

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วย อากาศละลาย

พชร โพธิ์ทอง^{1,a}, ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา^{2,b}, ชัยพร ภูประเสริฐ^{1,c}
และ พิสุทธิ เพียรมนกุล^{1,d,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

²ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail: konganiversarypt@hotmail.com^a, nattawin_ch@hotmail.com^b, thingtingtam@yahoo.com^c,
and pisut.p@chula.ac.th^{d,*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) แบบทีละเท (Batch) ในคอลัมน์ทดสอบการลอยตัว (Flotation column) โดยศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความดันอากาศ อัตราการไหลของอากาศ ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของน้ำมันตัด ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม รวมถึงวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (a) และค่าความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว (G) จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันตัดและอัตราการไหลของอากาศ (Q_G) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม ($\%Eff > 95$) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลต่อการเพิ่มอัตราเร็วในการบำบัด นอกจากนี้ พบว่าค่าสัดส่วน a/G มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ อัตราเร็วการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัด และยังสามารถบอกแนวโน้มหรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละระบบได้ โดยเกณฑ์การออกแบบและเดินระบบที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้คือ เดินระบบที่ความดัน 4 atm (ความดันเกจ) อัตราการไหลของอากาศที่สัมพันธ์กับค่าสัดส่วน a/G ประมาณ 500 วินาทีต่อเมตร และควรออกแบบพื้นที่ถังทำให้ลอยตัว (Flotation tank) ด้วยอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่ต่ำกว่า 18 เมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตาม เพื่อพิสูจน์แนวคิดและเกณฑ์การออกแบบข้างต้น ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) และในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

คำสืบค้น

การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย, น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด, พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ, ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของเฟสของเหลว

Treatment of Cutting Oily Wastewater by Dissolved Air Flotation (DAF) process

Potchara Pothong^{1,a}, Nattawin Chawaloeshonsiya^{2,b},
Chaiyaporn Puprasert^{1,c}, and Pisut Painmanakul^{1,d,*}

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

²Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management
(EHWM), Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: konganiversarypt@hotmail.com^a, nattawin_ch@hotmail.com^b,
thingtingtam@yahoo.com^c, and pisut.p@chula.ac.th^{d,*}

ABSTRACT

The objective of this work was to study the treatment of cutting oily-wastewater by Dissolved Air Flotation (DAF) process with batch system. The effect of pressure level, air flow rate, detention time, and concentration of cutting oil in wastewater was investigated in a flotation column. In this study, the treatment efficiencies, bubble hydrodynamic parameters, bubble interfacial area (a), and velocity gradient of liquid phase (G), were analyzed in order to provide a better understanding on DAF separation mechanism. The results showed that treatment efficiencies (%Eff > 95%) were not influenced by varying cutting oil concentration and air flow rate. It was noted that the increase of air flow rate can enhance the treatment rate. In addition, it was found that the a/G ratio related with the overall treatment efficiencies, and could be applied for selecting the optimal operating conditions for the DAF process. From this work, the operating conditions of 4 atm pressure level (gauge pressure) and air flow rate related to the a/G ratio of 500 s/m were recommended. Moreover, the flotation tank with overflow rate (OFR) lower than 18 m/s was suggested as the design criteria. In the future, the further study should be conducted, for example, DAF operation on continuous and/or large scale process in order to prove the aforementioned design concept and criterion.

KEYWORDS

Dissolved air flotation, cutting oily wastewater, bubble interfacial area, velocity gradient of liquid phase.

1. บทนำ

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเป็นมลพิษทางน้ำที่มักจะพบการปนเปื้อนอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยเฉพาะน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oily-wastewater) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมการตัดกลึงโลหะ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะพบการปนเปื้อนอยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว (ความเข้มข้นประมาณ 1%) [1] ทำให้อนุภาคน้ำมันมีความคงตัวสูง และมีขนาดเล็ก (มีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์) จึงสามารถแขวนลอยอยู่ในแหล่งน้ำได้เป็นเวลานานและทำการบำบัดด้วยวิธีแรงโน้มถ่วง (Decantation process) ได้ยาก [2] ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นและพัฒนากระบวนการในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากเฟสน้ำหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า กระบวนการกรอง กระบวนการเมมเบรน กระบวนการทำให้ลอยตัว เป็นต้น [3]

กระบวนการทำให้ลอยตัว (Flotation process) จัดเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งอาศัยหลักการในการเพิ่มผลต่างความหนาแน่นระหว่างเฟส ($\Delta\rho$) เพื่อเพิ่มความเร็วสุดท้าย (Terminal settling velocity) ในการลอยตัว โดยประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law) โดยทั่วไป กระบวนการทำให้ลอยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทำให้ลอยตัวด้วยการเป่าฟองอากาศ (Induced Air Flotation, IAF) และการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF) ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างสองกระบวนการนี้คือ ฟองอากาศในกระบวนการ IAF มาจากการอุปกรณ์สร้างฟองอากาศ (Gas diffuser) มีขนาดประมาณ 700 ถึง 1500 ไมครอน ในขณะที่ ฟองอากาศจากกระบวนการ DAF เกิดขึ้นจากการอัดอากาศให้ละลายในน้ำที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศแล้วปล่อยเฟสน้ำดังกล่าวออกมาที่ความดันปกติ ฟองอากาศที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่า คือประมาณ 30 ถึง 100 ไมครอน [4] ซึ่งในทางทฤษฎีประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการสัมผัส (Collision efficiency, η_c) และการเกาะติด (Attachment efficiency, α) ระหว่างน้ำมันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยในน้ำ และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ [5] ดังนั้น ขนาดของฟองอากาศที่แตกต่างกันของทั้งสองระบบจึงมีผลต่อกลไกการทำงานและประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตาม จากกลไกการสร้างฟองอากาศที่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบที่ค่อนข้างสูง และข้อจำกัดในด้านแรงลอยตัวของฟองอากาศขนาดเล็กสำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดและน้ำหนักที่ค่อนข้างสูงออกจากเฟสน้ำเสียของกระบวนการ DAF นั้น [5] ทำให้มีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเดินระบบโดยรวม รวมถึงแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสภาวะการทำงานจริง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] ซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ IAF และกระบวนการ IAF ร่วมกับการเติมสารเคมี (Modified Induced Air Flotation, MIAF) พบว่าตัวแปรสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, a) และความสามารถในการกวนผสม (Velocity gradient, G) หรือสัดส่วน a/G นั้น สามารถบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันได้

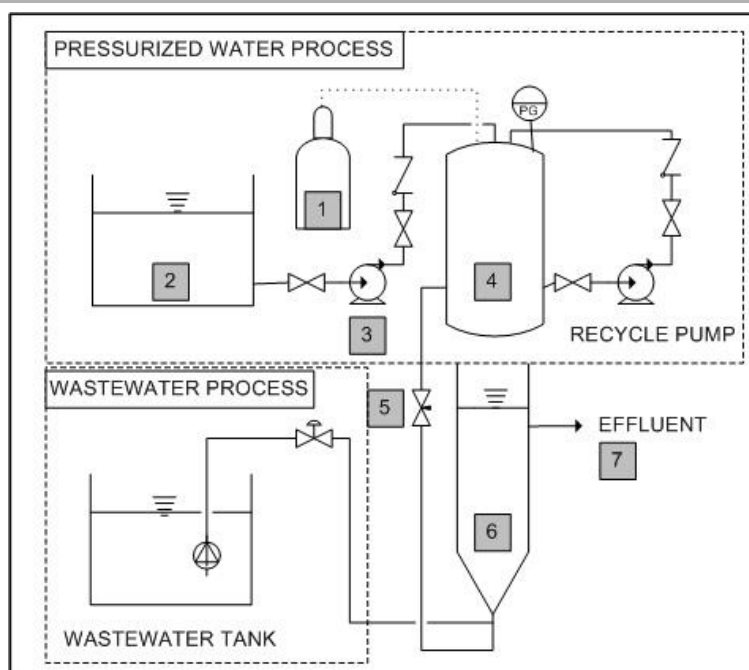
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบต่างๆ เช่น ความดัน อัตราการไหลของอากาศ ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำ เป็นต้น รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน a/G ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม เพื่อพัฒนาเป็นหนึ่งในแนวทางการออกแบบระบบ ประมาณค่าประสิทธิภาพการบำบัด และเลือกสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดหรือในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

II. อุปกรณ์และวิธีการ

รูปที่ 1 แสดงรูปแบบการติดตั้งชุดทดสอบกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) ซึ่งประกอบด้วย 1) ถังอากาศ (Air zero tank) 2) ถังบรรจุน้ำ 3) ปัมป์สูบน้ำ 4) ถังอัดความดัน (Pressure vessel) 5) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของเฟสน้ำ (Diaphragm valve) 6) คอลัมน์ทดสอบการลอยตัว (Flotation column) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรและสูง 2 เมตร และ 7) จุดเก็บน้ำตัวอย่าง (Sampling point)

รูปที่ 1

การติดตั้งชุดทดสอบกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF)



งานวิจัยนี้ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดในเฟสน้ำที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ น้ำมันตัด BP-Castrol 3810150 ซึ่งมีความหนาแน่น (Density, ρ) เท่ากับ 895 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผสมกับน้ำประปา น้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมมีลักษณะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

สมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	ค่าพารามิเตอร์
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1
ความหนืด (Pa·s)	0.001
Zeta Potential (mV)	- 52
ความขุ่น (NTU)	1,356
ประสิทธิภาพในการทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation)	0%

สำหรับตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัด (Removal efficiency, %Eff) ที่สภาวะต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากค่าซีโอดี (COD) และความขุ่น (Turbidity) สำหรับอัตราการไหลของอากาศ (Q_o) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าสภาวะการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ ความดันของระบบ (Pressure in system) และอัตราการไหลของเฟสน้ำอัดความดัน (Pressurized water) สามารถสรุปดังสมการ 6 และ 7 ใน

ตารางที่ 2 [5] นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ตัวแปรความปั่นป่วนด้วยค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) และด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameter) อาทิ ขนาดของฟองอากาศ (D_B) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (a) เป็นต้น โดยมีแนวทางการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 2 [6]

ตัวแปร	สมการ	หมายเหตุ
1.ประสิทธิภาพการกำจัด (η)	$\eta = \frac{(COD_{in} - COD_{out})}{COD_{in}} \times 100$ $\eta = \frac{(Turbid_{in} - Turbid_{out})}{Turbid_{in}} \times 100$	G = ความปั่นป่วน (s^{-1}), V = ปริมาตรน้ำ (m^3) μ = ความหนืดจำเพาะของน้ำ ($kg/m.s$) N_B = จำนวนฟองอากาศ S_B = พื้นที่ผิวฟองอากาศทั้งหมด (m^2) Q_G = อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
2.ความปั่นป่วน (G)	$G = \sqrt{\frac{P_C}{\mu V}}$	H_L = ความสูงของน้ำในคอลัมน์ (m) V_B = ปริมาตรฟองอากาศ (m^3) A = พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (m^2) $\Delta\rho$ = ผลต่างความหนาแน่นน้ำกับอากาศ (kg/m^3)
3.พื้นที่ผิวจำเพาะ (a)	$a = N_B \times \left(\frac{S_B}{V_{Total}} \right)$ $a = \left(\frac{Q_G}{V_B} \times \frac{H_L}{U_B} \right) \left(\frac{\pi D_B^2}{4 H_L + N_B V_B} \right)$	ΔD = ระยะห่างของจุดสังเกตการณ์ (m) t = เวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ (s) x = สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (mol/mol) U_B = ความเร็วลอยตัวของอนุภาคในเฟสน้ำ (m/s)
4.ขนาดฟองอากาศ (D_B)	$D_B = \sqrt{\frac{18 \mu U_B}{\Delta \rho g}}$	P = ความดันอากาศ (atm), Y = สัดส่วนก๊าซต่อโมลอากาศ Q_L = อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ (m^3/s) C_{gas} = ความเข้มข้นอากาศ (kg/m^3)
5.ความเร็วลอยตัว (U_B)	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ: $U_B = \frac{\Delta D}{t}$	P_C = อัตราการให้พลังงาน (watts), ค่า $K = 3904$ Q_G = อัตราการไหลของอากาศ (m^3/min) h = ระดับความสูงหัวปล่อยอากาศถึงผิวน้ำ (m)
6.กฎของเฮนรี	$x = \frac{yP}{H}$	
7.อัตราการไหลอากาศ (Q_G)	$Q_G = 0.8 \times C_{gas} \times Q_L$ $Q_G = 0.8 \left(\frac{x \cdot MW_{gas} \cdot \rho_{water}}{MW_{water}} \times 100 \right) \cdot Q_L$	
8.พลังงานที่ให้กับเฟสน้ำ (P_C)	$P_C = K Q_G \ln \left(\frac{h + 10.33}{10.33} \right)$	

ตารางที่ 2

ตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์
และสมการที่ใช้คำนวณ

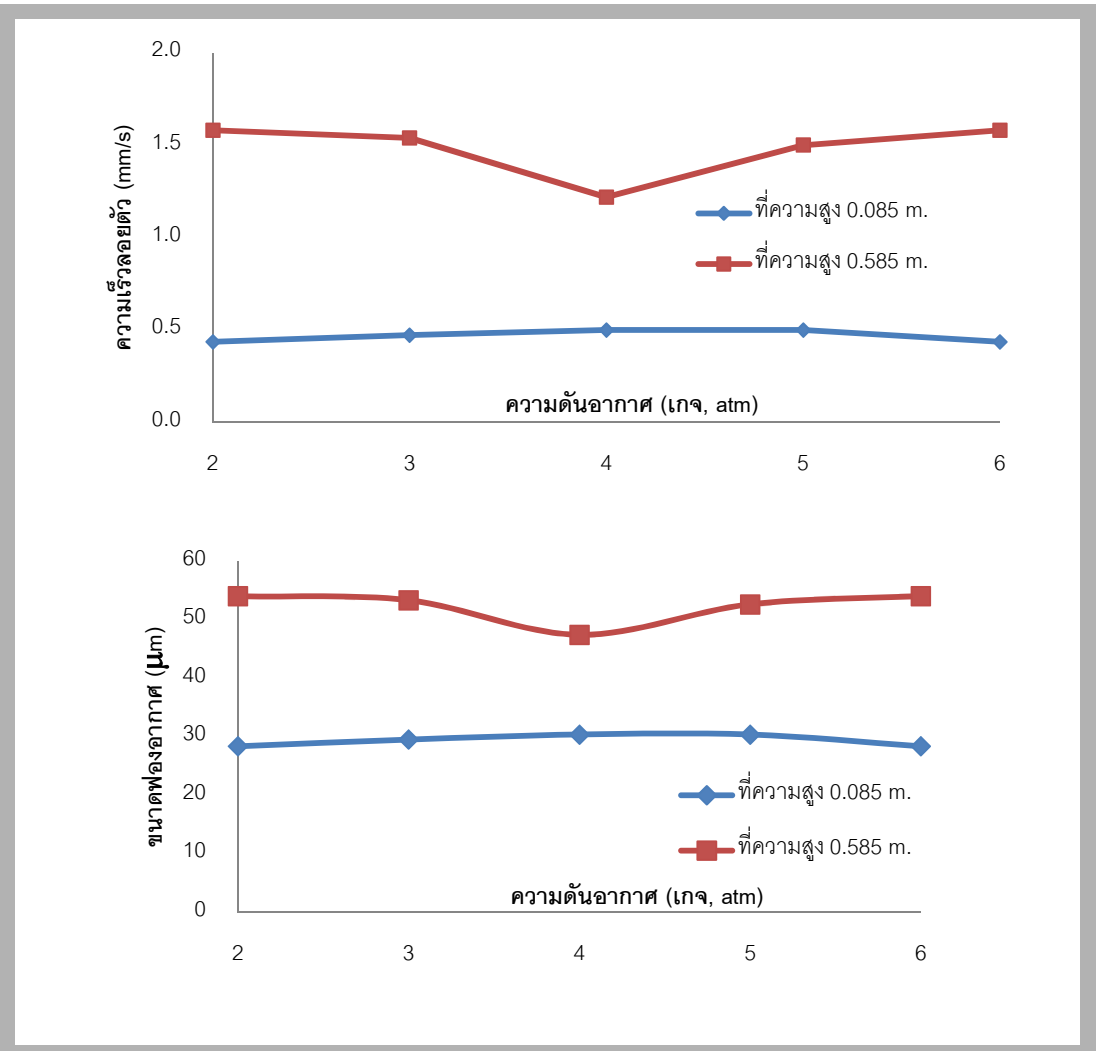
III. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศที่ได้จากชุดทดสอบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF)

รูปที่ 2 แสดงความเร็วการลอยตัว (U_B) และขนาดฟองอากาศ (D_B) ที่สภาวะความดันอากาศต่างๆ โดยทำการทดลองหาความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.085 เมตร และ 0.585 เมตร ณ ความดันอากาศต่างๆ จากนั้นนำค่าความเร็วที่ได้มาคำนวณหาขนาดฟองอากาศด้วยสมการของสโตกส์ [7] จากรูปที่ 2 เห็นได้ว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_B) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0004 ถึง 0.0016 เมตรต่อวินาที โดยฟองอากาศจะมีความเร็วลอยตัวที่ระดับความสูง 0.585 เมตร มากกว่าที่ระดับความสูง 0.085 เมตร และเมื่อทำการคำนวณหาขนาดฟองอากาศด้วยสมการของสโตกส์พบว่าขนาดฟองอากาศที่ได้มีขนาดประมาณ 30 ไมครอน และ 55 ไมครอน ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.085 เมตร และ 0.585 เมตร ตามลำดับซึ่งขนาดฟองอากาศที่คำนวณได้ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Edzwald [4] และงานวิจัยของ Rachu [5] ที่ระบุไว้ว่ากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลายจะใช้ฟองอากาศประมาณ 30 ถึง 100 ไมครอนในการสัมผัสและเกาะติดอนุภาคแขวนลอย จึงเป็นยืนยันอย่างหนึ่งว่ากระบวนการลอยตัวที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF (Dissolved Air Flotation)

รูปที่ 2

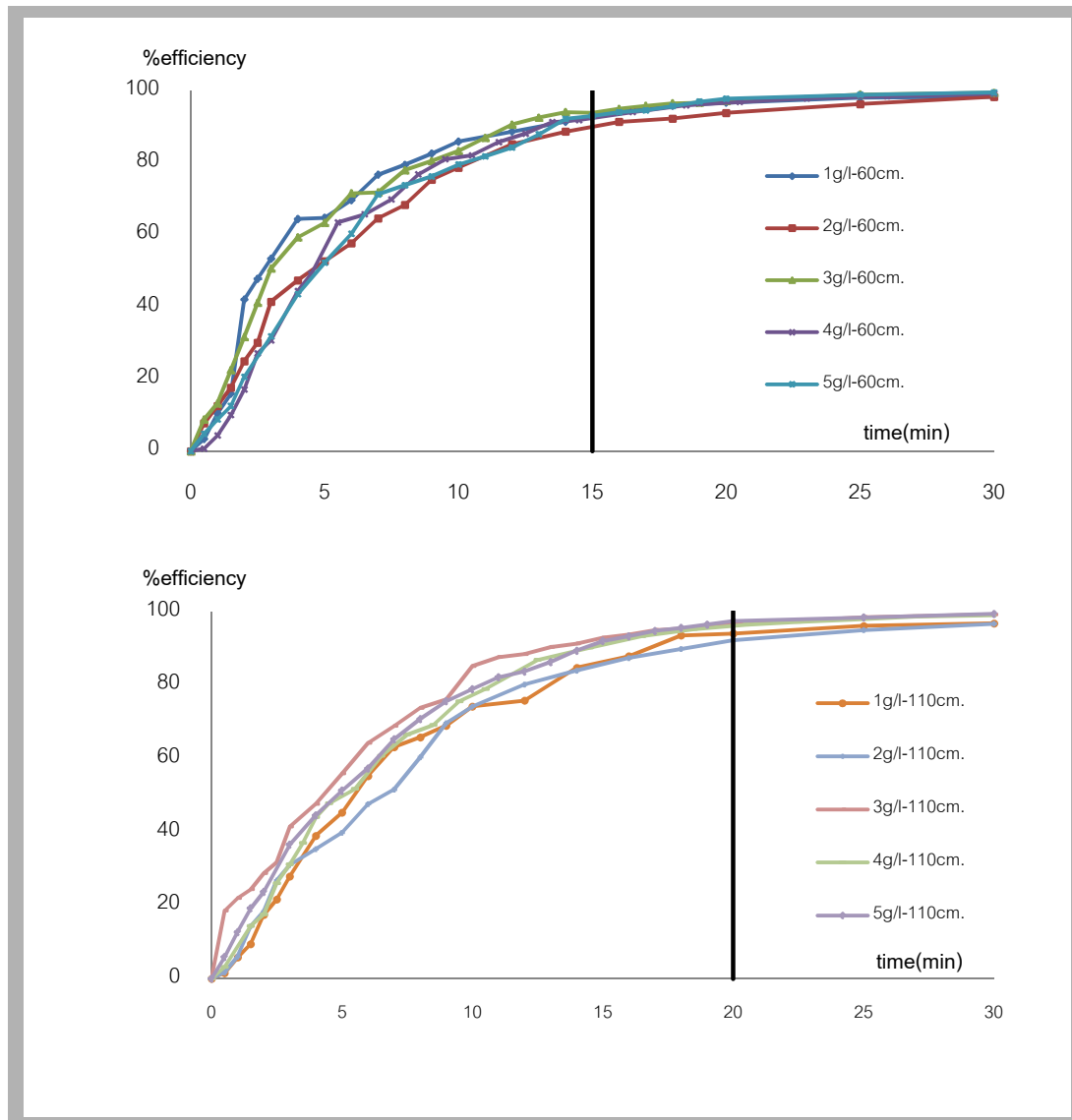
ความเร็วในการลอยตัวและ
ขนาดฟองอากาศ ที่สภาวะ
ความดันอากาศต่างๆ



นอกจากนี้พบว่าขนาดฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะทางการไหลซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์การรวมตัวกัน (Coalescence phenomena) ของฟองอากาศ และยังพบว่า ณ ระดับความสูงคอลัมน์ 0.585 เมตร ความดันอากาศ 4 atm จะมีขนาดฟองอากาศเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับความดันอากาศอื่นๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการการสัมผัสและการเกาะติด รวมไปถึงกลไกการแตกตัวของฟองอากาศ (Bubble break-up mechanism) ที่มีความสัมพันธ์กับจำนวนและขนาดของฟองอากาศที่ความดันอากาศต่างๆ [8] กล่าวคือ ขนาดและปริมาณของฟองอากาศจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานหรือความปั่นป่วนในเฟสน้ำ ทั้งนี้ เมื่อมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันของฟองอากาศและทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในทางกลับกัน ถ้ามีค่าต่ำเกินไปก็จะเป็นการลดปริมาณฟองอากาศหรือลดโอกาสการสัมผัสและเกาะติดระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวมได้ ดังนั้น จากผลการทดลองข้างต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าความดันอากาศ 4 atm (ความดันเกจ) มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย และจะถูกเลือกใช้ในการควบคุมระบบสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป อนึ่งจากงานวิจัยของ Edzwald [4] และ Rachu [5] ระบุว่าความดันอากาศที่เหมาะสมต่อกระบวนการ DAF ควรอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 atm (เกจ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองและการประยุกต์ใช้ค่าความดัน 4 atm สำหรับควบคุมระบบดังที่ได้กล่าวในข้างต้น

3.2 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นน้ำมันตัดต่อประสิทธิภาพการบำบัด

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลาในการเดินระบบที่ละเท (Batch system) ของกระบวนการ DAF ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.60 และ 1.10 เมตร (วัดจากทางเข้าด้านล่างของคอลัมน์) โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร และมีค่าความดันอากาศและอัตราการไหลอากาศคงที่คือ 4 atm และ 1.68 มล.ต่อวินาทีตามลำดับ



รูปที่ 3

ประสิทธิภาพการบำบัดที่
ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ
กัน ณ ระดับความสูง
คอลัมน์ 0.60 เมตร และ
1.10 เมตร

จากรูปที่ 3 ประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นระหว่าง 1 ถึง 5 กรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าร้อยละ 95 ณ เวลาเดินระบบ 15 และ 20 นาที ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.60 และ 1.10 เมตร ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าผลการทดลองในขั้นนี้ไม่พบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้นต่ออัตราเร็วในการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้าย โดยอาจเป็นไปได้ว่าช่วงของความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้นในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงที่แคบเกินไป เพราะในทางทฤษฎีการเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันเป็นการเพิ่มโอกาสการชนและเกาะติดระหว่างฟองอากาศและน้ำมัน [5] และเป็นการเพิ่มโอกาสการรวมตัวกันเองของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งน่าจะส่งผลต่ออัตราเร็วในการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดให้มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาในช่วงของค่าความเข้มข้นน้ำมันตัดที่กว้างกว่านี้จึงน่าจะ

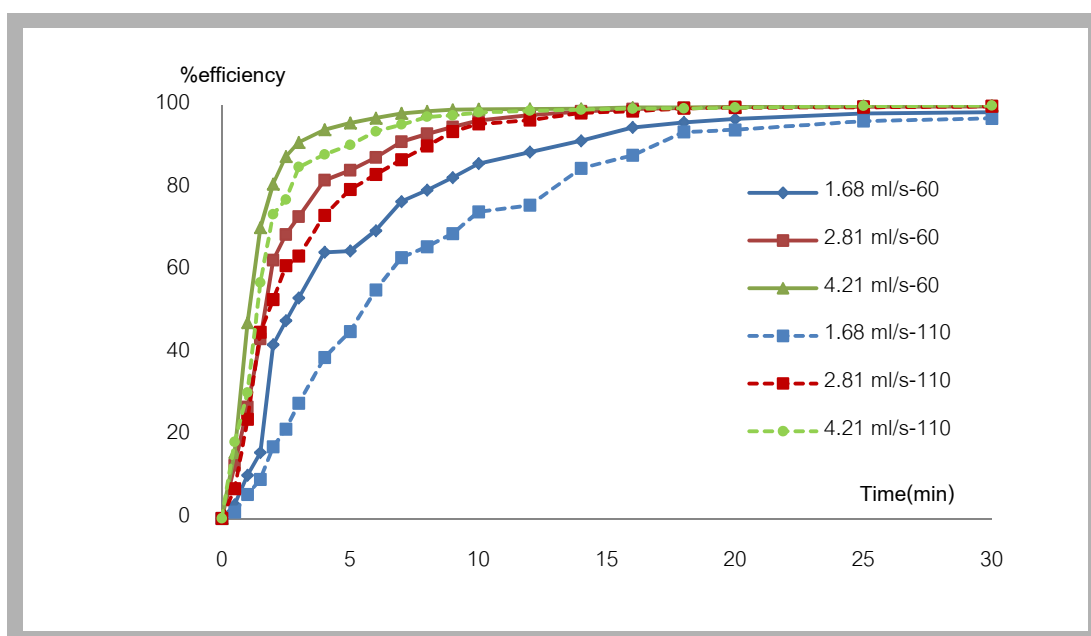
แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความเข้มข้นน้ำมันตัดเริ่มต้นที่มีต่ออัตราเร็วในการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงอัตราเร็วในการบำบัดที่แตกต่างกันจากระดับความสูงคอลัมน์ กล่าวคือ ที่ระดับ 0.60 เมตร ระบบมีอัตราเร็วในการบำบัดสูงกว่าที่ระดับ 1.10 เมตร ผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (a) (สมการคำนวณแสดงในตารางที่ 2) ที่ระดับ 0.60 เมตรมีค่ามากกว่า 1.10 เมตร โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะดังกล่าวจะมีค่าแปรผกผันกับขนาดฟองอากาศซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวกันตามระยะทางการไหล (ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.1) ดังนั้นในขั้นนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าระดับความสูงคอลัมน์มีผลต่ออัตราเร็วในการบำบัด อนึ่ง Painmanakul และคณะ [6] พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ IAF แปรผันตามพื้นที่สัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในขั้นนี้

3.3 การศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศต่อประสิทธิภาพการบำบัด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและระยะเวลาในการเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) ของกระบวนการ DAF ที่อัตราการไหลของอากาศ 1.68 2.81 และ 4.21 มล.ต่อวินาที โดยวิเคราะห์ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.60 เมตร และ 1.10 เมตร มีค่าความดันอากาศและความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำเป็น 4 atm และ 1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

รูปที่ 4

ประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหลของอากาศ (Q_G) ต่างๆ



จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวม (สุดท้าย) ของกระบวนการ DAF (%Eff > ร้อยละ 95) แต่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศ (Q_G) ผลดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็นการเพิ่มปริมาณฟองอากาศ (N_B) หรือพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศทำให้อัตราเร็วในการบำบัดมีค่าแปรผันตามอัตราการไหลของอากาศ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.60 เมตร พบว่ามีอัตราเร็วในการบำบัดสูงกว่าที่ระดับความสูงคอลัมน์ 1.10 เมตร (เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อที่ 3.2) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในขั้นนี้พบว่าความแตกต่างของอัตราเร็วในการบำบัดที่ระดับความสูงคอลัมน์ 1.10 และ 0.60 เมตร จะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ผลดังกล่าวเกิดจากรูปแบบการกระจายตัวของฟองอากาศที่แตกต่างกันตามค่า Q_G ต่างๆ

กล่าวคือ ความดันป่วนหรือค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) มีค่าแปรผันตามค่า Q_0 (สมการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2) ซึ่งความเร็วเกรเดียนท์ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ขนาดฟองอากาศมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งความสูงของคอลัมน์ ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (a) และประสิทธิภาพการบำบัด (%Eff) ที่จุดเก็บตัวอย่างทั้งสองจุดจึงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการศึกษาในขั้นนี้พบว่าอัตราเร็วและประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ DAF สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศและค่าความดันป่วนซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Painmanakul และคณะ [6] ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังกล่าวในกระบวนการ IAF (Induced Air Flotation) ในลักษณะของค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศต่อค่าความดันป่วนของกระแสของไหลหรือ a/G ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด การศึกษาในขั้นต่อไปจึงทำการศึกษาลักษณะของค่าสัดส่วน a/G ที่มีต่อกระบวนการ DAF

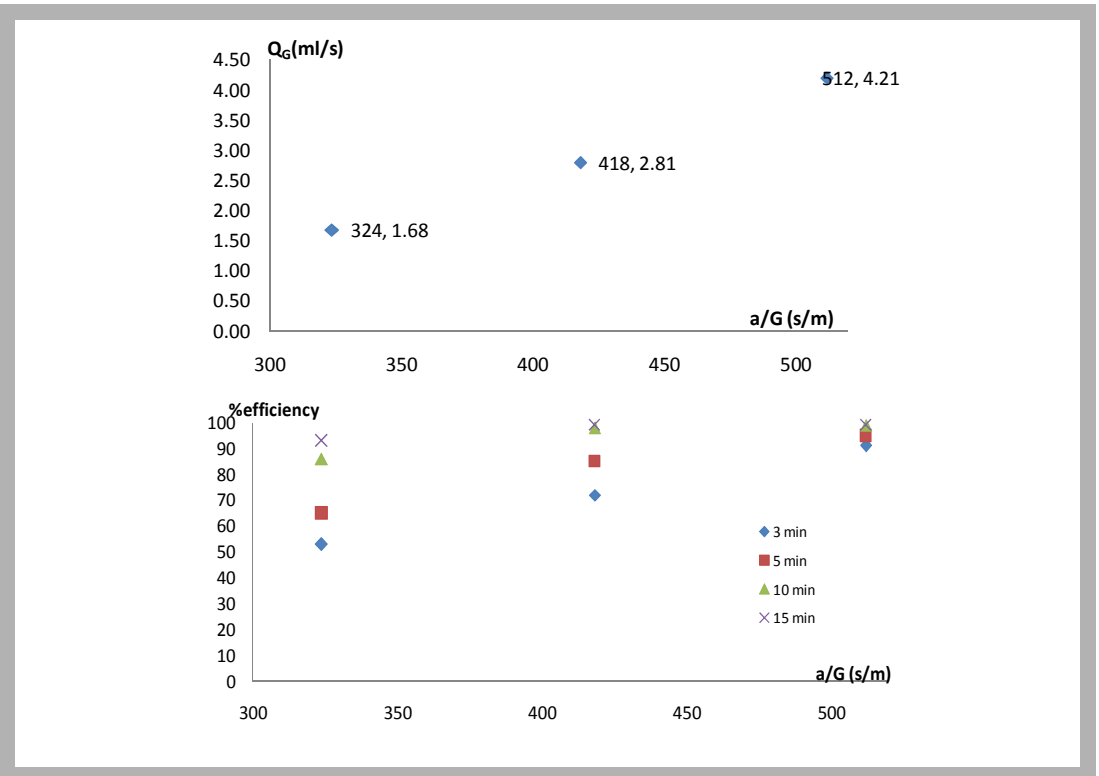
3.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง a/G และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน

รูปที่ 5 แสดงค่าสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศต่อความเร็วเกรเดียนท์หรือ a/G ที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ 1.68 2.81 และ 4.21 มล.ต่อวินาที ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 0.60 เมตร ความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำเสียมีค่า 1 กรัมต่อลิตร และความดันอากาศ 4 atm ในเบื้องต้นทำการคำนวณค่าความดันป่วนในเฟสน้ำหรือค่า G (ใช้สมการดังแสดงในตารางที่ 2) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 100 วินาที⁻¹ จากค่าดังกล่าวสามารถบ่งชี้ลักษณะการกวนผสมหรือการสัมผัสและเกาะติดระหว่างฟองอากาศและอนุภาคน้ำมันว่ามีลักษณะแบบกลไกการสร้างหรือรวมตะกอน (Flocculation mechanism) [9] และเมื่อนำค่า G ที่ได้มาคำนวณสัดส่วน a/G จะได้เท่ากับ 324 418 และ 512 วินาทีต่อเมตร ที่อัตราการไหลอากาศ 1.68 2.81 และ 4.21 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ

จากนั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด (%Eff) และสัดส่วนค่า a/G ที่ระยะเวลาในการเดินระบบ 3 5 10 และ 15 นาที (ดังแสดงในรูปที่ 5) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ระยะเวลาเดินระบบต่างๆจะมีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อ a/G มีค่าเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวเกิดจาก a/G ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงระบบมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเพิ่มขึ้นจึงมีความสามารถหรืออัตราเร็วการบำบัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนมีค่าคงที่เมื่อปริมาณน้ำมันตัดที่เหลือในเฟสน้ำมีค่าต่ำ โดยสรุป การเพิ่มอัตราการไหลอากาศเป็นการเพิ่มค่าสัดส่วน a/G ของระบบซึ่งส่งผลให้จลนศาสตร์การบำบัด (อัตราเร็วในการบำบัด) และประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่าค่า a/G ที่ควรเลือกเดินระบบในงานวิจัยนี้ควรเป็นค่า a/G ที่ทำให้อัตราเร็วการบำบัดมีค่าสูงหรือมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาต่างๆใกล้เคียงกัน คือ a/G ประมาณ 500 วินาทีต่อเมตร แต่ในทางปฏิบัติการที่ระบบมีค่า a/G สูงอาจหมายถึงต้นทุนในการเดินระบบที่สูงขึ้นตามไปด้วย การเลือกใช้ค่า a/G ที่ลดลงแต่เพิ่มระยะเวลาพักของระบบ (ขนาดถังปฏิริยาใหญ่ขึ้น) เพื่อให้ระบบยังคงบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ การศึกษาในขั้นต่อไปจะทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการคำนวณประสิทธิภาพของการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) [10] เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันตัดและปริมาณอากาศต่อกระบวนการ DAF และเพื่อเสนอแนวทางการออกแบบกระบวนการ DAF

รูปที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา
การไหลอากาศในคอลัมน์
การทำให้ลอยตัวกับค่า
สัดส่วน a/G และ
ประสิทธิภาพการบำบัดที่
อัตราส่วน a/G ใดๆ ณ เวลา
ในการเดินระบบที่แตกต่างกัน

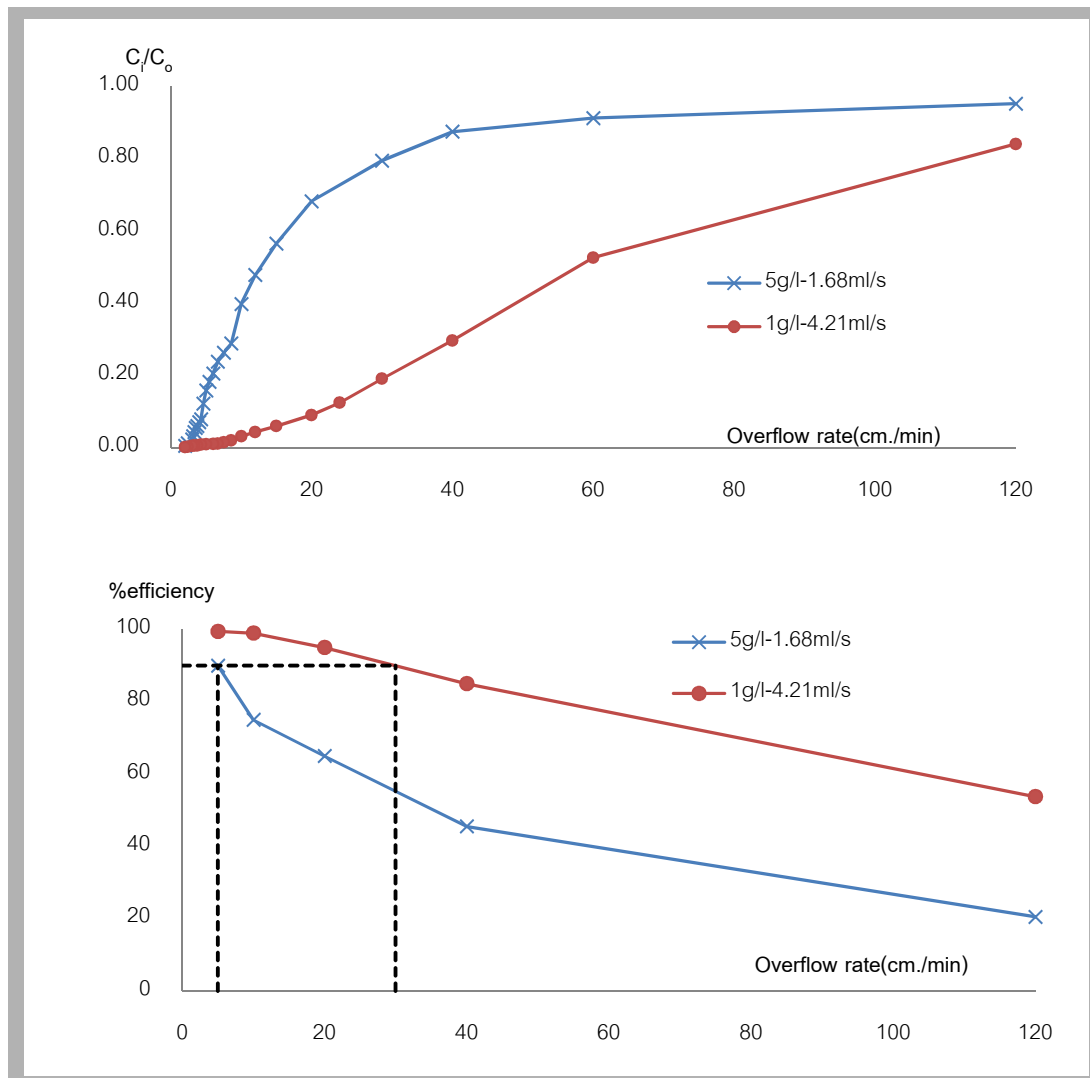


3.5 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบ

ในขั้นต้น เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นกับโอกาสการสัมผัสและเกาะติดระหว่างฟองอากาศและอนุภาคน้ำมัน ดังนั้น การเพิ่มปริมาณอากาศ (จำนวนฟองอากาศ) หรือเพิ่มความเข้มข้นน้ำมัน (จำนวนอนุภาคน้ำมัน) น่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ ในการนี้ เพื่อพิสูจน์สมมติฐานข้างต้นและเพื่อทำการออกแบบระบบได้อย่างเหมาะสม จึงทำการทดลองเปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณน้ำมันและอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเลือกใช้ความเข้มข้นน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร ณ อัตราการไหลของอากาศ 1.68 มล.ต่อวินาที เป็นตัวแทนการศึกษาลักษณะที่เกิดจากความเข้มข้นของน้ำมันต่ำที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด (มีปริมาณน้ำมันสูงแต่มีปริมาณอากาศต่ำ) และเลือกใช้การทดลองที่ความเข้มข้นน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร ณ อัตราการไหลของอากาศ 4.21 มล.ต่อวินาที เป็นตัวแทนการศึกษาลักษณะที่เกิดจากปริมาณอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด (มีปริมาณน้ำมันต่ำแต่มีปริมาณอากาศสูง) จากนั้นทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากทั้งสองกรณีด้วยทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดด ($\eta = (1 - P_o) + (1/v_o) \int_0^{P_o} v_d P_f$) [10]

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อทำการพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมที่ร้อยละ 90 กล่าวได้ว่าการทดลองที่ 1 (ความเข้มข้นน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร ณ อัตราการไหลของอากาศ 1.68 มล.ต่อวินาที) จะมีค่าอัตราน้ำล้นผิว 5 ซม.ต่อนาที ในขณะที่ การทดลองที่ 2 (ความเข้มข้นน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร ณ อัตราการไหล 4.21 มล.ต่อวินาที) จะมีค่าอัตราน้ำล้นผิว 30 ซม.ต่อนาที ซึ่งค่า OFR ที่ได้ข้างต้นเป็นการบ่งบอกว่าหากต้องการประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 90 การทดลองที่ 1 หรือตัวแทนการศึกษาลักษณะที่เกิดจากความเข้มข้นน้ำมัน จะต้องใช้พื้นที่ในการเดินระบบมากกว่าการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแทนการศึกษาลักษณะที่เกิดจากปริมาณอากาศ จากผลดังกล่าวจึงอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (จำนวนฟองอากาศ) มีผลต่อประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดมากกว่าการเพิ่มปริมาณน้ำมันในระบบ DAF และยังเป็นที่ยืนยันว่า ค่า

สัดส่วน a/G (แปรผันตรงกับอัตราการไหลอากาศ) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราเร็วการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดและสามารถใช้บอกแนวโน้มหรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละระบบได้นอกจากนี้จากค่าอัตราน้ำล้นผิวเท่ากับ 30 ซม.ต่อนาที (18 เมตรต่อชั่วโมง) ที่ได้จากการทดลอง 2 นั้น มีค่าสูงกว่าค่าความเร็วสุดท้ายในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมันตัดขนาด 1 ไมครอน (0.002 เมตรต่อชั่วโมง) อย่างชัดเจน ดังนั้น กระบวนการทำน้ำให้ใส (Clarification) ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) จึงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่ากระบวนการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง (Decantation process) และยังมีความต้องการพื้นที่ (ขนาดของถังปฏิกรณ์) ในการเดินระบบต่ำกว่าอีกด้วย



รูปที่ 6

อัตราส่วนความเข้มข้น
น้ำมัน ณ เวลาใด ๆ ต่อ
ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ อัตรา
น้ำล้นผิวต่าง ๆ และ
ประสิทธิภาพการบำบัดที่
อัตราน้ำล้นผิวต่าง ๆ

IV. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) โดยพิจารณาถึงผลกระทบตัวแปรการเดินระบบต่าง ๆ ได้แก่ ความดันอากาศ อัตราการไหลของอากาศ ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของน้ำมันตัดที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำ เป็นต้น รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน a/G และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด สามารถสรุปผลการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

- ชุดทดสอบการทำให้ลอยตัวแบบอากาศละลาย (DAF) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถให้ฟองอากาศมีขนาดอยู่ในช่วง 30 - 50 ไมครอน โดยพบการรวมตัวกันตามระดับความสูงคอลัมน์ รวมถึงความดันของระบบที่ 4 atm (ความดันเกจ) มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน
- การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำมันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมในขั้นนี้ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (Q_a) ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพสุดท้าย (%Eff > ร้อยละ 95) แต่จะส่งผลต่ออัตราเร็วในการบำบัด
- ค่าสัดส่วน a/G มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราเร็วในการบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัด และยังสามารถบอกถึงแนวโน้มหรือใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละระบบได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าสัดส่วน a/G ประมาณ 500 วินาทีต่อเมตร มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เนื่องจากมีอัตราเร็วในการบำบัดที่สูงทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากปริมาณฟองอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพและต้องการขนาดถังปฏิกรณ์หรือระยะเวลาเดินระบบต่ำ
- ทฤษฎีการตกตะกอนแบบโคตถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์ทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสำหรับเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยสามารถประมาณค่าอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่สัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการได้ในทางทฤษฎี

โดยสรุป เกณฑ์การออกแบบ (Design criteria) ที่ได้จากงานวิจัยนี้ กล่าวคือ ควรเลือกเดินระบบที่อัตราการไหลของอากาศที่สัมพันธ์กับค่าสัดส่วน a/G ประมาณ 500 วินาทีต่อเมตร และทำการออกแบบพื้นที่ถังทำให้ลอยตัว (Flotation tank) ด้วยอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่ต่ำกว่า 18 เมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามเพื่อพิสูจน์แนวคิดและเกณฑ์การออกแบบข้างต้นมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) และระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้จากการที่น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปของอิมัลชันที่ผสมสารลดแรงตึงผิวซึ่งทำให้มีเสถียรภาพในระบบ งานวิจัยในขั้นต่อไปจึงศึกษาและเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2552 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัย (STAR) ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี) กลุ่มการวิจัยความเป็นไปได้และกำจัดจุลมลสารชนิดใหม่ในสิ่งแวดล้อม (ปีที่ 1)

บรรณานุกรม

- [1] กชกร ก้องกังวาลย์, “การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว,” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [2] ประจักษ์ ศาสตรเวช, “การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [3] Water Quality Division Aquifer Protection Program, *BADCT Guidance Document for Pretreatment with Oil/Water Separators Draft*. Arizona: Arizona Department of Environmental Quality, 1996.
- [4] J. K. Edzwald, “Review: Dissolved air flotation and me”, *Water Research*, vol. 44, pp. 2077-2106, 2010.
- [5] S. Rachu, “Computer program development for oily wastewater treatment process selection,” Design and Simulation, Doctoral dissertation, Department of Environment, The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse, France, 2005.
- [6] P. Painmanakul, P. Sastaravet, S. Lersjintanakarn, and S. Khaothiar, “Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 88, pp. 693-702, 2010.
- [7] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [8] Y. Aurelle, *Treatment of Oil-Containing Wastewater*. Bangkok, Chulalongkorn, 1985.
- [9] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill, 2004.
- [10] มั่นสิน ตันจุลเวศน์, *วิศวกรรมประปา*. พิมพ์ครั้งที่ 2, เล่ม 1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

