

การศึกษากระบวนการโคเอเลสเซนซ์สำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องโดยเส้นใยสแตนเลส

วุฒิวัต หล่อตระกูล, ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ
พิสุทธิ เพียรมนกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail: yoi_@hotmail.com, patiparn.p@eng.chula.ac.th

and pisut.p@chula.ac.th*, pisut114@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเส้นใยสแตนเลสมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์เพื่อแยกน้ำมันเครื่องปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย โดยทำการวิเคราะห์หาน้ำมันในน้ำเสียด้วยค่าซีไอดีและขนาดของอนุภาคน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์ 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

โคเอเลสเซอร์, เส้นใยสแตนเลส, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบซอเทอร์, สมการประสิทธิภาพการกรอง

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

Wootiwat Lortragool, Patiparn Punyapalakul 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 μm to the range of 14.8 – 22.6 μm . 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 (α). The obtained values of X and α were 0.00109 and 123.35, in this study.

KEYWORDS

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

I. บทนำ

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

กระบวนการโคเอเลสเซนซ์เป็นกระบวนการทางกายภาพ ที่ใช้แยกอนุภาคอิมัลชันต่างๆ เช่น อนุภาคน้ำมันในน้ำ ด้วยการไหลผ่านชั้นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งอนุภาคน้ำมันจะเกิดการชนและเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกลาง เมื่ออนุภาคน้ำมันอื่นไหลตามมาเกิดการชนและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่ก่อน จะทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นจนหลุดออกจากชั้นตัวกลาง และสามารถแยกออกจากน้ำได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้แยกด้วยแรงโน้มถ่วงในถังตกตะกอน (ตามกฎหมายของสโตกส์) [4], [6], [11], [15] ทั้งนี้กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกของการกรอง เนื่องจากการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยพื้นผิวของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์เป็นลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ ซึ่งตัวกลางควรมีพื้นผิวที่ขบอนุภาคอิมัลชันหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic media) [8], [11], [15]

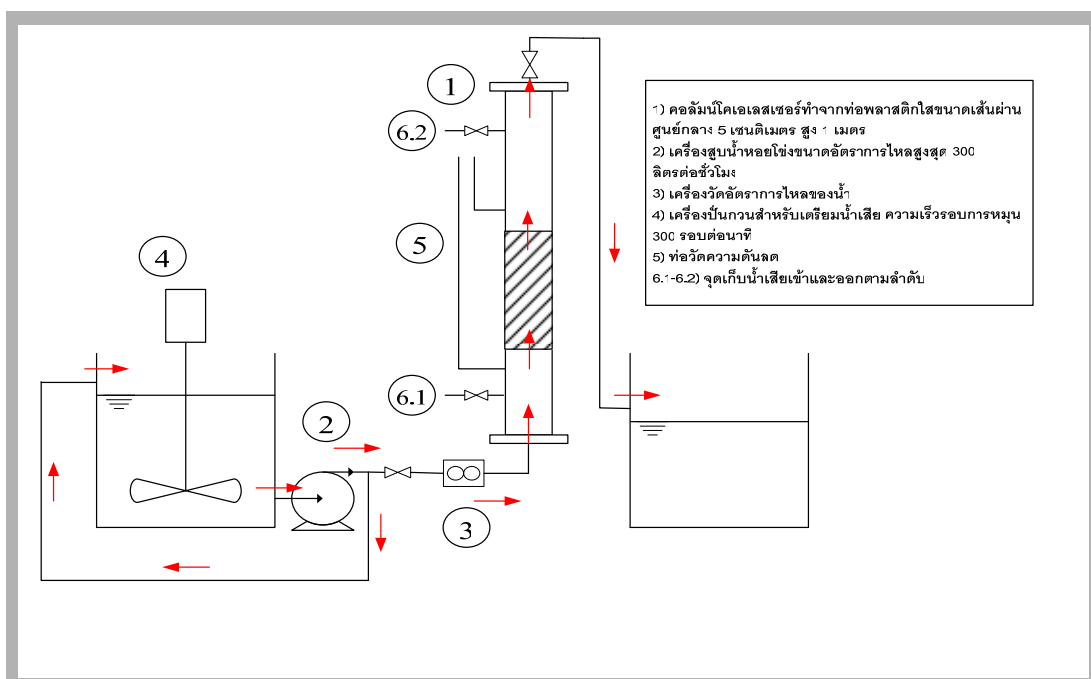
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษานำเส้นใยสแตนเลสซึ่งหาได้ง่าย มาใช้เป็นตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ โดยศึกษาผลของความสูงและความพรุนของชั้นตัวกลางต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ และประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง ในการนำเสนอกลุ่มตัวแปรไว้หน่วยสำหรับการควบคุมระบบและโมเดลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์

II. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1

แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง โดยถูกสรุปแสดงทิศทางการไหลของน้ำเสีย



2.1 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยพอลิเอสเตอร์สำหรับงานขัดล้าง ทรายฟลูอิโดส ของบริษัทยูนิเวลล์ (เอเชีย) จำกัด

2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมจากน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน พีทีที วี-120 ชนิดเกรดดีเซล SAE 40 ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ผสมกับน้ำประปาให้มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาปั่นจนผสมด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที [1] และเวียนน้ำเสียในถังด้วยเครื่องสูบน้ำหอยโข่ง โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้ มีลักษณะเป็นอิมัลชันของอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กและมีซีไอดีน้ำเข้าประมาณ 460 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

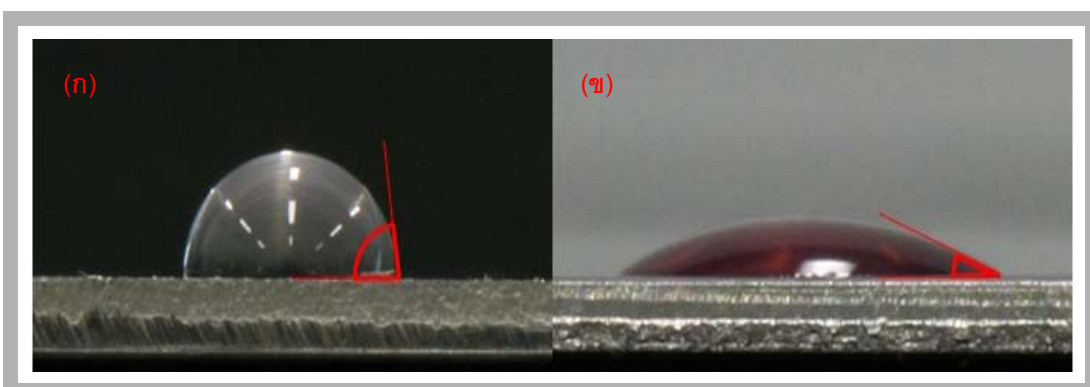
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรความสูงและความพรุนของชั้นตัวกลางต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ โดยใช้ค่าร้อยละการกำจัดซีไอดีและขนาดน้ำมันที่เปลี่ยนไปเป็นดัชนีชี้วัด ซึ่งทำการวิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าซีไอดี [10], [14] ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด [5] และคำนวณร้อยละการกำจัดซีไอดีของอุปกรณ์
2. ขนาดอนุภาคน้ำมัน ทำการวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์ [11] ถ่ายภาพและวัดขนาดด้วยคอมพิวเตอร์ และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชอเทอร์ (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

หยดของเหลวปริมาตร

5 ไมโครลิตร บน

พื้นผิวสแตนเลส 304

(ก) หยดน้ำ

(ข) หยदन้ำมัน

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

สามารถคำนวณค่าดัชนีของความกลม (Sphericity, Ψ) 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_{Sphere} คือ พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับเส้นใยที่กำหนด

A_{Particle} , V_{Particle} คือ พื้นที่ผิวและปริมาตรของเส้นใยที่กำหนด

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

3.2 ผลกระทบของความสูงและความพรุนของตัวกลางต่อกระบวนการโคเอเลสเซนซ์

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

รูปที่ 3

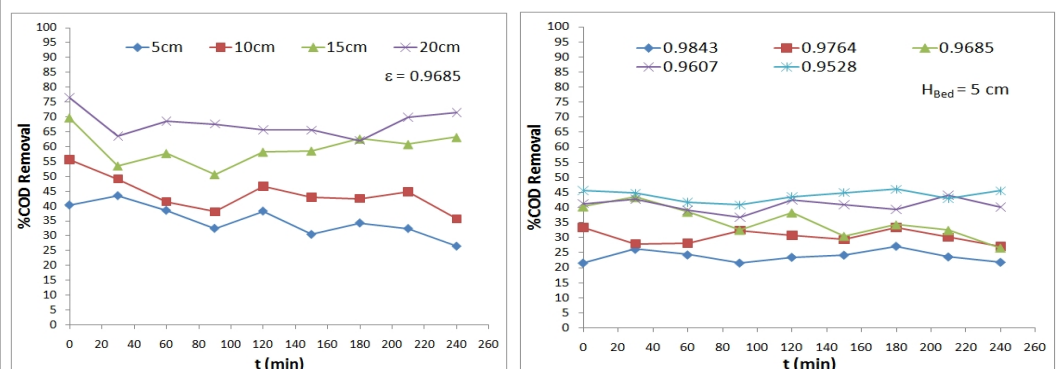
ผลกระทบของ (ก)

ความสูง และ (ข)

ความพรุนของตัวกลาง

ต่อประสิทธิภาพของโค

เอเลสเซอร์



นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์การทำงานของโคเอเลสเซอร์ (รูปที่ 3) จะเห็นได้ว่าตลอดช่วงเวลาของการเดินระบบจะมีน้ำมันบางส่วนที่หายไป ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกของกระบวนการโคเอเลสเซนซ์ภายในโคเอเลสเซอร์ ซึ่งส่งผลให้น้ำมันบางส่วนติดค้างอยู่บนชั้นตัวกลาง โดยอนุภาคน้ำมันที่ถูกกรองเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ก็จะถูกดูดออกจากชั้นตัวกลาง จึงทำให้เกิดการกรองและหลุดออกจากชั้นตัวกลางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นหยดน้ำมันขนาดใหญ่เหล่านี้ที่แยกตัวออกจากน้ำเสีย ทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีกับน้ำที่ออกจากระบบได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีปริมาณซีไอดีที่หายไป และมีแนวโน้มเกิดขึ้นค่อนข้างคงที่ (จากผลประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) หรืออาจกล่าวได้ว่าทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในชั้นตัวกลางโคเอเลสเซอร์ ซึ่งจัดเป็นข้อดีประการสำคัญของการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์นี้ได้ในระยะเวลานาน โดยไม่ต้องมีการบำรุงรักษาบ่อยๆ [4]

3.3 สมการประสิทธิภาพการกรองและการหาค่าตัวแปรต่างๆในสมการ

เนื่องจากกลไกการทำงานของโคเอเลสเซอร์มีการติดของอนุภาคน้ำมันบนชั้นตัวกลางเช่นเดียวกับกลไกการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการประสิทธิภาพการกรองมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ [6] ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่ C, C_0 คือ ค่าซีไอดีของน้ำที่ออก, ที่เข้าสู่โคเอเลสเซอร์

ตามลำดับ

α คือ ประสิทธิภาพในการจับยึดของอนุภาคกับตัวกลาง

η_T คือ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด

ε คือ ความพรุนของชั้นตัวกลาง

H_{Bed} คือ ความสูงชั้นตัวกลาง

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง

จากการวิเคราะห์สมการประสิทธิภาพการกรองข้างต้นแล้ว จะพบว่าตัวแปร $\eta_T\varepsilon H_{\text{Bed}}$ และ D_p เมื่อคำนวณตามสมการแล้ว จะมีลักษณะเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ซึ่งกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$X = \frac{3}{2}\eta_T(1-\varepsilon)\frac{H_{\text{Bed}}}{D_p} \quad (4)$$

อย่างไรก็ตาม สมการประสิทธิภาพการกรองนี้เป็นสมการประสิทธิภาพของตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม [4], [6] ดังนั้นการนำสมการนี้มาคำนวณประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้ตัวกลางชนิดเส้นใย จะต้องทำการคำนวณค่าตัวแปรในสมการบางตัวให้อยู่ในรูปที่เทียบเท่ากับของทรงกลม จึงจะสามารถนำมาคำนวณในสมการประสิทธิภาพการกรองได้

3.3.1 การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางเส้นใยสแตนเลส

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

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

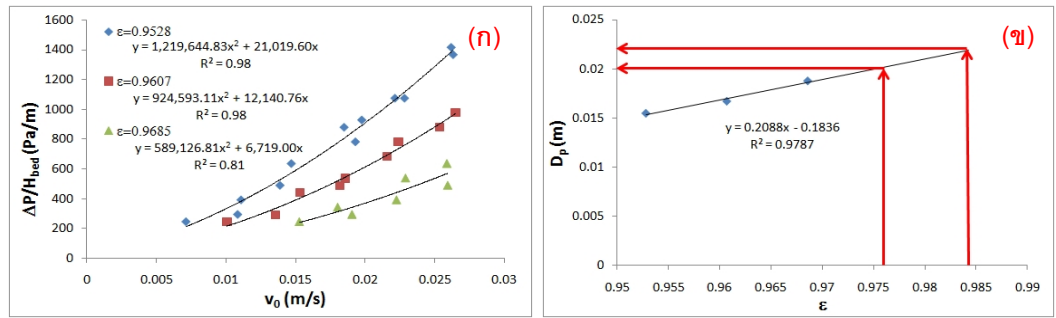
โดยที่ ΔP คือ ความดันลดที่เกิดขึ้นจากชั้นตัวกลาง

V_0 คือ ความเร็วการไหลของน้ำ

μ คือ ความหนืดของน้ำ
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

รูปที่ 4

ก) การหาค่า D_p ด้วยสมการของเออร์กัน และ ข) การประมาณค่าของ D_p จากความพรุน



ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองเพื่อหาค่า D_p เสมือนรูปทรงกลมของเส้นใยสแตนเลส โดยปล่อยน้ำไหลผ่านชั้นตัวกลางเส้นใยความพรุนต่างๆกัน ที่อัตราการไหลระหว่าง 40 - 140 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อวัดค่าความดันตก (ΔP) ที่เกิดขึ้น และนำค่าดังกล่าวไปหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกต่อความสูงชั้นตัวกลางและความเร็วการไหล ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) เมื่อเทียบค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองกับสมการของเออร์กัน ก็จะสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในรูปของทรงกลม (D_p) ที่ความพรุนของชั้นตัวกลางต่างๆได้ ดังรูปที่ 4 (ข) ซึ่งค่า D_p จะแปรผันตามกันกับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง [9] โดยค่า D_p ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในรูปของทรงกลมที่ความพรุนต่างๆ

ϵ	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 (η_T)

ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายรวมทั้งหมด (η_T) ซึ่งประกอบด้วยประสิทธิภาพในการตกตะกอน (η_{Sed}) ประสิทธิภาพในการปะทะโดยตรง (η_{Int}) และประสิทธิภาพในการส่งถ่ายด้วยการแพร่กระจาย (η_{Diff}) สามารถคำนวณได้ดังสมการ [4], [6], [11], [15]

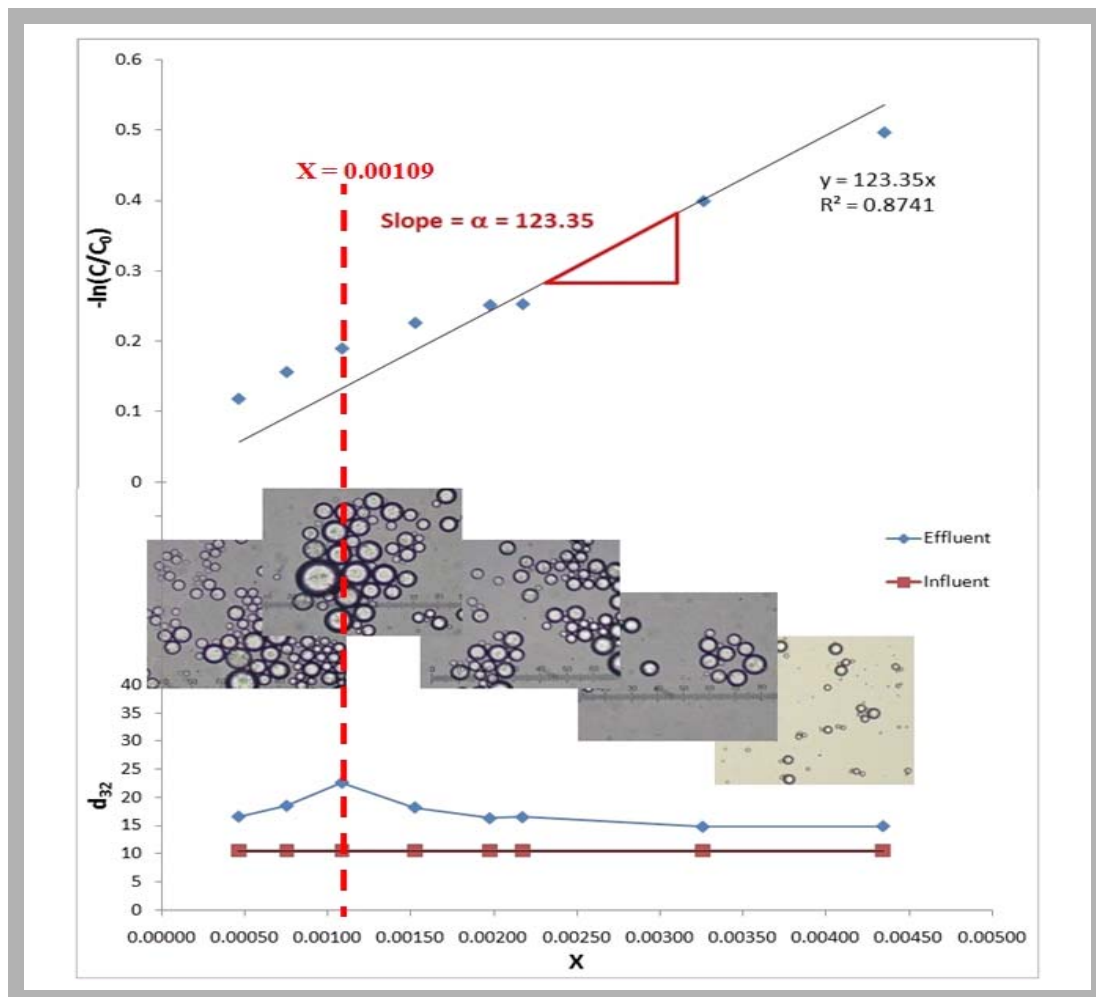
$$\eta_T = \eta_{Sed} + \eta_{Int} + \eta_{Diff} = \frac{\Delta \rho g D_E^2}{18 \mu V_0} + \frac{3}{2} \left(\frac{D_E}{D_p} \right)^2 + 0.9 \left(\frac{KT}{\mu D_E D_p V_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

โดยค่า η_T 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 η_T มีค่าประมาณร้อยละ 0.86 ดังนั้น เมื่อทราบค่า D_p และ η_T ที่สอดคล้องกับ

สภาพการทำงานของอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ต่างๆ จึงสามารถคำนวณค่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการประสิทธิภาพการกรองต่อไป

IV. การประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองและกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) กับโคเอเลสเซอร์

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

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

แต่เนื่องจากค่าประสิทธิภาพในการจับยึด (α) ที่ได้จากสมการเส้นตรงข้างต้น ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ($R^2 = 0.8741$) ในอนาคต ควรมีการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรองเพื่อศึกษากลไกการทำงานและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ที่สภาพการทำงานต่างๆเพิ่มเติม เช่น การศึกษาผลกระทบของความเร็วการไหลหรือขนาดของเส้นใยที่ใช้เป็นตัวกลาง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงนี้ หรือทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพการจับยึด (α) ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวตัวกลาง รวมไปถึงการทดลองกับน้ำเสียจริง เป็นต้น

V. สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องด้วยอุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ชนิดเส้นใย พบว่าเส้นใยสเตนเลสมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลาง เนื่องจากมีลักษณะเส้นใยขนาดเล็กและมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของตัวกลางในโคเอเลสเซอร์ที่ส่งผลทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกมา มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของโคเอเลสเซอร์สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อความพรุนของชั้นตัวกลางมีค่ามากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของโคเอเลสเซอร์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมการประสิทธิภาพการกรอง โดยจากกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคเอเลสเซนซ์นั้น ต้องการทำให้ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่ออกจากโคเอเลสเซอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าต้องการประสิทธิภาพในการกรองของชั้นตัวกลาง จึงจะสามารถแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสียได้เร็วกว่าการปล่อยให้ลอยด้วยแรงโน้มถ่วงในถังตกตะกอน นอกจากนี้ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วย ($X = \frac{3}{2} \eta_T (1 - \varepsilon) \frac{H}{d_p}$) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์เป็นเส้นตรงตามสมการประสิทธิภาพการกรอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณทำนายประสิทธิภาพของโคเอเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยสเตนเลสเป็นตัวกลางได้ โดยมีค่าประสิทธิภาพในการจับยึด (α) ของอนุภาคน้ำมันกับตัวกลางเส้นใยสเตนเลสและค่าของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (X) ที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้เท่ากับ 123.35 และ 0.00109 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

บรรณานุกรม

- [1] ชูสิทธิ์ ชูกลิ่น, "การจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสียโดยอินดิเวอร์แอร์โฟลเทชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2547.
- [2] มั่นสิน ตันจุลเวศม์, *วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1*, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [3] มั่นสิน ตันจุลเวศม์, *เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. 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. Vulic, 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 potentialities 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.