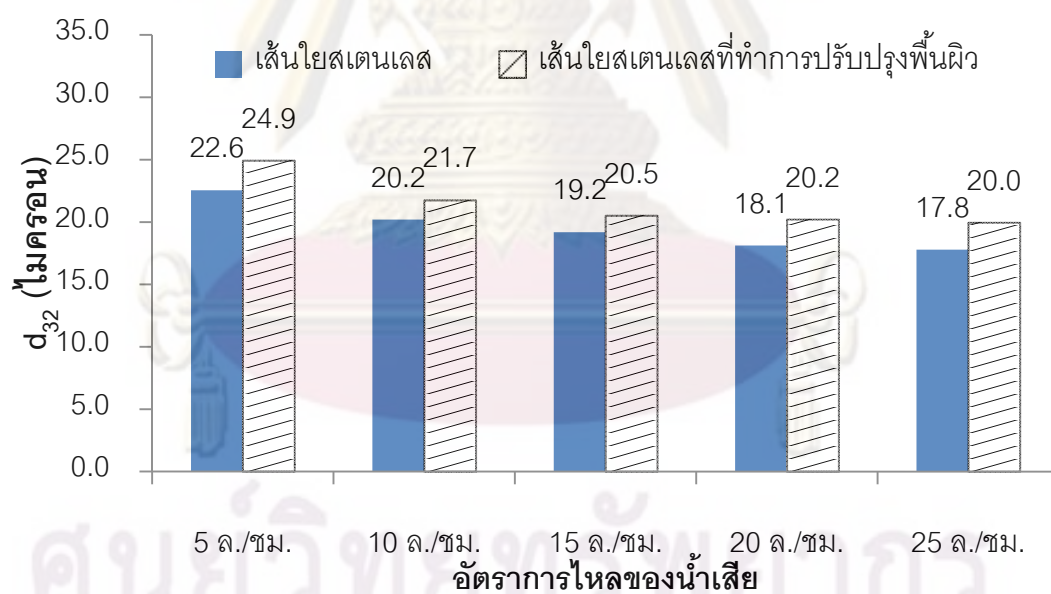
รูปที่ 4.28 ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงผลการศึกษามลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสทำการปรับปรุงพื้นผิว โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องผ่านชั้นตัวกลางความสูง 5 เซนติเมตร และมีความพรุนร้อยละ 96.85 พบว่าในช่วงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ทำการศึกษา คือ 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมง อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 36 - 26 และจะกำจัดซีโอดีได้มากที่สุดที่อัตราการไหลของน้ำเสียมีค่า 5 ลิตรต่อชั่วโมง และจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีความคงตัว (Stable) มากกว่าการใช้ตัวกลางที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคน้ำมันเกาะติดได้ดีขึ้น ทำให้ผลกระทบจากการหลุดออกเนื่องจากแรงเฉือนหรือความปั่นป่วนจากความเร็วกวาลไหลที่สูงขึ้นนั้นลดลง ซึ่งน่าจะช่วยลดผลเสียในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวในสภาพการทำงานจริงได้ เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 20.0 - 24.9 ไมครอน โดยอัตราการไหลของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลาง 5 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ใหญ่ที่สุด คือ 24.9 ไมครอน และจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จะลดลง เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าจะมีอนุภาคน้ำมันที่ผ่านชั้นตัวกลางขนาดใหญ่จำนวนเพิ่มขึ้นในทุกอัตราการไหลของน้ำเสีย โดยจำนวนอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีจำนวนน้อยลงตามอัตราการไหลของน้ำเสียที่สูงขึ้น ซึ่งลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเหมือนกับแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสเช่นกัน ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลางน่าจะเกิดในลักษณะเดียวกันกับอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางระหว่างอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามากกว่าของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลาง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีขนาดใหญ่กว่าที่ผ่านตัวกลางเส้นใยสแตนเลสในทุกอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางเช่นกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยแบบซอเทอร์ที่ใหญ่ขึ้นเฉลี่ย 1.88 ไมครอน



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีระหว่างโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ระหว่างตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางดั่งที่ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถสรุปประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี ขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากชั้นตัวกลาง และความเร็วในการลอยตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากชั้นตัวกลางเส้นใยที่ปรับปรุงพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยสแตนเลสปกติเฉลี่ย

	$\Delta\% \text{COD}_{\text{Removal}}$	$\Delta d_{32} (\mu\text{m})$
ความสูงของชั้นตัวกลาง 5 - 20 เซนติเมตร	2.5	1.6
ความพรุนของชั้นตัวกลาง 98.43 - 95.28%	2.4	1.8
อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมง	1	1.88
ค่าเฉลี่ยรวมของทุกสภาพการทำงาน	1.93	1.77

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสปกติเป็นตัวกลางเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นน่าจะเกิดจากลักษณะความชอบน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจากพื้นผิวตัวกลางสแตนเลสปกติ ( $\theta_{dc}$  ของเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิวมีค่า 72.68 และ 19.01 องศา ตามลำดับ) ทำให้อนุภาคน้ำมันที่เข้าชนกับชั้นตัวกลางสามารถยึดติดอยู่บนเส้นใยได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดกลไกการกรองได้มากขึ้น และการที่อนุภาคน้ำมันสามารถยึดติดบนตัวกลางได้ดีขึ้นนี้ ทำให้มีโอกาสรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นที่เข้าชนกับตัวกลาง จึงส่งผลให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกจากชั้นตัวกลางมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้นได้ตามกลไกโคเอเลสเซนซ์ของอุปกรณ์ สำหรับในงานศึกษานี้พบว่าร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยจากตัวกลางสแตนเลสมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.93 และขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้นเมื่อวัดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์มีค่า 1.77 ไมครอน ซึ่งทำให้ความเร็วในการลอยตัวเพิ่มขึ้นจากอนุภาคน้ำมันที่ออกจากตัวกลางสแตนเลสปกติประมาณ  $2.24 \times 10^{-7}$  เมตรต่อวินาที

จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสให้มีความชอบน้ำมันมากขึ้นนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ให้เพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในการนำไปใช้จริง อาจไม่คุ้มค่าในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกลางด้วยการปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจาก



สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้มักมีราคาสูง เช่น สาร HMDS ซึ่งเป็นสารปรับปรุงพื้นผิวให้ไม่ชอบน้ำ หรือ TEOS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการโซลเจล เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยนี้อาจกล่าวได้ว่าการที่มุมสัมผัสระหว่างสารกระจายหรือน้ำมัน กับตัวกลางที่ลดลงอันเนื่องมาจากการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นนั้น อาจไม่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ รวมถึงขนาดอนุภาคน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งโดยลักษณะของน้ำมันเครื่องที่ชอบในการเกาะติดกับพื้นผิวต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ในงานทั่วไปนั้นน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญ นอกจากนี้การที่ในงานวิจัยนี้ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อสร้างอิมัลชันของน้ำมันในน้ำที่มีความคงตัวสูงก็น่าจะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อผลการทดลองที่ได้รับข้างต้น ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ที่ปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่คงตัวชนิดอื่นๆ รวมถึงควรมีศึกษาการใช้ในการเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียที่สูงขึ้น เนื่องจากน่าจะได้ใช้ประโยชน์ของข้อดีจากตัวกลางที่ปรับปรุงขึ้นมาได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ขนาดอนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้น รวมถึงความคงตัวของค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้รับ

สำหรับในส่วนต่อไปจะเป็นการประยุกต์ใช้ผลการทดลองทั้งในส่วนของการวิเคราะห์สารต่อเนืองหรือน้ำมันและตัวกลางโคเอเลสเซอร์ รวมถึงการประยุกต์ใช้ตัวกลางแบบธรรมดาและแบบปรับปรุงพื้นผิวในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่อง เพื่อสร้างโมเดลการทำนายค่าประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงค่าคงที่ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัด โดยประยุกต์ใช้สมการการกรอง (Filtration efficiency equation) ร่วมกับสมการความดันลดในการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 4.5 การศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยกับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยสำหรับการควบคุมระบบและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยนำสมการความดันลดของการไหลในชั้นตัวกลางบรรจุมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการศึกษา และใช้ผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาในการประกอบการวิเคราะห์ด้วย

เนื่องจากกลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์มีการติดของอนุภาคน้ำมันบนชั้นตัวกลาง เช่นเดียวกับกลไกการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการประสิทธิภาพการกรองมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (Aurelle, 1985) ดังสมการที่ 4.3 ก ต่อไปนี้

$$\ln \frac{C_s}{C_0} = -\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T \frac{H}{d_p} \quad (4.3 \text{ ก})$$

โดยที่  $C_s, C_0$  คือ ความเข้มข้นซีไอดีของน้ำที่ออกและเข้าสู่โคเอเลสเซอร์ตามลำดับ

$\alpha$  คือ ประสิทธิภาพในการเกาะติดหรือจับยึดของอนุภาคกับตัวกลาง

$\eta_T$  คือ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด

$\varepsilon$  คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง

$H$  คือ ความสูงของชั้นตัวกลาง

$d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

จากการวิเคราะห์สมการประสิทธิภาพการกรองข้างต้นแล้ว จะพบว่าตัวแปร  $\eta_T, \varepsilon, H$  และ  $d_p$  เมื่อคำนวณตามสมการแล้ว จะมีลักษณะเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ซึ่งกำหนดให้มีค่า ดังนี้

$$X = \frac{3}{2}(1-\varepsilon)\eta_T \frac{H}{d_p} \quad (4.4 \text{ ก})$$

อย่างไรก็ตาม สมการประสิทธิภาพการกรองนี้ เป็นสมการประสิทธิภาพของตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ดังนั้นการนำสมการนี้มาคำนวณประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางชนิดเส้นใย จะต้องทำการคำนวณค่าตัวแปรในสมการบางตัวให้อยู่ในรูปที่เทียบเท่ากับของทรงกลม จึงจะสามารถนำมาคำนวณในสมการประสิทธิภาพการกรองได้ โดยคำนวณค่าดัชนีของความกลม (Sphericity,  $\psi$ ) ของตัวกลางชนิดเส้นใยเป็นค่าปรับแก้ในสมการต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการจัดรูปสมการให้พื้นที่ผิวของทรงกลม ( $S_{p,Sphere}$ ) ที่มีปริมาตรเท่ากับเส้นใยอยู่ในรูปของปริมาตรของเส้นใย ( $V_p$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$\psi = \frac{S_{p,Sphere}}{S_p} = \frac{(36\pi V_p^2)^{\frac{1}{3}}}{S_p} \quad (4.5)$$

ซึ่งจะทำให้สมการประสิทธิภาพการกรองที่มีการปรับแก้เขียนใหม่เป็นสมการได้ดังนี้

$$\ln \frac{C_s}{C_0} = -\frac{3}{2}(1-\varepsilon)\alpha\eta_T \frac{H}{\psi d_p} \quad (4.3 \text{ ข})$$

และกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่า

$$X = \frac{3}{2}(1-\varepsilon)\eta_T \frac{H}{\psi d_p} \quad (4.4 \text{ ข})$$

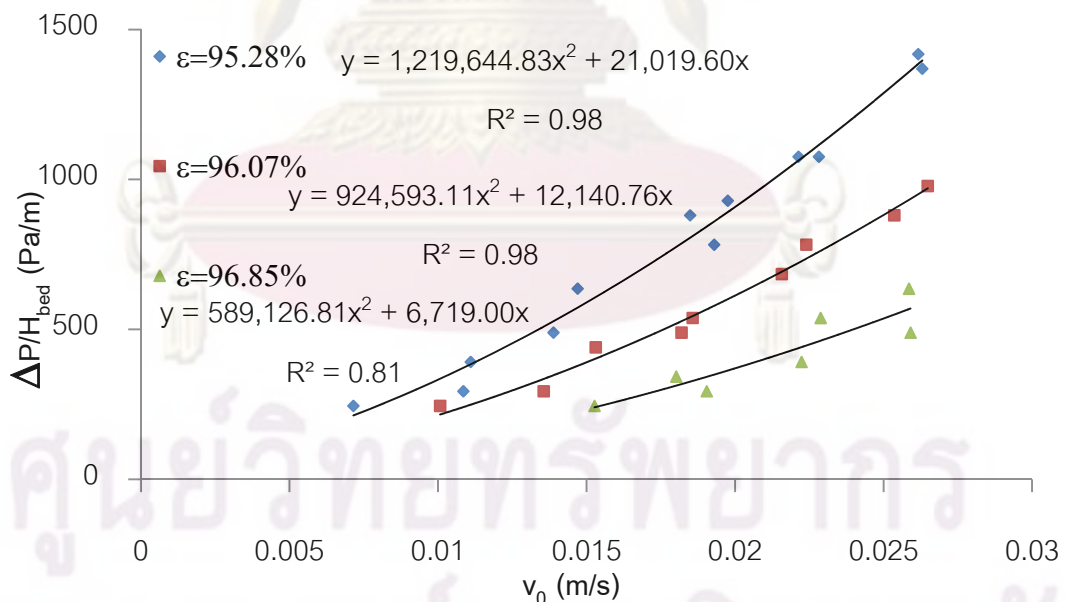
ทั้งนี้ เมื่อคำนวณตามสมการที่ 4.5 พบว่าค่าดัชนีความกลมของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.0067 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวกลางอื่น (Ottawa sand = 0.95, Rounded sand = 0.83) (มันส์ลิน ตันทุลเวศม์, 2537) เนื่องจากตัวกลางมีลักษณะเป็นฝอยเส้นใย จึงมีพื้นที่ผิวสูง โดยค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาตัวแปรสำหรับการประยุกต์ใช้สมการการกรอง เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและกลไกการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ต่อไป

#### 4.5.1 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสแตนเลส

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยให้อยู่ในรูปของทรงกลม ( $d_p$ ) จะคำนวณได้จากสมการของเออร์เกิน (Ergun's equation) ดังสมการที่ 2.36

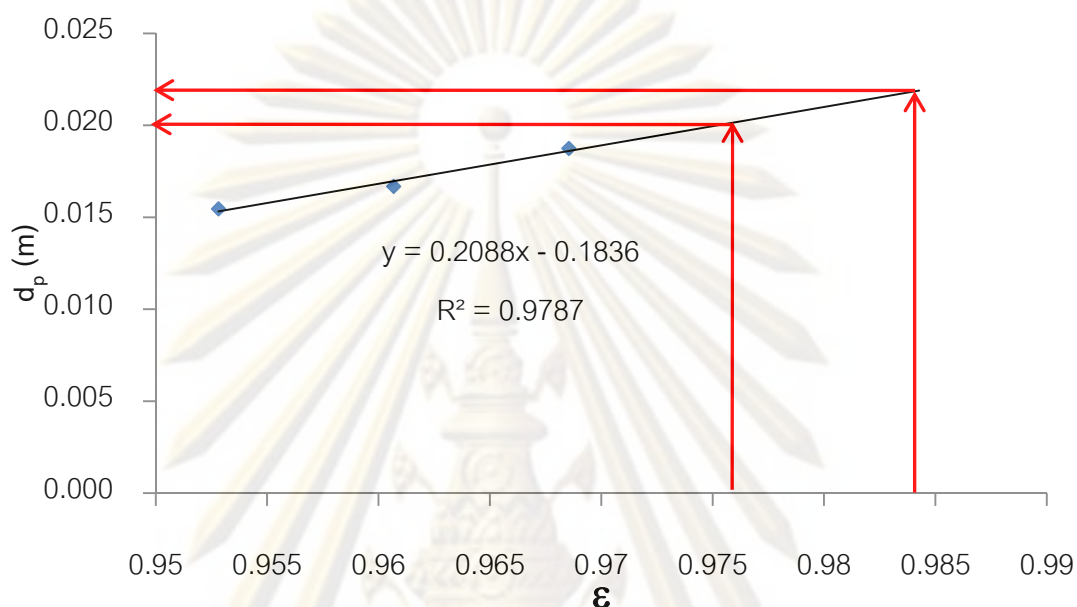
$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150v_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\psi^2 d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho v_0^2(1-\varepsilon)}{\psi d_p \varepsilon^3} \quad (2.36)$$

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองเพื่อหาค่า  $d_p$  เสมือนรูปทรงกลมของเส้นใยสแตนเลส โดยปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยความพรุนต่างๆกัน ที่อัตราการไหลระหว่าง 40 - 140 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อวัดค่าความดันลด ( $\Delta P$ ) ที่เกิดขึ้น และนำค่าดังกล่าวไปหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความสูงชั้นตัวกลางกับความเร็วการไหล ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความสูงชั้นตัวกลางกับความเร็วการไหล

เมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองกับสมการของเออร์กัน ก็จะสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในรูปของทรงกลม ( $d_p$ ) ที่ความพรุนของชั้นตัวกลางต่างๆได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งค่า  $d_p$  จะแปรผันตามกันกับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง โดยค่า  $d_p$  ของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.32 การประมาณค่า  $d_p$  จากความพรุนของชั้นตัวกลาง

ตารางที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสแตนเลสในรูปของทรงกลมที่ความพรุนต่างๆ

$\epsilon$ , %	95.28	96.07	96.85	97.64	98.43
$d_p$ , มิลลิเมตร	15.5	16.7	18.7	20.2	21.9

4.5.2 การหาค่าประสิทธิภาพในการส่งถ่ายอนุภาคน้ำมันเข้าสัมผัสกับตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ( $\eta_T$ )

ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด ( $\eta_T$ ) ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพในการตกตะกอน ( $\eta_{Sed}$ ) ประสิทธิภาพในการปะทะโดยตรง ( $\eta_{Int}$ ) และประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย ( $\eta_{Diff}$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.14

$$\eta_T = \eta_{Sed} + \eta_{Int} + \eta_{Diff} \quad (2.14 ก)$$

$$\eta_T = \frac{\Delta\rho g d_E^2}{18\mu_c v_0} + \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 + 0.9 \left( \frac{KT}{\mu_c d_E d_p v_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.14 ข)$$

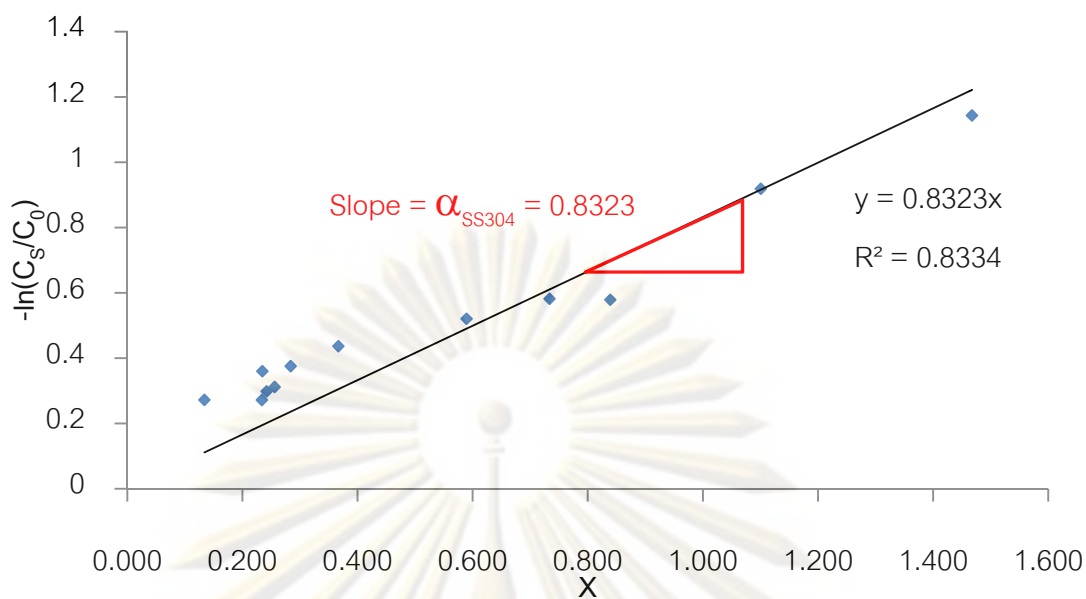
ซึ่งสมการนี้ใช้กับตัวกลางรูปทรงกลม เมื่อนำมาใช้กับตัวกลางเส้นใยจึงต้องมีการปรับแก้ด้วยค่าดัชนีของความกลม ดังสมการ

$$\eta_T = \frac{\Delta\rho g d_E^2}{18\mu_c v_0} + \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{\Psi d_p} \right)^2 + 0.9 \left( \frac{KT}{\mu_c d_E \Psi d_p v_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.6)$$

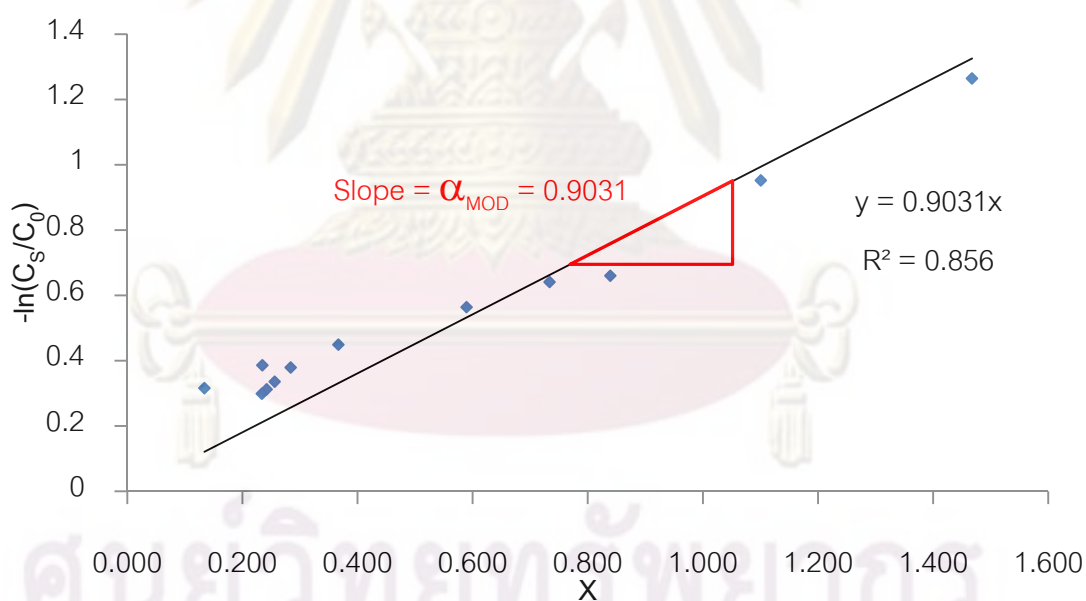
โดยค่า  $\eta_T$  ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำกับน้ำมัน ( $\Delta\rho$ ) ความเร็วการไหล ( $v_0$ ) ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์ ( $d_E$ ) ดัชนีของความกลม ( $\Psi$ ) ขนาดตัวกลาง ( $d_p$ ) อุณหภูมิสัมบูรณ์ ( $T$ ) และค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann's constant,  $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ kg.m}^2/\text{K.s}^2$ ) สำหรับในงานวิจัยนี้ พบว่า  $\eta_T$  มีค่าประมาณร้อยละ 1.24 - 2.44 ดังนั้น เมื่อทราบค่า  $d_p$  และ  $\eta_T$  ที่สอดคล้องกับสภาพการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ต่างๆ จึงสามารถคำนวณค่ากลุ่มตัวแปรไร้นหน่วย ( $X$ ) เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการประสิทธิภาพการกรองต่อไป

4.5.3 การประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วย ( $X$ ) กับโคเอเลสเซอร์

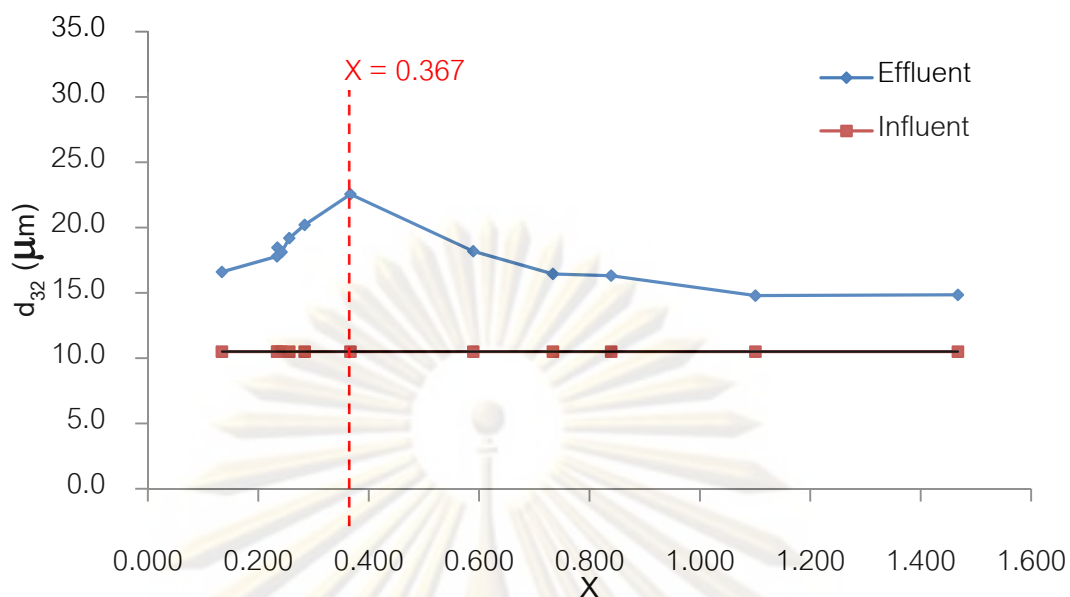
จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำผลการทดลองของค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ ( $-\ln C_s/C_0$ ) กับกลุ่มตัวแปรไร้นหน่วย ( $X$ ) มาสร้างความสัมพันธ์กัน พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงตามสมการประสิทธิภาพการกรองทั้งจากผลการทดลองของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสหรือเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ โดยมีความคลาดเคลื่อนหรือค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8334 และ 0.856 ซึ่งน่าจะเกิดจากกลไกของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ในขั้นตอนสุดท้ายที่แตกต่างจากกลไกการกรองโดยทั่วไปที่อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่บนชั้นตัวกลางจะเกิดการหลุดออกจากชั้นตัวกลางเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น (Salting out stage) ทำให้ไม่มีการติดสะสมอยู่บนชั้นตัวกลางเหมือนกับกลไกการกรองตามปกติ โดยอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการโคเอเลสเซนซ์จะมีขนาดระหว่าง 14.8 - 22.6 ไมครอน สำหรับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง และมีขนาดระหว่าง 16.0 - 24.9 ไมครอน สำหรับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลาง ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นจากอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ คือ 10.5 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ซึ่งจะทำให้ความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมันมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกในถังตกตะกอนสูงขึ้นได้



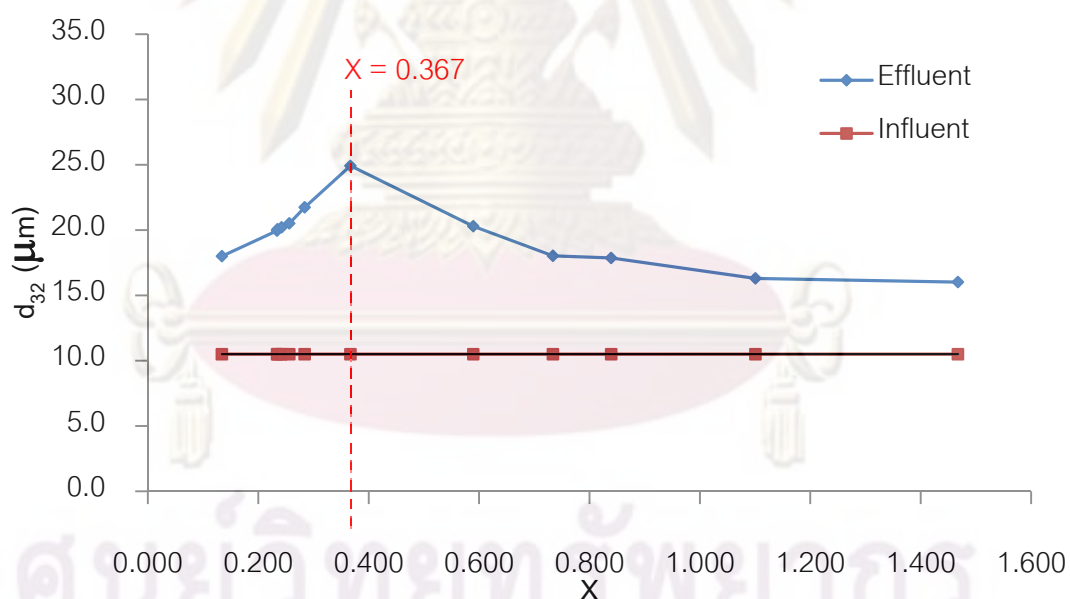
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกโคเอเลสเซนซ์) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ( $X$ )



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกโคเอเลสเซนซ์) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว กับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ( $X$ )

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.33 และ 4.34 พบว่าเมื่อกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่ามากขึ้น จะทำให้อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงขึ้นโดยเกิดจากกลไกการกรองของชั้นตัวกลางเป็นหลัก แต่เมื่อพิจารณาประกอบกับรูปที่ 4.35 และ 4.36 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคน้ำมันที่เกิดจากการรวมตัวกันจากกลไกโคเอเลสเซนซ์นั้น พบว่าจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่เล็กลง ในทางกลับกัน เมื่อกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่าลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพของกลไกการกรองแปรผกผันกับประสิทธิภาพของกลไกโคเอเลสเซนซ์ กล่าวคือค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีจะมีค่าน้อยลงและอนุภาคน้ำมันที่เกิดจากการรวมตัวกันจะมีขนาดใหญ่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ( $d_{32,SS304} = 22.6$  ไมครอน และ  $d_{32,MOD} = 24.9$  ไมครอน) และจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่เล็กลงอีกครั้ง เมื่อค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่าน้อยกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งน่าจะเกิดจากปัจจัยหรืออิทธิพลของตัวแปรต่างๆของการเดินระบบ เช่น ความสูงและความพรุนของชั้นตัวกลาง หรืออัตราการไหลของน้ำเสีย ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ดังกล่าวแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา โดยจากกลไกทั้งสองที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์นั้น เราต้องการให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจากกลไกโคเอเลสเซนซ์มากกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีที่สูงเนื่องจากกลไกการกรองของอุปกรณ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันในถังตกตะกอนต่อไป โดยจากการศึกษานี้พบว่า ค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.367 เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ผ่านอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากที่สุดนั่นเอง นอกจากนี้เนื่องจากค่า X ที่ได้จากการเดินระบบทั้งสองกรณีมีค่าเหมือนกัน ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าค่า X นั้นสื่อถึงลักษณะทางกายภาพโดยรวมที่เหมาะสมของการเดินระบบโคเอเลสเซอร์ที่เหมือนกันระหว่างการทดลองทั้งสองแบบ ซึ่งรวมหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกัน เช่น ลักษณะของน้ำเสีย (ขนาดอนุภาคน้ำมัน) อัตราการไหลของน้ำเสีย ลักษณะตัวกลางโคเอเลสเซอร์ (ความสูง ความพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของตัวกลาง) เป็นต้น

ในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์ค่า X ดังกล่าวที่สอดคล้องกับรูปแบบทางกายภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถช่วยในการควบคุมภาพรวมของกลไกการบำบัดที่เหมาะสม ผ่านการมองภาพรวมของปัจจัยทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง ทำให้ง่ายหรือสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินระบบ โดยเราสามารถปรับเปลี่ยนการเดินระบบของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ตามลักษณะต่างๆที่เราต้องการ ในขณะที่อุปกรณ์ยังคงสามารถทำให้อนุภาคน้ำมันที่ผ่านออกมามีขนาดใหญ่ขึ้นมากที่สุดด้วยการควบคุมค่า X ให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรต่างๆในกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย เช่น หากปรับเปลี่ยนการเดินระบบแล้วทำให้ค่า X ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่เหมาะสม เราสามารถลดอัตราการไหลของน้ำเสีย ความพรุนของชั้นตัวกลาง ขนาดของตัวกลางที่ใช้ หรือเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางภายใน



อุปกรณ์ ก็จะสามารถทำให้ค่า  $X$  มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังต้องการ และการวิเคราะห์ค่า  $X$  ยังสามารถนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการบำบัดอย่างคร่าวๆในขั้นต้นได้

นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพในการจับยีส ( $\alpha$ ) ของอนุภาคน้ำมันกับชั้นตัวกลางซึ่งได้มาจากการคำนวณค่าความชัน (Slope) จากสมการเส้นตรงข้างต้นในรูปที่ 4.33 และ 4.34 มีค่าเท่ากับ 0.8323 และ 0.9031 สำหรับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว จะเห็นได้ว่าค่าของตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าประสิทธิภาพในการจับยีสที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวในน้ำที่แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวที่ทำการปรับปรุงมีความชอบน้ำมัน (มีขนาดมุมสัมผัสในน้ำที่เล็กกว่า) จึงมีการจับยีสหรือเกาะติดกับอนุภาคน้ำมันได้ดีกว่าพื้นผิวธรรมดา โดยค่า  $\alpha$  ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของโคเอเลสเซอร์ รวมถึงการเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมันร่วมกับค่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ( $X$ ) จากสมการประสิทธิภาพการกรองได้ แต่เนื่องจากค่าประสิทธิภาพในการจับยีส ( $\alpha$ ) ที่ได้จากสมการเส้นตรงข้างต้น ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ( $R^2 = 0.8334$  และ  $0.856$ ) ในอนาคตควรมีการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองเพื่อศึกษากลไกการทำงานและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่สภาพการทำงานต่างๆเพิ่มเติม เช่น การศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลหรือขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลาง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงนี้ หรือทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดจับด้วยการปรับปรุงพื้นผิวดักด้วยพื้นผิวลักษณะอื่นๆอีกเพิ่มเติม รวมไปถึงการทดลองกับน้ำเสียจริงและทำการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการและค่าของตัวแปรไร้หน่วยที่ได้นำเสนอ เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากำหนดเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของอุปกรณ์ รวมถึงการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นโดยการเคลือบผิวด้วยสารประกอบของซิลิกาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษากำหนดยุคที่ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไว้หน่วยสำหรับการควบคุมระบบและการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. จากการศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว พบว่าเส้นใยสแตนเลสมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ เนื่องจากมีลักษณะเส้นใยขนาดเล็กและมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ โดยมุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำมีค่าเท่ากับ 72.68 องศา และเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลส จะทำให้มุมสัมผัสของน้ำมันบนตัวกลางในน้ำมีค่าเท่ากับ 19.01 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น

2. การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ พบว่าความสูงของชั้นตัวกลางมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการทดลองที่ความสูงของชั้นตัวกลาง 5 - 25 เซนติเมตร โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 68 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 14.8 - 22.6 ไมครอน โดยเมื่อความสูงมีค่ามาก จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงซึ่งเกิดจากกลไกการกรองของชั้นตัวกลาง แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมาจากชั้นตัวกลางที่มีขนาดใหญ่มีจำนวนน้อย จากการศึกษาพบว่าที่ความสูง 5 เซนติเมตร เป็นค่าความสูงที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกมาจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด

3. การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ พบว่าความพรุนของชั้นตัวกลางมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ จากการทดลองที่ความพรุนของชั้นตัวกลางร้อยละ 98.43 - 95.28 โคเอเลสเซอร์มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 24 - 44 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 16.3 - 22.6 ไมครอน โดยเมื่อความพรุนมีค่ามากประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะมีค่าน้อย จากการศึกษาพบว่าที่ความพรุนร้อยละ 96.85 เป็นค่าความพรุนที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้อนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ที่สุด

4. การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยสแตนเลสต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ พบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ จากการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 - 25 ลิตรต่อชั่วโมง โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 24 - 35 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 17.8 - 22.6 ไมครอน โดยเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียมีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะมีค่าลดลง จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีค่ามากที่สุด

5. จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสปกติเป็นตัวกลางเพียงเล็กน้อย ซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเกิดจากลักษณะความชอบน้ำมันที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิว จึงส่งผลให้เกิดกลไกการกรองได้มากขึ้น แต่ขนาดอนุภาคน้ำมันและประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเกิดเนื่องจากลักษณะของน้ำมันและเป็นผลมาจากกลไกโคเอเลสเซนซ์ในขั้นตอนสุดท้าย คือ การหลุดออกจากชั้นตัวกลาง (Salting out stage) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของอนุภาคน้ำมันที่ออกจากตัวกลาง โดยประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.93 และขนาดอนุภาคน้ำมันใหญ่ขึ้นเฉลี่ย 1.77 ไมครอน จากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสปกติเป็นตัวกลาง

6. เนื่องจากกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ถูกควบคุมด้วยลักษณะทางกายภาพต่างๆ จึงได้มีการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ( $X = \frac{3}{2} \eta_T (1 - \epsilon) \frac{H}{d_p}$ ) ซึ่งรวมปัจจัยทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง

เข้าด้วยกัน มาใช้ในการควบคุมหรือเดินระบบ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์เป็นเส้นตรงตามสมการประสิทธิภาพการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณทำนายประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางได้ โดยค่าประสิทธิภาพในการจับยึด ( $\alpha$ ) ของอนุภาคน้ำมันกับชั้นตัวกลางมีค่าเท่ากับ 0.8323 และ 0.9031 สำหรับตัวกลางเส้นใยสแตนเลสและตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่

ทำการปรับปรุงพื้นผิว และค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่เหมาะสมจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.367

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรมีการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองเพื่อศึกษากลไกการทำงาน และทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่สภาพการทำงานต่างๆเพิ่มเติม เช่น การศึกษาผลกระทบของความสัมพันธ์ตัวกลางในช่วงที่กว้างขึ้น ความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่าน้อยมาก หรือความเร็วการไหลที่สูงขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการและค่าของตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่ได้นำเสนอ และอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมในปัจจัยอื่น เช่น ศึกษาขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลางแตกต่างกัน ศึกษาประสิทธิภาพเมื่อชนิดหรือขนาดของน้ำมันที่จะทำการบำบัดแตกต่างกัน หรือทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยัดจับ ( $\alpha$ ) ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวตัวกลางด้วยพื้นผิวลักษณะอื่นๆอีกเพิ่มเติม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงนี้ รวมไปถึงการทดลองกับน้ำเสียจริงหรือเดินระบบในสภาวะจริงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรที่ได้นำเสนอด้วย

นอกจากนี้อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมในกลไกการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ เช่น การเพิ่มชั้นตัวกลางสุดท้ายที่ผิวของอนุภาคน้ำมันจะหลุดออกให้มีความชอบน้ำที่มากขึ้น หรือการใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เช่น ทางเคมีหรือไฟฟ้า เพื่อให้สามารถแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- สุรพล สายพานิช, Aurelle, Y. และ Roques, H. เทคนิควิธีการแยกอิมัลชันด้วยวิธีโคเอเลสเซนส์. วิศวกรรมสาร. ปีที่ 36 กุมภาพันธ์ 2526: 76-85.
- มะลิ หุ่นสม. 2551. ปรากฏการณ์ถ่ายโอนโมเมนต์ ความร้อน และมวลชั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Alen, T. 1981. Particle size measurement. Powder Technology series. London: Chapman.
- APHA, AWWA, and WEF. 1998. Standard method for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> ed. Baltimore: United Book Press.
- Aurelle, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok: Department of Sanitary Engineering Chulalongkorn University.
- Bhagat, S. D., Kim, Y. H., and Ahn, Y. S. 2006. Room temperature synthesis of water repellent silica coatings by the dip coat technique. Applied Surface Science 253: 2217-2221.
- Dislich, H. 1988. Thin films from the sol-gel process. In L. C. Klein (ed.), Sol-gel technology for thin films, fibers, performs, electronics, and specialty shapes. New Jersey: Noyes.
- Geankoplis, C. J. 2003. Transport processes and separation process principles (includes unit operations). 4<sup>th</sup> ed. New Jersey. Pearson Prentice Hall.
- Li, J., and Gu, Y. 2005. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. Separation and Purification Technology 42: 1-13.
- Madia, J., R., Fruh, S., M., Miller, C., A., and Beerbower, A. 1976. Granular packed bed coalescer: influence of packing wettability on coalescence. Environmental Science & Technology 10: 1044-1046.

- McCabe, L. W., Smith, J. C., and Harriott, P. 2000. Unit operations of chemical engineering. 6<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Pierre, A. C. 1998. Introduction to sol-gel processing. Boston: Kluwer Academic.
- Rachu, S. 2005. Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation. Doctoral dissertation. INSA-Toulouse.
- Rebelein, F., and Blass, E. 1990. Separation of micro-dispersions in fibre-beds. Filtration & Separation 27: 360-363.
- Schubert, U., and Husing, N. 2004. Synthesis of inorganic materials. 2<sup>nd</sup> ed. Weinheim: Wiley-VCH.
- Sokolovic, R. M. S., Sokolovic, S. M., and Dokovic, B. D. 1997. Effect of working conditions on bed coalescence of an oil-in-water emulsion using a polyurethane foam bed. Industrial & Engineering Chemistry Research 36: 4949-4953.
- Sokolovic, R. M. S., Vulic, T. J., and Sokolovic, S. M. 2007. Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion. Separation and Purification Technology 56: 79-84.
- Wadell, H. 1935. Volume, shape, and roundness of quartz particles. The Journal of Geology 43: 250 -280.
- Wanichkul, B. 2000. Etude des potentialities de nouveaux procedes de traitement d'emulsions hydrocarbure-eau: ultrafiltration, distillation et couplage coalesceur-hydrocyclone. Doctoral dissertation. INSA-Toulouse.
- Zisman, W. A. 1964. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. In R. F. Gould (ed.), Contact angle, wettability and adhesion. Advances in chemistry series, pp. 1-49. Washington D.C.: American Chemical Society.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลดิบของการทดลอง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

## ภาคผนวก ก.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีและความเข้มข้นของน้ำมัน

น้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SD
0	10	5
40	46	5
80	76	12
120	110	0
160	143	17
200	180	8
250	214	5
300	267	19
350	313	12
400	387	23
500	440	13
600	547	13
700	631	8
800	727	12
900	787	23
1000	907	12

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.1.2 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0
1.5	0	0
2.5	6	6
3.5	11	17
4.5	10	27
5.5	15	42
6.5	11	53
7.5	12	65
8.5	11	76
9.5	5	81
10.5	5	86
11.5	4	90
12.5	2	92
13.5	1	93
14.5	1	94
15.5	4	98
16.5	2	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

### ภาคผนวก ก.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.2.1 ความหนาแน่นและลักษณะต่างๆของเส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลอง

Length (cm)	Weight (g)	Weight/Length (g/cm)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
5	0.0056	0.00112	5.9574
5	0.0056	0.00112	5.9574
5	0.0056	0.00112	5.9574
5	0.0054	0.00108	5.7447
5	0.0055	0.00110	5.8511
10	0.0114	0.00114	6.0638
10	0.0109	0.00109	5.7979
10	0.0112	0.00112	5.9574
10	0.0111	0.00111	5.9043
10	0.011	0.00110	5.8511
15	0.0165	0.00110	5.8511
15	0.0166	0.00111	5.8865
15	0.0159	0.00106	5.6383
15	0.0158	0.00105	5.6028
15	0.0164	0.00109	5.8156
	เฉลี่ย	0.00110	5.8558

Width : 470  $\mu\text{m}$  Height : 40  $\mu\text{m}$

Sectional Area : 0.000188  $\text{cm}^2$

SS304 14 g Density : 5.8558  $\text{g/cm}^3$

Volume : 2.3908  $\text{cm}^3$  Length : 12717 cm

Surface Area : 1297  $\text{cm}^2$  Sphericity : 0.0067

92.65  $\text{cm}^2/\text{g}$

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.2.2 มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางต่างๆ

SS304	SS304 +Sol A	SS304 +Sol B	SS304 +Sol C	SS304 +Sol D	SS304 +Sol E
79	96	101	102	97	100
81	95	100	102	102	98
78	100	99	102	99	98
80	100	99	102	101	101
79	95	98	98	99	102
79	100	98	102	99	102
78	93	98	102	98	99
80	97	101	102	102	103
79	95	99	101	101	97
76	98	100	100	100	100
78	95	102	99	100	101
80	97	98	102	101	102

76
81
81
80
79
78
78
82

เฉลี่ย

79.1	96.8	99.4	101.2	99.9	100.3
------	------	------	-------	------	-------

SD

1.6	2.3	1.4	1.4	1.6	1.9
-----	-----	-----	-----	-----	-----

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.2.3 มุมสัมผัสของของเหลวต่างๆบนพื้นผิวสแตนเลส

H <sub>2</sub> O	SDS 0.001M	SDS 0.002M	SDS 0.004M	SDS 0.006M	SDS 0.008M	Oil
79	75	60	45	28	25	24
80	76	60	46	29	24	25
81	78	61	47	28	21	26
81	76	61	46	29	23	23
79	77	60	48	30	21	25
80	76	62		32	21	25
78	74	60		31		26
76	76	59		28		26
79	73	60		29		26
80	75	60		32		23
78	76	62		33		25
78	77	61		32		23
79	74	62		33		25
80	75	62				23
78	75	60				23
79	77	60				24
76		62				25
82		62				25
78						
81						

เฉลี่ย

79.1	75.6	60.8	46.4	30.3	22.5	24.6
------	------	------	------	------	------	------

SD

1.6	1.3	1.0	1.1	1.9	1.8	1.1
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.2.4 มุมสัมผัสของของเหลวต่างๆบนพื้นผิวสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

H <sub>2</sub> O	SDS 0.001M	SDS 0.002M	SDS 0.004M	SDS 0.006M	SDS 0.008M	Oil
102	99	85	68	50	43	36
98	94	84	69	50	44	31
101	97	84	65	53	46	32
102	97	83	65	54	45	30
102	99	83	67	55	44	30
100	98	86	66	56	47	35
102	100	84	68	54	43	33
101	95	85	64	52	44	35
99	100	84	65			32
102	99	83	62			32
102	99	84	66			
102	95	84	67			
	98	82				
	97	82				

เฉลี่ย

101.1	97.6	83.8	66.0	53.0	44.5	32.6
-------	------	------	------	------	------	------

SD

1.4	1.9	1.1	2.0	2.2	1.4	2.1
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

### ภาคผนวก ก.3 การศึกษาอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง

ตารางที่ ก.3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	550	328	222	40
30	529	299	230	43
60	554	341	213	39
90	492	332	160	33
120	472	291	181	38
150	431	299	131	30
180	431	283	148	34
210	455	308	148	32
240	464	341	123	27
เฉลี่ย	486	314		35

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.2 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	92
1.5	0	0	24.5	1	93
2.5	0	0	25.5	1	94
3.5	1	1	26.5	0	94
4.5	2	3	27.5	0	94
5.5	3	6	28.5	0	94
6.5	5	11	29.5	1	95
7.5	4	15	30.5	0	95
8.5	8	23	31.5	0	95
9.5	9	32	32.5	0	95
10.5	1	33	33.5	0	95
11.5	6	39	34.5	2	97
12.5	11	50	35.5	0	97
13.5	6	56	36.5	1	98
14.5	6	62	37.5	0	98
15.5	8	70	38.5	1	99
16.5	5	75	39.5	0	99
17.5	3	78	40.5	0	99
18.5	5	83	41.5	1	100
19.5	2	85			
20.5	3	88			
21.5	0	88			
22.5	2	90			



### ภาคผนวก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลสสูง 10 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของ  
น้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	590	262	328	56
30	498	254	245	49
60	538	315	223	41
90	551	341	210	38
120	599	319	280	47
150	590	337	254	43
180	525	302	223	43
210	538	297	240	45
240	551	354	197	36
เฉลี่ย	553	309		44

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.4 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 10 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	97
1.5	0	0	24.5	0	97
2.5	0	0	25.5	0	97
3.5	7	7	26.5	0	97
4.5	13	20	27.5	0	97
5.5	13	33	28.5	1	98
6.5	16	49	29.5	1	99
7.5	16	65	30.5	0	99
8.5	12	77	31.5	1	100
9.5	4	81			
10.5	1	82			
11.5	4	86			
12.5	3	89			
13.5	0	89			
14.5	3	92			
15.5	2	94			
16.5	0	94			
17.5	1	95			
18.5	0	95			
19.5	1	96			
20.5	1	97			
21.5	0	97			
22.5	0	97			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลสสูง 15 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของ  
น้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	469	142	327	70
30	361	168	194	54
60	387	163	224	58
90	323	159	163	51
120	340	142	198	58
150	374	155	219	59
180	426	159	267	63
210	439	172	267	61
240	490	181	310	63
เฉลี่ย	401	160		59

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.6 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 15 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	98
1.5	0	0	24.5	1	99
2.5	0	0	25.5	0	99
3.5	9	9	26.5	0	99
4.5	16	25	27.5	0	99
5.5	16	41	28.5	0	99
6.5	17	58	29.5	0	99
7.5	12	70	30.5	0	99
8.5	6	76	31.5	0	99
9.5	1	77	32.5	0	99
10.5	0	77	33.5	0	99
11.5	7	84	34.5	1	100
12.5	6	90			
13.5	3	93			
14.5	2	95			
15.5	2	97			
16.5	0	97			
17.5	0	97			
18.5	1	98			
19.5	0	98			
20.5	0	98			
21.5	0	98			
22.5	0	98			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลสสูง 20 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของ  
น้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	503	118	385	77
30	433	157	275	64
60	472	149	323	69
90	459	149	310	68
120	420	144	275	66
150	393	136	258	66
180	380	144	236	62
210	407	122	284	70
240	428	122	306	71
เฉลี่ย	433	138		68

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.8 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 20 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	99
1.5	0	0	24.5	0	99
2.5	0	0	25.5	0	99
3.5	10	10	26.5	0	99
4.5	14	24	27.5	0	99
5.5	15	39	28.5	0	99
6.5	16	55	29.5	0	99
7.5	7	62	30.5	0	99
8.5	10	72	31.5	0	99
9.5	5	77	32.5	0	99
10.5	1	78	33.5	1	100
11.5	6	84			
12.5	4	88			
13.5	2	90			
14.5	1	91			
15.5	3	94			
16.5	3	97			
17.5	0	97			
18.5	0	97			
19.5	0	97			
20.5	0	97			
21.5	0	97			
22.5	2	99			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 98.43 และอัตราการไหลของ  
น้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	470	368	102	22
30	533	394	140	26
60	470	356	114	24
90	470	368	102	22
120	432	330	102	24
150	419	317	102	24
180	483	351	131	27
210	394	301	93	24
240	406	317	89	22
เฉลี่ย	453	345		24

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.10 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 98.43 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	98
1.5	0	0	24.5	0	98
2.5	1	1	25.5	1	99
3.5	3	4	26.5	0	99
4.5	9	13	27.5	0	99
5.5	13	26	28.5	0	99
6.5	15	41	29.5	0	99
7.5	18	59	30.5	0	99
8.5	13	72	31.5	0	99
9.5	5	77	32.5	0	99
10.5	0	77	33.5	0	99
11.5	4	81	34.5	0	99
12.5	3	84	35.5	0	99
13.5	2	86	36.5	1	100
14.5	0	86			
15.5	3	89			
16.5	1	90			
17.5	4	94			
18.5	1	95			
19.5	1	96			
20.5	0	96			
21.5	1	97			
22.5	1	98			



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.11 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 97.64 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	425	283	142	33
30	388	279	108	28
60	400	288	113	28
90	438	296	142	32
120	421	292	129	31
150	413	292	121	29
180	375	250	125	33
210	388	271	117	30
240	446	325	121	27
เฉลี่ย	410	286		30

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.12 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 97.64 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	96
1.5	0	0	24.5	1	97
2.5	0	0	25.5	0	97
3.5	3	3	26.5	0	97
4.5	12	15	27.5	0	97
5.5	7	22	28.5	1	98
6.5	11	33	29.5	0	98
7.5	7	40	30.5	0	98
8.5	12	52	31.5	0	98
9.5	9	61	32.5	0	98
10.5	1	62	33.5	0	98
11.5	9	71	34.5	1	99
12.5	4	75	35.5	0	99
13.5	4	79	36.5	0	99
14.5	7	86	37.5	1	100
15.5	1	87			
16.5	2	89			
17.5	3	92			
18.5	3	95			
19.5	0	95			
20.5	0	95			
21.5	1	96			
22.5	0	96			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.13 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการ  
ไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	550	328	222	40
30	529	299	230	43
60	554	341	213	39
90	492	332	160	33
120	472	291	181	38
150	431	299	131	30
180	431	283	148	34
210	455	308	148	32
240	464	341	123	27
เฉลี่ย	486	314		35

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.14 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	92
1.5	0	0	24.5	1	93
2.5	0	0	25.5	1	94
3.5	1	1	26.5	0	94
4.5	2	3	27.5	0	94
5.5	3	6	28.5	0	94
6.5	5	11	29.5	1	95
7.5	4	15	30.5	0	95
8.5	8	23	31.5	0	95
9.5	9	32	32.5	0	95
10.5	1	33	33.5	0	95
11.5	6	39	34.5	2	97
12.5	11	50	35.5	0	97
13.5	6	56	36.5	1	98
14.5	6	62	37.5	0	98
15.5	8	70	38.5	1	99
16.5	5	75	39.5	0	99
17.5	3	78	40.5	0	99
18.5	5	83	41.5	1	100
19.5	2	85			
20.5	3	88			
21.5	0	88			
22.5	2	90			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.15 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.07 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	454	267	188	41
30	488	279	208	43
60	500	304	196	39
90	488	308	179	37
120	471	271	200	42
150	388	229	158	41
180	413	250	163	39
210	388	217	171	44
240	383	229	154	40
เฉลี่ย	441	262		41

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.16 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.07 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	97
1.5	0	0	24.5	0	97
2.5	0	0	25.5	0	97
3.5	7	7	26.5	1	98
4.5	15	22	27.5	0	98
5.5	9	31	28.5	0	98
6.5	10	41	29.5	0	98
7.5	6	47	30.5	0	98
8.5	5	52	31.5	0	98
9.5	18	70	32.5	1	99
10.5	5	75	33.5	0	99
11.5	10	85	34.5	0	99
12.5	5	90	35.5	0	99
13.5	0	90	36.5	0	99
14.5	1	91	37.5	1	100
15.5	0	91			
16.5	1	92			
17.5	2	94			
18.5	0	94			
19.5	1	95			
20.5	0	95			
21.5	0	95			
22.5	0	95			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.17 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 95.28 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	521	283	238	46
30	468	258	209	45
60	443	258	185	42
90	492	291	201	41
120	480	271	209	44
150	529	291	238	45
180	517	279	238	46
210	468	267	201	43
240	550	299	250	46
เฉลี่ย	496	278		44

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.18 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 95.28 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	99
1.5	0	0	24.5	0	99
2.5	0	0	25.5	0	99
3.5	7	7	26.5	0	99
4.5	8	15	27.5	0	99
5.5	14	29	28.5	0	99
6.5	12	41	29.5	0	99
7.5	15	56	30.5	0	99
8.5	13	69	31.5	0	99
9.5	2	71	32.5	0	99
10.5	2	73	33.5	0	99
11.5	5	78	34.5	0	99
12.5	0	78	35.5	1	100
13.5	3	81			
14.5	6	87			
15.5	5	92			
16.5	1	93			
17.5	0	93			
18.5	2	95			
19.5	0	95			
20.5	0	95			
21.5	1	96			
22.5	1	97			



### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.19 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	550	328	222	40
30	529	299	230	43
60	554	341	213	39
90	492	332	160	33
120	472	291	181	38
150	431	299	131	30
180	431	283	148	34
210	455	308	148	32
240	464	341	123	27
เฉลี่ย	486	314		35

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.20 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	92
1.5	0	0	24.5	1	93
2.5	0	0	25.5	1	94
3.5	1	1	26.5	0	94
4.5	2	3	27.5	0	94
5.5	3	6	28.5	0	94
6.5	5	11	29.5	1	95
7.5	4	15	30.5	0	95
8.5	8	23	31.5	0	95
9.5	9	32	32.5	0	95
10.5	1	33	33.5	0	95
11.5	6	39	34.5	2	97
12.5	11	50	35.5	0	97
13.5	6	56	36.5	1	98
14.5	6	62	37.5	0	98
15.5	8	70	38.5	1	99
16.5	5	75	39.5	0	99
17.5	3	78	40.5	0	99
18.5	5	83	41.5	1	100
19.5	2	85			
20.5	3	88			
21.5	0	88			
22.5	2	90			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.21 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 10 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	562	361	201	36
30	505	349	156	31
60	529	345	185	35
90	542	390	152	28
120	558	394	164	29
150	529	386	144	27
180	554	369	185	33
210	578	390	189	33
240	554	394	160	29
เฉลี่ย	546	375		31

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.22 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 10 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	94
1.5	0	0	24.5	0	94
2.5	1	1	25.5	0	94
3.5	4	5	26.5	0	94
4.5	8	13	27.5	2	96
5.5	13	26	28.5	0	96
6.5	6	32	29.5	0	96
7.5	8	40	30.5	1	97
8.5	5	45	31.5	0	97
9.5	10	55	32.5	0	97
10.5	6	61	33.5	1	98
11.5	7	68	34.5	1	99
12.5	3	71	35.5	1	100
13.5	6	77			
14.5	7	84			
15.5	3	87			
16.5	2	89			
17.5	1	90			
18.5	0	90			
19.5	2	92			
20.5	1	93			
21.5	1	94			
22.5	0	94			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.23 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการ  
ไหลของน้ำเสีย 15 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	533	386	148	28
30	480	373	107	22
60	517	373	144	28
90	517	361	156	30
120	542	382	160	30
150	542	369	172	32
180	480	373	107	22
210	505	386	119	24
240	517	386	131	25
เฉลี่ย	515	377		27

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.24 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 15 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	1	97
1.5	0	0	24.5	0	97
2.5	3	3	25.5	0	97
3.5	4	7	26.5	0	97
4.5	8	15	27.5	0	97
5.5	8	23	28.5	0	97
6.5	7	30	29.5	0	97
7.5	8	38	30.5	1	98
8.5	8	46	31.5	0	98
9.5	10	56	32.5	0	98
10.5	4	60	33.5	0	98
11.5	7	67	34.5	0	98
12.5	6	73	35.5	0	98
13.5	3	76	36.5	2	100
14.5	4	80			
15.5	5	85			
16.5	2	87			
17.5	1	88			
18.5	3	91			
19.5	3	94			
20.5	0	94			
21.5	1	95			
22.5	1	96			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.25 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 20 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	576	430	146	25
30	516	400	116	23
60	529	378	151	28
90	503	374	129	26
120	555	391	163	29
150	542	396	146	27
180	516	396	120	23
210	503	378	125	25
240	499	378	120	24
เฉลี่ย	527	391		26

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.26 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 20 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	96
1.5	0	0	24.5	0	96
2.5	1	1	25.5	1	97
3.5	5	6	26.5	0	97
4.5	11	17	27.5	0	97
5.5	9	26	28.5	0	97
6.5	13	39	29.5	2	99
7.5	10	49	30.5	0	99
8.5	12	61	31.5	0	99
9.5	7	68	32.5	0	99
10.5	1	69	33.5	0	99
11.5	6	75	34.5	0	99
12.5	4	79	35.5	1	100
13.5	2	81			
14.5	4	85			
15.5	2	87			
16.5	2	89			
17.5	3	92			
18.5	2	94			
19.5	0	94			
20.5	1	95			
21.5	1	96			
22.5	0	96			



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.27 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการ  
ไหลของน้ำเสีย 25 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	546	413	133	24
30	490	400	90	18
60	465	353	112	24
90	477	378	99	21
120	499	361	138	28
150	529	383	146	28
180	529	391	138	26
210	516	383	133	26
240	482	391	90	19
เฉลี่ย	504	384		24

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.3.28 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางเส้นใยสแตนเลสสูง 5 เซนติเมตร ความพรุน  
ร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 25 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	1	97
1.5	0	0	24.5	0	97
2.5	0	0	25.5	1	98
3.5	8	8	26.5	0	98
4.5	10	18	27.5	0	98
5.5	14	32	28.5	0	98
6.5	14	46	29.5	0	98
7.5	11	57	30.5	0	98
8.5	12	69	31.5	0	98
9.5	3	72	32.5	1	99
10.5	2	74	33.5	1	100
11.5	5	79			
12.5	2	81			
13.5	2	83			
14.5	3	86			
15.5	4	90			
16.5	1	91			
17.5	0	91			
18.5	1	92			
19.5	2	94			
20.5	0	94			
21.5	0	94			
22.5	2	96			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก.4 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ด้วยตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ ก.4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	493	316	178	36
30	480	320	160	33
60	453	302	151	33
90	493	311	182	37
120	471	293	178	38
150	480	316	164	34
180	507	311	196	39
210	520	333	187	36
240	533	320	213	40
เฉลี่ย	492	314		36

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.2 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	4	92
1.5	0	0	24.5	0	92
2.5	0	0	25.5	1	93
3.5	3	3	26.5	1	94
4.5	9	12	27.5	0	94
5.5	6	18	28.5	0	94
6.5	7	25	29.5	0	94
7.5	5	30	30.5	0	94
8.5	4	34	31.5	0	94
9.5	7	41	32.5	0	94
10.5	2	43	33.5	0	94
11.5	8	51	34.5	2	96
12.5	9	60	35.5	0	96
13.5	3	63	36.5	2	98
14.5	3	66	37.5	1	99
15.5	4	70	38.5	0	99
16.5	4	74	39.5	0	99
17.5	5	79	40.5	0	99
18.5	3	82	41.5	1	100
19.5	2	84			
20.5	3	87			
21.5	0	87			
22.5	1	88			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 10 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	498	271	227	46
30	533	280	253	48
60	507	267	240	47
90	507	258	249	49
120	511	276	236	46
150	480	253	227	47
180	493	262	231	47
210	493	249	244	50
240	502	271	231	46
เฉลี่ย	503	265		47

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.4 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 10 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	96
1.5	0	0	24.5	1	97
2.5	0	0	25.5	0	97
3.5	10	10	26.5	0	97
4.5	12	22	27.5	0	97
5.5	13	35	28.5	0	97
6.5	17	52	29.5	1	98
7.5	13	65	30.5	0	98
8.5	9	74	31.5	1	99
9.5	3	77	32.5	0	99
10.5	2	79	33.5	1	100
11.5	4	83			
12.5	3	86			
13.5	4	90			
14.5	1	91			
15.5	0	91			
16.5	1	92			
17.5	1	93			
18.5	1	94			
19.5	0	94			
20.5	1	95			
21.5	0	95			
22.5	1	96			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 15 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	542	200	342	63
30	520	227	293	56
60	507	200	307	61
90	480	191	289	60
120	529	187	342	65
150	547	196	351	64
180	560	213	347	62
210	533	204	329	62
240	520	213	307	59
เฉลี่ย	526	203		61

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.6 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 15 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	98
1.5	0	0	24.5	1	99
2.5	0	0	25.5	0	99
3.5	9	9	26.5	0	99
4.5	14	23	27.5	0	99
5.5	13	36	28.5	0	99
6.5	15	51	29.5	0	99
7.5	9	60	30.5	0	99
8.5	7	67	31.5	0	99
9.5	5	72	32.5	0	99
10.5	3	75	33.5	0	99
11.5	3	78	34.5	1	100
12.5	4	82			
13.5	3	85			
14.5	2	87			
15.5	3	90			
16.5	2	92			
17.5	2	94			
18.5	1	95			
19.5	1	96			
20.5	0	96			
21.5	0	96			
22.5	2	98			



### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 20 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	564	142	422	75
30	547	156	391	72
60	573	147	427	74
90	547	133	413	76
120	493	164	329	67
150	480	147	333	69
180	493	133	360	73
210	480	138	342	71
240	471	156	316	67
เฉลี่ย	517	146		72

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.8 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 20 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	1	98
1.5	0	0	24.5	0	98
2.5	0	0	25.5	0	98
3.5	8	8	26.5	0	98
4.5	14	22	27.5	0	98
5.5	14	36	28.5	1	99
6.5	16	52	29.5	0	99
7.5	11	63	30.5	0	99
8.5	11	74	31.5	0	99
9.5	5	79	32.5	0	99
10.5	3	82	33.5	1	100
11.5	3	85			
12.5	3	88			
13.5	1	89			
14.5	3	92			
15.5	2	94			
16.5	2	96			
17.5	0	96			
18.5	0	96			
19.5	0	96			
20.5	0	96			
21.5	0	96			
22.5	1	97			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลาง  
 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 98.43 และอัตราการไหล  
 ของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	463	315	149	32
30	433	337	96	22
60	446	345	101	23
90	459	350	109	24
120	455	328	127	28
150	511	350	162	32
180	498	345	153	31
210	472	350	122	26
240	450	328	122	27
เฉลี่ย	465	339		27

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.10 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 98.43 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	98
1.5	0	0	24.5	0	98
2.5	1	1	25.5	0	98
3.5	2	3	26.5	0	98
4.5	11	14	27.5	0	98
5.5	10	24	28.5	0	98
6.5	13	37	29.5	0	98
7.5	13	50	30.5	0	98
8.5	12	62	31.5	0	98
9.5	7	69	32.5	0	98
10.5	0	69	33.5	0	98
11.5	7	76	34.5	1	99
12.5	3	79	35.5	0	99
13.5	4	83	36.5	0	99
14.5	3	86	37.5	1	100
15.5	2	88			
16.5	2	90			
17.5	4	94			
18.5	1	95			
19.5	0	95			
20.5	0	95			
21.5	2	97			
22.5	1	98			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.11 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 97.64 และ  
อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	472	310	162	34
30	485	332	153	32
60	498	337	162	32
90	498	337	162	32
120	481	328	153	32
150	472	328	144	31
180	498	319	179	36
210	472	341	131	28
240	481	328	153	32
เฉลี่ย	484	329		32

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.12 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 97.64 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	95
1.5	0	0	24.5	1	96
2.5	0	0	25.5	1	97
3.5	2	2	26.5	0	97
4.5	8	10	27.5	0	97
5.5	5	15	28.5	0	97
6.5	8	23	29.5	0	97
7.5	6	29	30.5	0	97
8.5	8	37	31.5	0	97
9.5	9	46	32.5	0	97
10.5	2	48	33.5	0	97
11.5	8	56	34.5	1	98
12.5	7	63	35.5	0	98
13.5	5	68	36.5	1	99
14.5	7	75	37.5	0	99
15.5	5	80	38.5	1	100
16.5	3	83			
17.5	2	85			
18.5	5	90			
19.5	1	91			
20.5	1	92			
21.5	1	93			
22.5	2	95			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.13 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	493	316	178	36
30	480	320	160	33
60	453	302	151	33
90	493	311	182	37
120	471	293	178	38
150	480	316	164	34
180	507	311	196	39
210	520	333	187	36
240	533	320	213	40
เฉลี่ย	492	314		36

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.14 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	4	92
1.5	0	0	24.5	0	92
2.5	0	0	25.5	1	93
3.5	3	3	26.5	1	94
4.5	9	12	27.5	0	94
5.5	6	18	28.5	0	94
6.5	7	25	29.5	0	94
7.5	5	30	30.5	0	94
8.5	4	34	31.5	0	94
9.5	7	41	32.5	0	94
10.5	2	43	33.5	0	94
11.5	8	51	34.5	2	96
12.5	9	60	35.5	0	96
13.5	3	63	36.5	2	98
14.5	3	66	37.5	1	99
15.5	4	70	38.5	0	99
16.5	4	74	39.5	0	99
17.5	5	79	40.5	0	99
18.5	3	82	41.5	1	100
19.5	2	84			
20.5	3	87			
21.5	0	87			
22.5	1	88			



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.15 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.07 และ  
อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	455	258	197	43
30	485	284	201	41
60	485	280	205	42
90	446	267	179	40
120	437	267	170	39
150	446	275	170	38
180	485	271	214	44
210	498	267	232	46
240	498	254	245	49
เฉลี่ย	471	269		43

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.16 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.07 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	94
1.5	0	0	24.5	1	95
2.5	0	0	25.5	0	95
3.5	4	4	26.5	1	96
4.5	9	13	27.5	0	96
5.5	5	18	28.5	0	96
6.5	8	26	29.5	1	97
7.5	5	31	30.5	0	97
8.5	7	38	31.5	1	98
9.5	13	51	32.5	0	98
10.5	3	54	33.5	0	98
11.5	8	62	34.5	1	99
12.5	8	70	35.5	0	99
13.5	3	73	36.5	0	99
14.5	3	76	37.5	0	99
15.5	4	80	38.5	1	100
16.5	4	84			
17.5	2	86			
18.5	3	89			
19.5	1	90			
20.5	1	91			
21.5	0	91			
22.5	1	92			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.17 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 95.28 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	503	236	267	53
30	498	271	227	46
60	446	223	223	50
90	511	249	262	51
120	463	249	214	46
150	472	249	223	47
180	446	258	188	42
210	420	232	188	45
240	542	254	289	53
เฉลี่ย	478	247		48

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.18 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 95.28 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	97
1.5	0	0	24.5	0	97
2.5	0	0	25.5	0	97
3.5	8	8	26.5	1	98
4.5	12	20	27.5	0	98
5.5	11	31	28.5	0	98
6.5	11	42	29.5	0	98
7.5	10	52	30.5	0	98
8.5	10	62	31.5	1	99
9.5	10	72	32.5	0	99
10.5	3	75	33.5	0	99
11.5	7	82	34.5	0	99
12.5	3	85	35.5	0	99
13.5	2	87	36.5	0	99
14.5	3	90	37.5	1	100
15.5	2	92			
16.5	1	93			
17.5	2	95			
18.5	1	96			
19.5	0	96			
20.5	0	96			
21.5	1	97			
22.5	0	97			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.19 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	493	316	178	36
30	480	320	160	33
60	453	302	151	33
90	493	311	182	37
120	471	293	178	38
150	480	316	164	34
180	507	311	196	39
210	520	333	187	36
240	533	320	213	40
เฉลี่ย	492	314		36

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.20 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	4	92
1.5	0	0	24.5	0	92
2.5	0	0	25.5	1	93
3.5	3	3	26.5	1	94
4.5	9	12	27.5	0	94
5.5	6	18	28.5	0	94
6.5	7	25	29.5	0	94
7.5	5	30	30.5	0	94
8.5	4	34	31.5	0	94
9.5	7	41	32.5	0	94
10.5	2	43	33.5	0	94
11.5	8	51	34.5	2	96
12.5	9	60	35.5	0	96
13.5	3	63	36.5	2	98
14.5	3	66	37.5	1	99
15.5	4	70	38.5	0	99
16.5	4	74	39.5	0	99
17.5	5	79	40.5	0	99
18.5	3	82	41.5	1	100
19.5	2	84			
20.5	3	87			
21.5	0	87			
22.5	1	88			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.21 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และ  
อัตราการไหลของน้ำเสีย 10 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	525	358	166	32
30	498	354	144	29
60	472	337	136	29
90	485	358	127	26
120	481	332	149	31
150	498	337	162	32
180	538	354	184	34
210	525	358	166	32
240	538	337	201	37
เฉลี่ย	507	347		31

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.22 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 10 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	93
1.5	0	0	24.5	0	93
2.5	1	1	25.5	1	94
3.5	4	5	26.5	0	94
4.5	8	13	27.5	1	95
5.5	9	22	28.5	0	95
6.5	7	29	29.5	0	95
7.5	6	35	30.5	1	96
8.5	5	40	31.5	0	96
9.5	9	49	32.5	0	96
10.5	4	53	33.5	0	96
11.5	7	60	34.5	2	98
12.5	6	66	35.5	0	98
13.5	5	71	36.5	2	100
14.5	4	75			
15.5	4	79			
16.5	3	82			
17.5	3	85			
18.5	1	86			
19.5	2	88			
20.5	3	91			
21.5	0	91			
22.5	0	91			



### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.23 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และ  
อัตราการไหลของน้ำเสีย 15 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	520	380	140	27
30	538	380	157	29
60	525	380	144	28
90	551	398	153	28
120	560	358	201	36
150	538	389	149	28
180	498	358	140	28
210	472	354	118	25
240	529	389	140	26
เฉลี่ย	526	376		28

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.24 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 15 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	2	95
1.5	0	0	24.5	1	96
2.5	2	2	25.5	0	96
3.5	3	5	26.5	0	96
4.5	5	10	27.5	0	96
5.5	5	15	28.5	0	96
6.5	6	21	29.5	1	97
7.5	6	27	30.5	0	97
8.5	8	35	31.5	0	97
9.5	9	44	32.5	0	97
10.5	3	47	33.5	0	97
11.5	7	54	34.5	0	97
12.5	8	62	35.5	1	98
13.5	4	66	36.5	1	99
14.5	5	71	37.5	1	100
15.5	7	78			
16.5	4	82			
17.5	1	83			
18.5	5	88			
19.5	2	90			
20.5	1	91			
21.5	1	92			
22.5	1	93			

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.25 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 20 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	542	407	136	25
30	551	402	149	27
60	564	385	179	32
90	538	372	166	31
120	542	389	153	28
150	498	380	118	24
180	485	376	109	23
210	525	415	109	21
240	551	385	166	30
เฉลี่ย	533	390		27

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.26 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 20 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	1	94
1.5	0	0	24.5	0	94
2.5	1	1	25.5	1	95
3.5	4	5	26.5	1	96
4.5	10	15	27.5	0	96
5.5	7	22	28.5	1	97
6.5	11	33	29.5	0	97
7.5	7	40	30.5	0	97
8.5	10	50	31.5	1	98
9.5	9	59	32.5	1	99
10.5	3	62	33.5	0	99
11.5	7	69	34.5	0	99
12.5	6	75	35.5	0	99
13.5	2	77	36.5	0	99
14.5	4	81	37.5	0	99
15.5	3	84	38.5	0	99
16.5	3	87	39.5	1	100
17.5	2	89			
18.5	2	91			
19.5	1	92			
20.5	0	92			
21.5	0	92			
22.5	1	93			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.27 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุ  
ตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร ความพรุนร้อยละ 96.85 และ  
อัตราการไหลของน้ำเสีย 25 ลิตรต่อชั่วโมง

t (min)	Influent COD (mg/L)	Effluent COD (mg/L)	$\Delta$ COD	%Removal
0	503	376	127	25
30	498	385	114	23
60	538	389	149	28
90	511	354	157	31
120	533	376	157	30
150	485	372	114	23
180	498	385	114	23
210	525	411	114	22
240	542	393	149	27
เฉลี่ย	515	382		26

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.4.28 ร้อยละการกระจายขนาดและร้อยละสะสมของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่ผ่าน  
อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่บรรจุตัวกลางที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวสูง 5 เซนติเมตร  
ความพรุนร้อยละ 96.85 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 25 ลิตรต่อชั่วโมง

ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวนสะสม (ร้อยละ)
0.5	0	0	23.5	0	95
1.5	0	0	24.5	1	96
2.5	0	0	25.5	1	97
3.5	7	7	26.5	0	97
4.5	10	17	27.5	0	97
5.5	11	28	28.5	0	97
6.5	11	39	29.5	0	97
7.5	8	47	30.5	0	97
8.5	10	57	31.5	0	97
9.5	7	64	32.5	0	97
10.5	4	68	33.5	2	99
11.5	6	74	34.5	0	99
12.5	2	76	35.5	0	99
13.5	3	79	36.5	0	99
14.5	4	83	37.5	1	100
15.5	3	86			
16.5	1	87			
17.5	1	88			
18.5	3	91			
19.5	1	92			
20.5	1	93			
21.5	0	93			
22.5	2	95			

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก.5 การศึกษาการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปร  
ไร้หน่วยกับอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์

ตารางที่ ก.5.1 ความดันลดต่อความสูงชั้นตัวกลางกับความเร็วการไหลของน้ำผ่านชั้นตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลส

H (m)	m (kg)	Q (LPH)	$h_L$ (mmH <sub>2</sub> O)	$v_0$ (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	$\rho_{\text{bulk}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon$	$\Delta P/H$
0.2	0.084	39.13	5	0.0072	48.9	276	0.9528	245
0.2	0.084	60.75	8	0.0111	78.2	276	0.9528	391
0.2	0.084	80.45	13	0.0147	127.1	276	0.9528	636
0.2	0.084	101.17	18	0.0185	176.1	276	0.9528	880
0.2	0.084	108.12	19	0.0198	185.8	276	0.9528	929
0.2	0.084	121.14	22	0.0221	215.2	276	0.9528	1076
0.2	0.084	143.20	29	0.0262	283.6	276	0.9528	1418
0.1	0.042	59.40	3	0.0109	29.3	276	0.9528	293
0.1	0.042	76.00	5	0.0139	48.9	276	0.9528	489
0.1	0.042	105.61	8	0.0193	78.2	276	0.9528	782
0.1	0.042	124.89	11	0.0228	107.6	276	0.9528	1076
0.1	0.042	143.95	14	0.0263	136.9	276	0.9528	1369
0.2	0.07	55.10	5	0.0101	48.9	230	0.9607	245
0.2	0.07	83.79	9	0.0153	88.0	230	0.9607	440
0.2	0.07	101.63	11	0.0186	107.6	230	0.9607	538
0.2	0.07	122.57	16	0.0224	156.5	230	0.9607	782
0.2	0.07	144.95	20	0.0265	195.6	230	0.9607	978
0.1	0.035	74.19	3	0.0136	29.3	230	0.9607	293
0.1	0.035	99.59	5	0.0182	48.9	230	0.9607	489
0.1	0.035	118.06	7	0.0216	68.5	230	0.9607	685
0.1	0.035	138.78	9	0.0254	88.0	230	0.9607	880

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.5.1 ความดันลดต่อความสูงชั้นตัวกลางกับความเร็วการไหลของน้ำผ่านชั้นตัวกลาง  
เส้นใยสแตนเลส (ต่อ)

H (m)	m (kg)	Q (LPH)	$h_L$ (mmH <sub>2</sub> O)	$v_0$ (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	$\rho_{\text{bulk}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon$	$\Delta P/H$
0.2	0.056	83.56	5	0.0153	48.9	184	0.9685	245
0.2	0.056	98.59	7	0.0180	68.5	184	0.9685	342
0.2	0.056	125.21	11	0.0229	107.6	184	0.9685	538
0.2	0.056	141.47	13	0.0259	127.1	184	0.9685	636
0.1	0.028	104.22	3	0.0190	29.3	184	0.9685	293
0.1	0.028	121.69	4	0.0222	39.1	184	0.9685	391
0.1	0.028	141.78	5	0.0259	48.9	184	0.9685	489

ตารางที่ ก.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสแตนเลสในรูปของทรงกลมที่ความพรุนต่างๆ

$\varepsilon$	$d_p$ (m)
0.9528	0.0155
0.9607	0.0167
0.9685	0.0187
0.9764	0.0202
0.9843	0.0219

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.5.3 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)

Exp	$m_{\text{Bed}}$ (kg)	H (m)	Q (LPH)	$C_s$ (mg/L)	$C_0$ (mg/L)	$\rho_{\text{bulk}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon$	$d_p$ (m)	$v_0$ (m/s)	$\eta_{\text{Sed}}$	$\eta_{\text{Int}}$	$\eta_{\text{Diff}}$	$\eta_T$	X	$-\ln(C_s/C_0)$
5 cm	0.014	0.05	5	314	486	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	0.36687	0.436816
10 cm	0.028	0.1	5	309	553	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	0.73374	0.582017
15 cm	0.042	0.15	5	160	401	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	1.10061	0.918788
20 cm	0.056	0.2	5	138	433	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	1.46747	1.143484
98.43%	0.007	0.05	5	345	453	92	0.9843	0.0219	0.00091	0.008616	7.77E-03	0.000199	0.016583	0.13407	0.272348
97.64%	0.0105	0.05	5	286	410	138	0.9764	0.0202	0.00091	0.008616	9.08E-03	0.00021	0.017905	0.23475	0.360165
96.07%	0.0175	0.05	5	262	441	230	0.9607	0.0167	0.00091	0.008616	1.34E-02	0.000239	0.022227	0.58948	0.5207
95.28%	0.021	0.05	5	278	496	276	0.9528	0.0155	0.00091	0.008616	1.56E-02	0.000251	0.024438	0.83921	0.578955
10 LPH	0.014	0.05	10	375	546	184	0.9685	0.0187	0.00183	0.004308	1.06E-02	0.000139	0.01504	0.28398	0.375693
15 LPH	0.014	0.05	15	377	515	184	0.9685	0.0187	0.00274	0.002872	1.06E-02	0.000106	0.013571	0.25625	0.311922
20 LPH	0.014	0.05	20	391	527	184	0.9685	0.0187	0.00365	0.002154	1.06E-02	8.76E-05	0.012834	0.24234	0.298493
25 LPH	0.014	0.05	25	384	504	184	0.9685	0.0187	0.00457	0.001723	1.06E-02	7.55E-05	0.012391	0.23398	0.271934

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก.5.4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (กลไกการกรอง) ที่ใช้ตัวกลางเส้นใยสแตนเลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X)

Exp	$m_{\text{Bed}}$ (kg)	H (m)	Q (LPH)	$C_s$ (mg/L)	$C_0$ (mg/L)	$\rho_{\text{bulk}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon$	$d_p$ (m)	$v_0$ (m/s)	$\eta_{\text{Sed}}$	$\eta_{\text{Int}}$	$\eta_{\text{Diff}}$	$\eta_{\text{T}}$	X	$-\ln(C_s/C_0)$
5 cm	0.014	0.05	5	314	492	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	0.36687	0.449086
10 cm	0.028	0.1	5	265	503	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	0.73374	0.64086
15 cm	0.042	0.15	5	203	526	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	1.10061	0.952095
20 cm	0.056	0.2	5	146	517	184	0.9685	0.0187	0.00091	0.008616	1.06E-02	0.000221	0.019429	1.46747	1.264436
98.43%	0.007	0.05	5	339	465	92	0.9843	0.0219	0.00091	0.008616	7.77E-03	0.000199	0.016583	0.13407	0.316037
97.64%	0.0105	0.05	5	329	484	138	0.9764	0.0202	0.00091	0.008616	9.08E-03	0.00021	0.017905	0.23475	0.386027
96.07%	0.0175	0.05	5	268	471	230	0.9607	0.0167	0.00091	0.008616	1.34E-02	0.000239	0.022227	0.58948	0.563871
95.28%	0.021	0.05	5	247	478	276	0.9528	0.0155	0.00091	0.008616	1.56E-02	0.000251	0.024438	0.83921	0.660222
10 LPH	0.014	0.05	10	347	507	184	0.9685	0.0187	0.00183	0.004308	1.06E-02	0.000139	0.01504	0.28398	0.379186
15 LPH	0.014	0.05	15	376	526	184	0.9685	0.0187	0.00274	0.002872	1.06E-02	0.000106	0.013571	0.25625	0.335712
20 LPH	0.014	0.05	20	390	533	184	0.9685	0.0187	0.00365	0.002154	1.06E-02	8.76E-05	0.012834	0.24234	0.312375
25 LPH	0.014	0.05	25	382	515	184	0.9685	0.0187	0.00457	0.001723	1.06E-02	7.55E-05	0.012391	0.23398	0.298746



ภาคผนวก ข  
บทความทางวิชาการ

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

วุฒิวิต หล่อตระกุล, ปฏิภาณ ปัญญาพกุล และพิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, การศึกษากระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องโดยเส้นใยสแตนเลส, วารสารวิศวกรรมศาสตร์, ฉบับที่ 1, เล่มที่ 3/2553, ISSN 1906-3636, หน้า 63 - 72

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.63

# การศึกษากระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องโดยเส้นใยสแตนเลส

วุฒิวิต หล่อตระกุล, ปฏิภาณ ปัญญาพกุล และ  
พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล\*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330  
E-mail: yoi\_@hotmail.com, patipam.p@eng.chula.ac.th  
and pisut.p@chula.ac.th\*, pisut114@hotmail.com\*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์เพื่อแยกน้ำมันเครื่องปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย โดยทำการวิเคราะห์ที่น้ำมันในน้ำเสียด้วยค่าซีไอดีและขนาดของอนุภาคน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากการทดลองพบว่าเส้นใยสแตนเลสมีสมบัติความไม่ชอบน้ำและมีขนาดมุมสัมผัสของหยดน้ำเท่ากับ 87.2 องศา ค่าซีไอดีของน้ำเสียที่ผ่านชั้นตัวกลางความสูง 5 - 20 เซนติเมตร และความพรุน 0.9528 - 0.9843 มีค่าลดลง โดยมีประสิทธิภาพบำบัดอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 68 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) ของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 10.5 ไมครอน เป็น 14.8 - 22.6 ไมครอน ซึ่งเกิดจากกลไกการกรองและการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ นอกจากนี้ สมการประสิทธิภาพการกรองได้ถูกประยุกต์ใช้ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) เพื่อควบคุมระบบบำบัดและวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการจับยึด (α) ของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางเส้นใยสแตนเลส โดยค่า X และ α จากการทดลองคือ 0.00109 และ 123.35 ตามลำดับ

### คำสืบค้น

โคเอเลสเซนซ์, เส้นใยสแตนเลส, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์, สมการประสิทธิภาพการกรอง

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.03

## STUDY OF COALESCENCE PROCESS FOR TREATING LUBRICANT OILY WASTEWATER BY STAINLESS STEEL FIBROUS COALESCER

Wootiwat Lortragool, Patiparn Punyapalaku and  
Pisut Painmanakul\*

Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,  
Bangkok, Thailand 10330

E-mail: yoi\_@hotmail.com, patiparn.p@eng.chula.ac.th  
and pisut.p@chula.ac.th\*, pisut114@hotmail.com\*

### ABSTRACT

The objective of this work is to study the treatment of oily wastewater by using stainless steel fibrous coalescer. In this study, the lubricant oil presence in wastewater were analysed in term of the COD value and oil droplet size. The results have shown that, stainless steel fibrous has hydrophobic surface with 87.20 of contact angle. The removal efficiency (35 – 68%) can be obtained by the 5 – 20 cm stainless bed depth and the 0.9528 – 0.9843 bed porosity. Moreover, the oil droplet sizes in term of sauter mean diameter ( $d_{32}$ ) were increased from 10.5  $\mu\text{m}$  to the range of 14.8 – 22.6  $\mu\text{m}$ . In order to understand the filtration and coalescence mechanism, the filtration efficiency equation was applied in order to propose the dimensionless parameter ( $X$ ) for controlling the coalescer system and also determining the attachment efficiency ( $\alpha$ ). The obtained values of  $X$  and  $\alpha$  were 0.00109 and 123.35, in this study.

### KEYWORDS

coalescer, stainless steel fibrous, sauter oil droplet diameter, filtration efficiency equation

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejtn.2009.1.3.63

### I. บทนำ

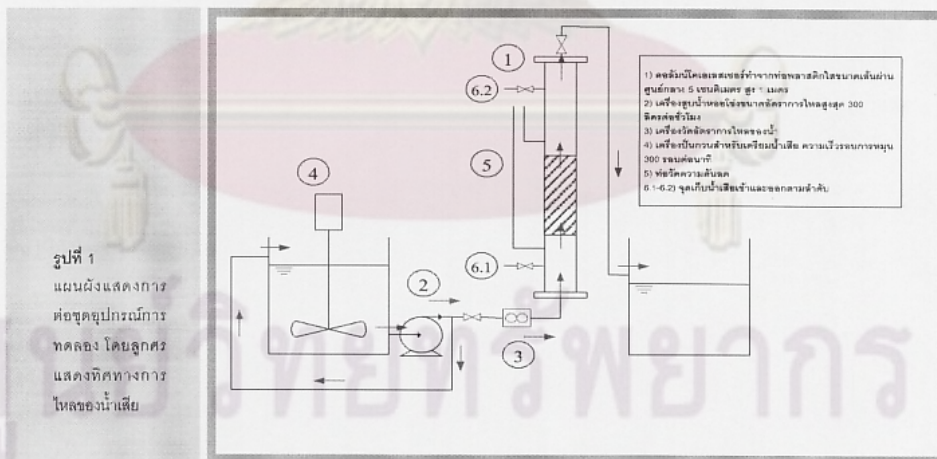
น้ำมันเป็นหนึ่งในมลสารสำคัญที่สามารถปนเปื้อนโดยทั่วไปอยู่ในน้ำเสีย ทั้งในน้ำเสียจากชุมชน เกษตรกรรม หรืออุตสาหกรรม ซึ่งน้ำมันเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากและเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาหรือรบกวนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย [1] – [3] จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดหรือแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่ท่อน้ำทิ้งหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยน้ำมันจะปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้หลายลักษณะ เช่น น้ำมันละลายน้ำ น้ำมันเป็นชั้นฟิล์มอยู่เหนือผิวน้ำ และน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ [1], [3], [4], [11], [15]

กระบวนการโคเอเลสเซนซ์เป็นกระบวนการทางกายภาพ ที่ใช้แยกอนุภาคอิมัลชันต่างๆ เช่น อนุภาคน้ำมันในน้ำ ด้วยการไหลผ่านชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งอนุภาคน้ำมันจะเกิดการชนและเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกลาง เมื่ออนุภาคน้ำมันอื่นไหลตามมาเกิดการชนและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่ก่อน จะทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจนหลุดออกจากชั้นตัวกลาง และสามารถแยกออกจากน้ำได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้แยกด้วยแรงโน้มถ่วงในถังตกตะกอน (ตามกฎหมายของโตกลส์) [4], [6], [11], [15] ทั้งนี้กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกของการกรอง เนื่องจากมีการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยพื้นผิวของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์เป็นลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ ซึ่งตัวกลางควรมีพื้นผิวที่รอบอนุภาคอิมัลชันหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic media) [8], [11], [15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากำรนำเส้นใยสแตนเลสซึ่งหาได้ง่าย มาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ โดยศึกษาผลของความเร็วและความพรุนของชั้นตัวกลางต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ และประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไว้หน่วยสำหรับการควบคุมระบบและโมเดลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์

### II. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ajph.2009.1.3.63

### 2.1 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนเส้นใยสแตนเลสสำหรับงานขัดล้าง ตราฟูจิไบรท์ ของบริษัทยูนิเวลล์ (เอเชีย) จำกัด

### 2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมจากน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน พีทีที 71-120 ชนิดเกรดเดี่ยว SAE 40 ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ผสมกับน้ำประปาให้มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาปั่นจนผสมด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที [1] และเติมน้ำเสียในถังด้วยเครื่องสูบน้ำหยิ่ง โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้ มีลักษณะเป็นอิมัลชันของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กและมีซีไอติน้ำเข้าประมาณ 460 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

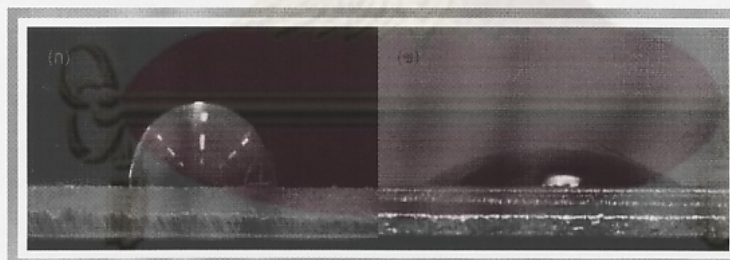
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรความสูงและความพรุนของชั้นตัวกลางต่อการควบรวมการโคเอเลสเซนซ์ โดยใช้ค่าร้อยละการกำจัดซีไอดีและขนาดน้ำมันที่เปลี่ยนไปเป็นตัวชี้วัด ซึ่งทำการวิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าซีไอดี [10], [14] ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด [5] และคำนวณร้อยละการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน ทำการวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์ [11] ถ่ายภาพและวัดขนาดด้วยคอมพิวเตอร์ และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์ ( $d_{32}$ ) เป็นตัวแทนขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (1)$$

## III. ผลการทดลองและวิจารณ์

### 3.1 ลักษณะทางกายภาพตัวกลางเส้นใยสแตนเลส



รูปที่ 2  
หัตถ์ของเหลวปริมาณ  
5 ไมโครลิตร บน  
พื้นผิวสแตนเลส 304  
(ก) หัตถ์น้ำ  
(ข) หัตถ์น้ำมัน

เส้นใยสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองเป็นเส้นใยที่ผลิตมาจากสแตนเลสเกรด 304 โดยเส้นใยมีลักษณะแบบขนาดความกว้าง 470 ไมครอนและหนา 40 ไมครอน มีความหนาแน่น 5,855 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วัดขนาดมุมสัมผัสของหยดน้ำและน้ำมันได้ 87.2 และ 21.1 องศาตามลำดับ (รูปที่ 2) ซึ่งแสดงว่าพื้นผิวของเส้นใยสแตนเลสมีความไม่ชอบน้ำ (หรือพื้นผิวชอบน้ำมัน) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์สำหรับแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆที่มีการประยุกต์ใช้เส้นใยดังกล่าวเพื่อเป็นตัวกลางสำหรับกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ [12], [15] นอกจากนี้

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.63

สามารถคำนวณค่าดัชนีของความกลม (Sphericity,  $\Psi$ ) ของเส้นใยได้จากการจัดรูปสมการให้พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับเส้นใยอยู่ในรูปของปริมาตรของเส้นใย ดังสมการต่อไปนี้ [16]

$$\Psi = \frac{A_{\text{Sphere}}}{A_{\text{Particle}}} = \frac{(36\pi V_{\text{Particle}}^2)^{\frac{1}{3}}}{A_{\text{Particle}}} \quad (2)$$

โดยที่  $A_{\text{Sphere}}$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับเส้นใยที่กำหนด

$A_{\text{Particle}}, V_{\text{Particle}}$  คือ พื้นที่ผิวและปริมาตรของเส้นใยที่กำหนด

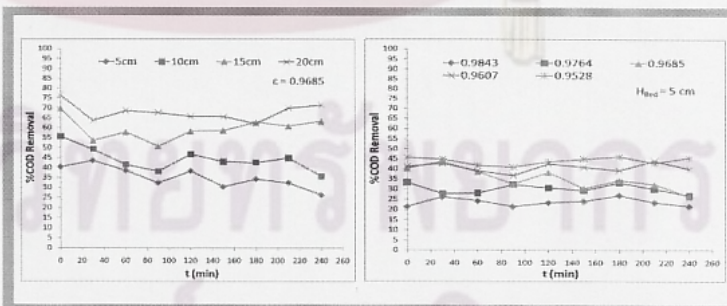
ทั้งนี้ เมื่อคำนวณตามสมการข้างต้นพบว่าค่าดัชนีความกลมของเส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.0067 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวกลางอื่น (Ottawa sand = 0.95, Rounded sand = 0.83) [2] เนื่องจากตัวกลางมีลักษณะเป็นฝอยเส้นใยจึงมีพื้นที่ผิวสูง โดยค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาตัวแปรสำหรับการประยุกต์ใช้สมการการกรอง เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและกลไกการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ต่อไป

### 3.2 ผลกระทบของความสูงและความพรุนของตัวกลางต่อกระบวนการ

#### โคเอเลสเซนซ์

จากการศึกษาผลกระทบของความสูง (Bed height) และความพรุน (Bed porosity) ของตัวกลางต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ (ไม่เกิน 1 เซนติเมตรต่อวินาที) [15] ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าโคเอเลสเซอร์สามารถบำบัดน้ำเสียเป็นน่าน้ำดื่มได้โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นตัวกลางในช่วง 5 - 20 เซนติเมตร (ที่ความพรุน 0.9685) โคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 68 โดยความสูงของชั้นตัวกลางที่มากขึ้น โคเอเลสเซอร์จะสามารถกำจัดซีไอดีได้มากขึ้นด้วย ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนแปลงความพรุนของชั้นตัวกลาง (ที่ความสูง 5 เซนติเมตร) ในช่วง 0.9843 - 0.9528 จะพบว่าโคเอเลสเซอร์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 24 - 44 โดยค่าความพรุนที่มากขึ้นจะส่งผลให้โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นกล่าวได้ว่าความสูงของชั้นตัวกลางที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการดักจับอนุภาคน้ำมันภายในในปริมาณมากขึ้น ในขณะที่ความพรุนของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในชั้นตัวกลางลดลง จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันได้น้อยลงและทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดลง [7], [13] โดยความสำคัญของทั้งสองตัวแปรดังกล่าวถึงข้างต้นมีความสัมพันธ์กับสมการการกรอง [4], [6] ซึ่งจะได้นำมาประยุกต์ใช้ต่อไป

รูปที่ 3  
ผลกระทบของ (ก)  
ความสูง และ (ข)  
ความพรุนของตัวกลาง  
ต่อประสิทธิภาพของโค  
เอเลสเซอร์





## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/fejth.2009.1.3.63

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์การทำงานของโคเอเลสเซอร์ (รูปที่ 3) จะเห็นได้ว่าตลอดช่วงเวลาของการเดินระบบจะมีน้ำมันบางส่วนที่หายไป ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ภายในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งส่งผลให้น้ำมันบางส่วนติดค้างอยู่บนชั้นตัวกลาง โดยอนุภาคน้ำมันที่ถูกกรองเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ก็จะหลุดออกจากชั้นตัวกลาง จึงทำให้เกิดการกรองและหลุดออกจากชั้นตัวกลางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นหยดน้ำมันขนาดใหญ่เหล่านี้ที่แยกตัวออกจากรุ่นน้ำเสีย ทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอต่อกับน้ำที่ออกจากระบบได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีปริมาณซีไอที่หายไป และมีแนวโน้มเกิดขึ้นค่อนข้างคงที่ (จากผลประสิทธิภาพการกำจัดซีไอที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) หรืออาจกล่าวได้ว่าทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ ซึ่งจัดเป็นข้อดีประการสำคัญของการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์นี้ได้ในระยะเวลานาน โดยไม่ต้องการบำรุงรักษาบ่อยๆ [4]

### 3.3 สมการประสิทธิภาพการกรองและการหาค่าตัวแปรต่างๆในสมการ

เนื่องจากกลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์มีการติดของอนุภาคน้ำมันบนชั้นตัวกลางเช่นเดียวกับกลไกการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการประสิทธิภาพการกรองมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ [6] ดังสมการต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{3}{2}\alpha\eta_r(1-\varepsilon)\frac{H_{bed}}{D_p} \quad (3)$$

โดยที่  $C$ ,  $C_0$  คือ ค่าซีไอของน้ำที่ออก, ที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์

ตามลำดับ

$\alpha$  คือ ประสิทธิภาพในการจับยึดของอนุภาคกับตัวกลาง

$\eta_r$  คือ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด

$\varepsilon$  คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง

$H_{bed}$  คือ ความสูงชั้นตัวกลาง

$D_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

จากการวิเคราะห์สมการประสิทธิภาพการกรองข้างต้นแล้ว จะพบว่าตัวแปร  $\eta_r\varepsilon H_{bed}$  และ  $D_p$  เมื่อคำนวณตามสมการแล้ว จะมีลักษณะเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ซึ่งกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$X = \frac{3}{2}\eta_r(1-\varepsilon)\frac{H_{bed}}{D_p} \quad (4)$$

อย่างไรก็ตาม สมการประสิทธิภาพการกรองนี้ เป็นสมการประสิทธิภาพของตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม [4], [6] ดังนั้นการนำสมการนี้มาคำนวณประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางชนิดเส้นใย จะต้องทำการคำนวณค่าตัวแปรในสมการบางตัวให้อยู่ในรูปที่เทียบเท่ากับของทรงกลม จึงจะสามารถนำมาคำนวณในสมการประสิทธิภาพการกรองได้

#### 3.3.1 การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสเดนเลส

การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยให้อยู่ในรูปของทรงกลม ( $D_p$ ) จะคำนวณได้จากสมการของเออร์กิน (Ergun's equation) ดังนี้ [9]

$$\frac{\Delta P}{H_{bed}} = \frac{150V_0\mu(1-\varepsilon)^2}{\psi^2 D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho V_0^2(1-\varepsilon)}{\psi D_p \varepsilon^3} \quad (5)$$

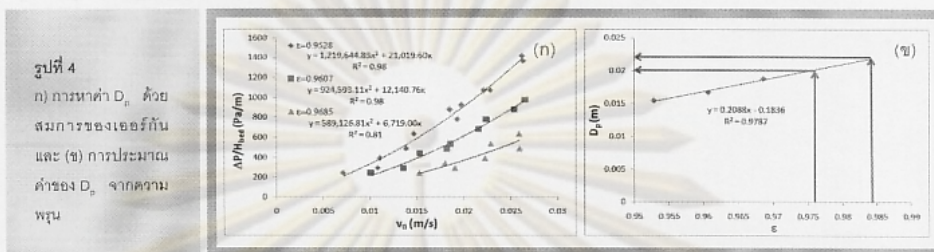
โดยที่  $\Delta P$  คือ ความดันลดที่เกิดขึ้นจากชั้นตัวกลาง

$V_0$  คือ ความเร็วการไหลของน้ำ

ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejrh.2009.1.3.63

$\mu$  คือ ความหนืดของน้ำ  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ



ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองเพื่อหาค่า  $D_p$  เหมือนรูปทรงกลมของเส้นใยสแตนเลส โดยปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยความพรุนต่างๆกัน ที่อัตราการไหลระหว่าง 40 - 140 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อวัดค่าความดันตก ( $\Delta P$ ) ที่เกิดขึ้น และนำค่าดังกล่าวไปหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกต่อความสูงชั้นตัวกลางและความเร็วการไหล ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) เมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองกับสมการของเออร์กิน ก็จะสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในรูปทรงกลม ( $D_p$ ) ที่ความพรุนของชั้นตัวกลางต่างๆได้ ดังรูปที่ 4 (ข) ซึ่งค่า  $D_p$  จะแปรผันตามกันกับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง [9] โดยค่า  $D_p$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1**  
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในรูปทรงกลมที่ความพรุนต่างๆ

$\epsilon$	$D_p$ (mm)
0.9528	15.5
0.9607	16.7
0.9685	18.7
0.9764	20.3
0.9843	21.9

3.3.2 การหาค่าประสิทธิภาพในการส่งถ่ายอนุภาคน้ำมันเข้าสู่สัมผัสกับตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ( $\eta_r$ )

ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด ( $\eta_r$ ) ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพในการตกตะกอน ( $\eta_{sed}$ ) ประสิทธิภาพในการปะทะโดยตรง ( $\eta_{hit}$ ) และประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย ( $\eta_{diff}$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการ [4], [6], [11], [15]

$$\eta_r = \eta_{sed} + \eta_{hit} + \eta_{diff} = \frac{\Delta\rho g D_E^2}{18\mu v_0} + \frac{3}{2} \left(\frac{D_E}{D_p}\right)^2 + 0.9 \left(\frac{KT}{\mu D_E D_p v_0}\right)^2 \quad (6)$$

โดยค่า  $\eta_r$  ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำกับน้ำมัน ( $\Delta\rho$ ) ความเร็วการไหล ( $v_0$ ) ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์ ( $D_E$ ) ขนาดตัวกลาง ( $D_p$ ) อุณหภูมิสัมบูรณ์ ( $T$ ) และค่าคงที่ของโบลซ์แมน (Boltzmann's constant,  $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ kg.m}^2/\text{K.s}^2$ ) [4] สำหรับในงานวิจัยนี้ พบว่า  $\eta_r$  มีค่าประมาณร้อยละ 0.86 ดังนั้น เมื่อทราบค่า  $D_p$  และ  $\eta_r$  ที่สอดคล้องกับ

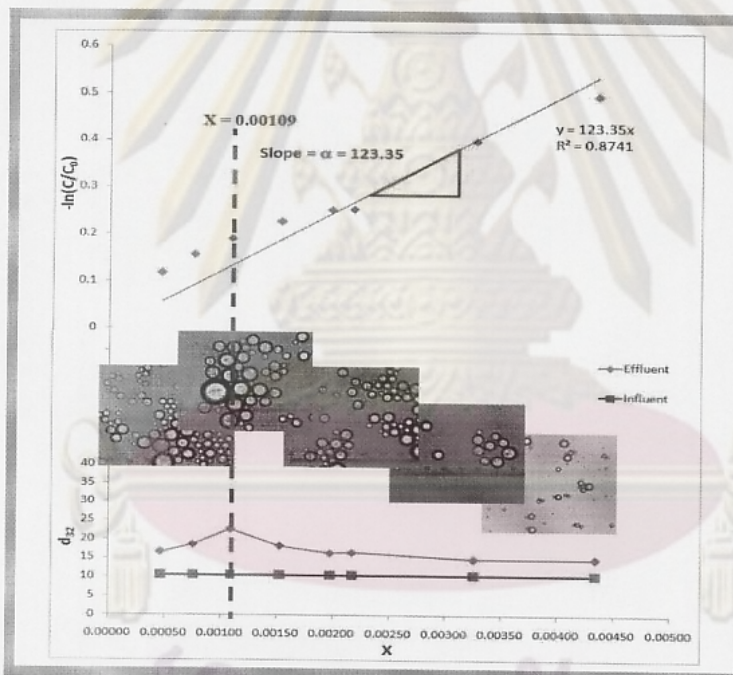
### ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejeh.2009.1.3.63

สภาพการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ต่างๆ จึงสามารถคำนวณค่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการประสิทธิภาพการกรองต่อไป

#### IV. การประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) กับโคเอเลสเซอร์

เมื่อนำผลการทดลองของค่าประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ ( $-\ln C/C_0$ ) กับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) สร้างความสัมพันธ์กัน พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงตามสมการประสิทธิภาพการกรอง ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยมีความคลาดเคลื่อนหรือค่า  $R^2 = 0.8741$  ซึ่งน่าจะเกิดจากกลไกของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ในขั้นตอนที่อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่บนชั้นตัวกลางและหลุดออกจากชั้นตัวกลางเมื่อมีขนาดใหญ่อื่น (Salting out stage) [4], [11], [15] ทำให้ไม่มีการติดสะสมอยู่บนชั้นตัวกลางเหมือนกับกลไกการกรองตามปกติ โดยอนุภาคน้ำมันที่ผ่านกระบวนการโคเอเลสเซนซ์มีขนาดระหว่าง 14.8 - 22.6 ไมครอนและมีขนาดใหญ่ขึ้นจากอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าโคเอเลสเซอร์ คือ 10.5 ไมครอน ซึ่งจะทำความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมันมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกในถังตกตะกอนสูงขึ้น [4], [6], [11], [15]



รูปที่ 5 สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) กับประสิทธิภาพ และขนาดอนุภาคน้ำมันที่ออกจากโคเอเลสเซอร์ (ภาพถ่าย)

นอกจากนี้จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่ามากขึ้น จะทำให้อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นโดยเกิดจากกลไกการกรองของชั้นตัวกลางเป็นหลัก ซึ่งเห็นได้จากจำนวนอนุภาคน้ำมันที่หายไป แต่ขนาดอนุภาคน้ำมันที่เกิดจากการรวมตัวกันจากกลไกโคเอเลสเซนซ์นั้น พบว่าจะมีขนาดเล็กลง ในทางกลับกัน เมื่อกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) มีค่าลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพของกลไกการกรองแปรผกผันกับประสิทธิภาพของกลไกโคเอเลสเซนซ์ ในกรณีนี้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจึงมีค่าน้อยลง

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejrh.2009.1.3.63

และอนุภาคน้ำมันที่เกิดจากการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ( $d_{32} = 22.6$  ไมครอน) ซึ่งจากกลไกทั้งสองที่เกิดขึ้นในโคเอเลสเซอร์นั้น เราต้องการให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจากกลไกโคเอเลสเซนซ์มากกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีที่สูงจากกลไกการกรองของอุปกรณ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันในถังตกตะกอนต่อไป โดยจากงานวิจัยนี้พบว่า ค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่เหมาะสมมีค่า 0.00109 เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ผ่านโคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากที่สุด นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพในการจับยึด ( $\alpha$ ) ของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางเส้นใยสเตนเลส ซึ่งได้มาจากการคำนวณค่าความชัน (Slope) จากสมการเส้นตรงข้างต้น (รูปที่ 3) มีค่าเท่ากับ 123.35 ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของโคเอเลสเซอร์ รวมถึงการเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมันร่วมกับค่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) จากสมการประสิทธิภาพการกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แต่เนื่องจากค่าประสิทธิภาพในการจับยึด ( $\alpha$ ) ที่ได้จากสมการเส้นตรงข้างต้น ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ( $R^2 = 0.8741$ ) ในอนาคต ควรมีการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองเพื่อศึกษาผลกระทบการทำงานและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียบนเบื่อน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่สภาพการทำงานต่างๆเพิ่มเติม เช่น การศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลหรือขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลาง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงนี้ หรือทำการศึกษาค่าเพิ่มประสิทธิภาพการจับยึด ( $\alpha$ ) ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวตัวกลาง รวมไปถึงการทดลองกับน้ำเสียจริง เป็นต้น

### V. สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียบนเบื่อน้ำมันเครื่องด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ชนิดเส้นใย พบว่าเส้นใยสเตนเลสมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลาง เนื่องจากมีลักษณะเส้นใยขนาดเล็กและมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ที่ส่งผลทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกมาจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของโคเอเลสเซอร์สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่ามากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของโคเอเลสเซอร์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพการกรอง โดยจากกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์นั้น ต้องการทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกจากโคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าต้องการประสิทธิภาพในการกรองของชั้นตัวกลาง จึงจะสามารถแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียได้เร็วกว่าการปล่อยให้ลอยด้วยแรงโน้มถ่วงในถังตกตะกอน นอกจากนี้ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ( $X = \frac{3}{2} \eta_T (1 - \epsilon) \frac{H}{D_{32}}$ ) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์เป็นเส้นตรงตามสมการประสิทธิภาพการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณทำนายประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสเตนเลสเป็นตัวกลางได้ โดยมีค่าประสิทธิภาพในการจับยึด ( $\alpha$ ) ของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางเส้นใยสเตนเลสและค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้เท่ากับ 123.35 และ 0.00109 ตามลำดับ

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.63

## บรรณานุกรม

- [1] ชุติกร ชุติพันธ์, "การจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสียโดยอินดิโกแคโรทีน," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2547.
- [2] มั่นสิน ตันจุลเวศม์, *วิศวกรรมสารประกอบ*, เล่มที่ 1, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [3] มั่นสิน ตันจุลเวศม์, *เทคนิคอินดิโกแคโรทีนเสถียรสารประกอบ*, เล่มที่ 1, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [4] สุรพล สายพานิช, Y. Aurelle, and H. Roques, "เทคนิคการแยกอิมัลชันด้วยวิธีโคเอเลสเซนซ์," *วิศวกรรมสาร*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 1, หน้า 76-85, 2526.
- [5] American Public Health Association, American Water Work Association and Water Environment Federation, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. Washington, D.C: American Public Health Association, 1998.
- [6] Y. Aurelle, *Treatment of Oil-Containing Wastewater*, Department of Sanitary Engineering Chulalongkorn University, Bangkok, 1985.
- [7] J. Li and Y. Gu, "Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds," *Separation and Purification Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 1-13, 2005.
- [8] J. R. Madia, S. M. Fruh, C. A. Miller, and A. Beerbower, "Granular packed bed coalescer: influence of packing wettability on coalescence," *Environmental Science & Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 1044-1046, 1976.
- [9] L. W. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 6th ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- [10] B. Meyssami and A. B. Kasaeian, "Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation," *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 3, pp. 303-307, 2005.
- [11] S. Rachu, "Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation," Ph.D. dissertation, INSA, Toulouse, 2005.
- [12] F. Rebelein and E. Blass, "Separation of micro-dispersions in fibre-beds," *Filtration & Separation*, vol. 27, no. 5, pp. 360-363, 1990.
- [13] R. M. S. Sokolovic, T. J. Vucic, and S. M. Sokolovic, "Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion," *Separation and Purification Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 79-84, 2007.
- [14] M. Tir and N. Moulai-Mostefa, "Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, no. 1, pp. 107-115, 2008.
- [15] B. Wanichkul, "Etude des potentialites de nouveaux procedes de traitement d'emulsions hydrocarbure-eau: ultrafiltration, distillation et couplage coalesceur-hydrocyclone." Ph.D. dissertation, INSA, Toulouse, 2000.
- [16] H. Wadell, "Volume, shape and roundness of quartz particles," *Journal of Geology*, vol. 43, no. 3, pp. 250-280, 1935.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒิวัด หล่อตระกุล เกิดเมื่อวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย