



การวิเคราะห์ถังลอยตะกอนในด้านรูปแบบการไหลและ การแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลว Analysis of Flotation Tank in terms of Flow Pattern and Particle Separation from Liquid Phase

Thawatchai Chintateerachai Orapa Prechawat Kritchart Wongwailikhit

Chaiyaporn Puprasert and Pisut Painmanakul*

ธวัชชัย จินตธีรชัย อรภา ปรีชาวาท กริชชาติ ว่องไวลิขิต ชัยพร ภูประเสริฐ และ พิสุทธิ์ เพียรมนกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

E-mail : pisut.p@chula.ac.th, pisut114@hotmail.com

บทคัดย่อ

รูปแบบการไหลของของไหลในถังมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ส่วนแรกของงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์ของถังลอยตะกอนที่มีการไหลแบบผสมผสาน ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) อัตราการไหลของน้ำความดันสูง (Q_{PW}) อัตราการไหลของอากาศ ($Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$) และชนิดของหัวกระจายลม (D_1) ด้วยทฤษฎีฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution: RTD) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารติดตาม (tracer) และใช้วิธีการป้อนสารเพียงครั้งเดียว (pulse input) ในการทดลองเพื่อหาแบบการไหลของถังวิเคราะห์ผลในเทอมของค่า Dispersion number (d ; D/uL) ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เพื่อกำหนดจำนวนการทดลองและการแปรค่าของปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าถังลอยตะกอนที่ออกแบบไว้มีลักษณะการไหลแบบท่อที่มีการแพร่กระจายของสารมาก โดยที่ D/uL มีค่าสูงสุด เมื่อ Q_{PW} $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ มีค่าเท่ากับ 0 lpm 7.5 lpm และ 2.5 lpm ตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายและน้ำเสียสังเคราะห์ความขุ่น ซึ่งสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมคือ ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S) ระหว่าง 0.15-0.32 mg air/mg solid ร่วมกับการเติมสารส้ม (Alum) และค่า D/uL ของถังลอยตะกอนมีค่าอยู่ในช่วง 0.107-0.112 จะได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสูงกว่า 72%

คำสำคัญ : รูปแบบการไหล; ถังลอยตะกอน; ทฤษฎีฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก; Dispersion number; ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (DOE); ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S)

Abstract

Flow patterns of fluid in reactor have an effect on particle separation efficiency by dissolved air flotation process. First part of this study examined the hydrodynamic parameters of the flotation tank including Liquid flow rate (Q_L), Pressurized water flow rate (Q_{PW}), Air flow rate ($Q_{g,1}$ and $Q_{g,2}$), and type of air diffuser (D_1) by the residence time distribution function theory. The flow patterns were experimentally examined throughout the reactor by pulse tracer input method which Sodium chloride (NaCl) was used as tracer. Dispersion model and Design of Experiments (DOE) were applied to analyze result in term of dispersion number (d ; D/uL). The result showed that flow patterns of the flotation tank are Plug flow reactor with large extents of dispersion. The highest D/uL value is obtained at 0 lpm, 7.5 lpm, and 2.5 lpm of Q_{PW} , $Q_{g,1}$, and $Q_{g,2}$ respectively. Second part, Treatment efficiency of synthetic wastewater containing microalgae and turbid particle was investigated. The optimum operating conditions are 0.15-0.32 mg air/ mg solid of Air to solids ratio (A/S) combined with Alum addition and 0.107-0.112 of D/uL of the flotation tank that the particle separation efficiency is higher than 72%

Keywords : Flow patterns; Flotation Tank; Residence time distribution function theory; Dispersion number; Design of Experiments (DOE); Air to Solids ratio (A/S)

บทนำ

งานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมักเกี่ยวข้องกับการแยกอนุภาคออกจากเฟสของไหล ทั้งในด้านการผลิตน้ำประปา การบำบัดและกำจัดของเสีย โดยกระบวนการแยกทางกายภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 1 nm ถึง 1 μm ได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากอนุภาคมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloids) [1, 2] การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจมีการเติมสารเคมี (Coagulant) เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาค การใช้กระบวนการทางเลือกต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการทำให้ลอย (Flotation) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกอนุภาคขนาดเล็ก และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น [2, 3] หรือผสมผสานกระบวนการทางเคมี และกระบวนการแยกทางกายภาพ เข้าด้วยกัน (Hybrid process) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานในการแยกอนุภาคต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น สาหร่าย น้ำมัน อนุภาคความขุ่น เป็นต้น

รูปแบบการไหลในถังแบบอุดมคติโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การไหลแบบท่อ (Plug flow) และการไหลแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Completely mixed) แต่

การไหลของของไหลภายในถังจริงมีความแตกต่างจากอุดมคติ เนื่องจากการไหลลัดวงจรของของไหล (Channeling) การไหลวนของของไหล (Recycling flow) และบริเวณที่ไม่มีมีการไหล (Stagnant zone) ส่งผลให้โมเลกุลของของไหลมีเส้นทางการไหลที่แตกต่างกันและใช้เวลาในการไหลผ่านถังไม่เท่ากัน การกระจายของเวลาที่โมเลกุลของของไหลไหลผ่านถังเรียกว่า การกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution: RTD) ซึ่งรูปร่างลักษณะของกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve function) มีความสำคัญในการประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลทางทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลในถัง โดยแบบจำลองการไหลที่นิยมนำมาวิเคราะห์รูปแบบการไหล ได้แก่ 1. Compartment model ทำการเปรียบเทียบ E curve ของถังจริงกับ E curve ทางทฤษฎีเพื่อหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุด 2. Dispersion model ใช้วิเคราะห์หาระดับของการกวนผสม (Degree of mixing) ในเทอมของค่า Dispersion number (d ; D/uL) ถ้า D/uL มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าถังมีลักษณะการไหลเป็นแบบท่อ แต่ถ้า D/uL มีค่าเป็นอนันต์แสดงว่าถังมีลักษณะการไหลเป็นแบบกวนผสมสมบูรณ์ และ 3. Tank-in-series model ใช้วิเคราะห์หาจำนวนถังกวนผสมสมบูรณ์ที่ต่ออนุกรมกัน [4] โดยที่ความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบการไหล

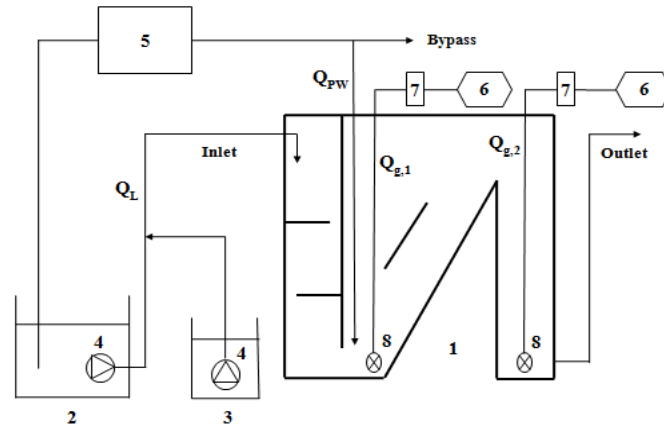
และ Degree of mixing ในส่วนสัมผัสระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบกระบวนการทำให้ลอยและเลือกสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่ต้องการ [5, 6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลภายในถังลอยตะกอน (Flotation

tank) ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหล และประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษารูปแบบการไหลของของไหลภายในถังลอยตะกอน



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษารูปแบบการไหล

จากรูปที่ 1 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษารูปแบบการไหลของของไหลในถังลอยตะกอน ซึ่งประกอบด้วย (1) ถังลอยตะกอนสูง 160 cm ยาว 115 cm กว้าง 25 cm (2) ถังน้ำ (3) ถังสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (4) เครื่องสูบน้ำ (5) เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็ก (Micro bubble generator) (6) ปั๊มลม (Air pump) (7) เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air flow meter) (8) หัวกระจายลม (Diffuser) ชนิดหัวเซรามิค ลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 cm หนา 1 cm และชนิดหัวทราย ลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 cm

ในงานวิจัยนี้จะทำการป้อนสารติดตาม (Tracer) คือ NaCl เข้าสู่ถังลอยตะกอนที่มีการไหลของของไหลอย่างต่อเนื่องด้วยวิธี Pulse input experimental method [4] วัดค่าความนำไฟฟ้าที่ทางออกของถังและคำนวณความเข้มข้นขาออกของ NaCl ที่เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หากราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve function) จากสมการที่ 1 และคำนวณค่า Dispersion number (d; D/uL) จากสมการที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (1)$$

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t \cdot C(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty t^2 \cdot C(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} - \bar{t}^2 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 (1 - e^{-\frac{uL}{D}}) \quad (4)$$

สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังลอยตะกอน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) อัตราการไหลของน้ำความดันสูง (Q_{PW}) อัตราการไหลของอากาศ ($Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$) และชนิดของหัวกระจายลม (D_1) โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ Two level half fractional factorial design (2^{k-1}) ในการออกแบบการทดลองเพื่อ

คัดกรองปัจจัยในขั้นต้น (ดังสรุปในตารางที่ 1) ซึ่งมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 16 ชุด ($n=2^{5-1}$) จากนั้นจะใช้ทฤษฎี DOE แบบ Central Composite Design (CCD) เพื่อวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อรูปแบบการไหล และสร้างสมการทำนายค่า D/uL ด้วยโปรแกรม Minitab [7, 8]

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังลอยตะกอน

ชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ประกอบด้วย (1) ถังลอยตะกอน (2) ถังน้ำเสียสังเคราะห์ (3) ถังน้ำ (4) เครื่องสูบน้ำ (5) เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็ก (Micro bubble generator) ดังแสดงในรูปที่ 2

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella* sp.) ความเข้มข้น 1×10^6 cells/mL (SS = 75 mg/L) และน้ำเสียสังเคราะห์

ความขุ่น 100 ± 5 NTU ด้วยเบนโทไนท์ (SS = 368 mg/L) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกด้วยถังลอยตะกอน โดยเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S) ที่แตกต่างกัน (ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 5) ร่วมกับการเติมสาร Coagulant โดยคำนวณประสิทธิภาพการแยกอนุภาค จากสมการที่ 6 เพื่อหาสถานะการเดินระบบที่เหมาะสม และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลของถังลอยตะกอน และประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่เกิดขึ้น

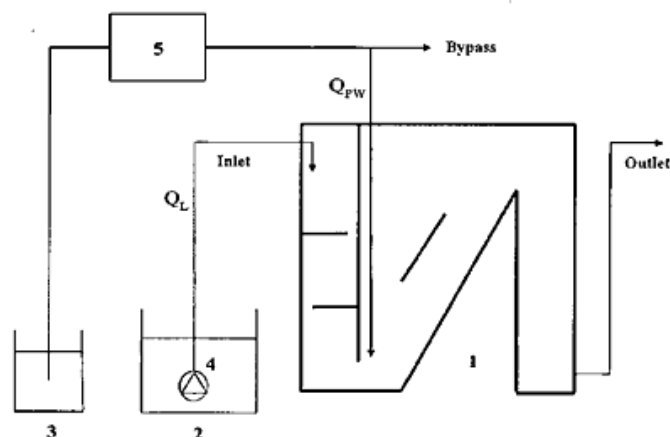
$$\frac{A}{S} = \frac{Q_{pw} \times (f \cdot P \cdot S_a - S_a)}{Q_L \times SS} \quad (5)$$

$$Eff. = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100 \quad (6)$$

สำหรับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษาในการคัดกรองปัจจัยด้วย DOE แบบ 2^{k-1}

Factor	Low level	High level
Q_L (lpm)	6.4	10
Q_{PW} (lpm)	0	4
$Q_{g,1}$ (lpm)	0	10
D_1	Sand	Ceramic
$Q_{g,2}$ (lpm)	0	2.5



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

ตารางที่ 2 วิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความนำไฟฟ้า	วัดด้วย Hanna HI934500C Conductivity meter
ค่า Dispersion number	คำนวณจากสมการที่ 4
ความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย	นับเซลล์ด้วย Haemocytometer
ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)	SMWW 2540D [9]
ค่าความขุ่น	วัดด้วย Lovibond TB210IR Turbidimeter
ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค	คำนวณจากสมการที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังลอยตะกอน

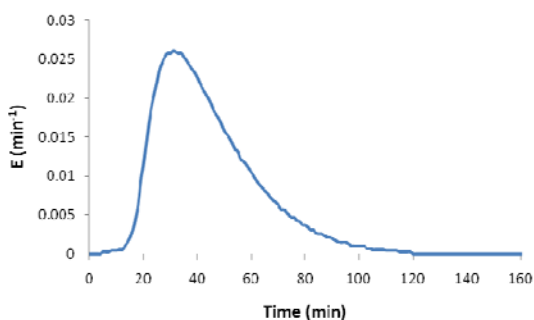
รูปร่างลักษณะของกราฟ E curve มีผลต่อการเลือกแบบจำลองทางทฤษฎีที่นำมาใช้วิเคราะห์รูปแบบการไหล ซึ่งกราฟ E curve ของถังลอยตะกอนที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 3

โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง รูปร่างลักษณะของกราฟ E curve และโมเดลสำหรับการพิจารณารูปแบบการไหล (Compartment Model) รวมถึงผลการศึกษาจากงานวิจัยอื่นๆ [10-13] พบว่า โมเดลทางทฤษฎีแบบ Dispersion model มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังลอยตะกอน

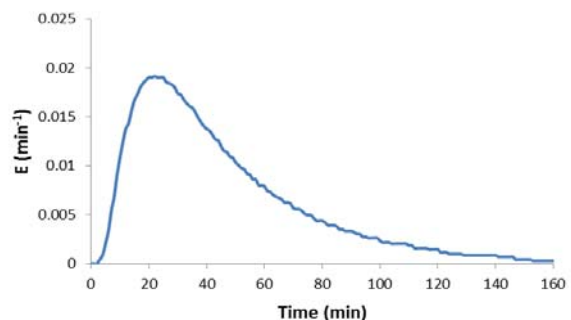
จากผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังลอยตะกอนด้วยโมเดลทางทฤษฎีแบบ Dispersion model พบว่า ถังลอยตะกอนมีลักษณะการไหลแบบท่อที่มีการ

แพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion) [4] โดยมีค่า D/uL ระหว่าง 0.098 ถึง 0.522 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Shawwa et al. [10] ที่พบว่าค่า D/uL ในส่วนสัมผัสของคอลัมน์ DAF มีค่ามากกว่า 0.01 งานวิจัยของ Chegeni et al. [11] พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าเท่ากับ 0.32 งานวิจัยของ Mills et al. [12] พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าเท่ากับ 0.61 และงานวิจัยของ Xu et al. [13] พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าระหว่าง 0.03 ถึง 0.58

ดังนั้นการทดลองในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์ของถังลอยตะกอน ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) อัตราการไหลของน้ำความดันสูง (Q_{PW}) อัตราการไหลของอากาศ ($Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$) และชนิดของหัวกระจายลม (D_1) ที่มีผลต่อรูปแบบการไหล โดยประยุกต์ใช้ DOE ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลในเทอมของตัวแปร D/uL



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังลอยตะกอน

(ก) $Q_L = 10$ lpm $Q_{PW} = 4$ lpm $Q_{g,1} = 0$ lpm และ $Q_{g,2} = 0$ lpm

(ข) $Q_L = 6.4$ lpm $Q_{PW} = 0$ lpm $Q_{g,1} = 10$ lpm และ $Q_{g,2} = 2.5$ lpm

การคัดกรองปัจจัย (Factor screening) ที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังลอยตะกอน

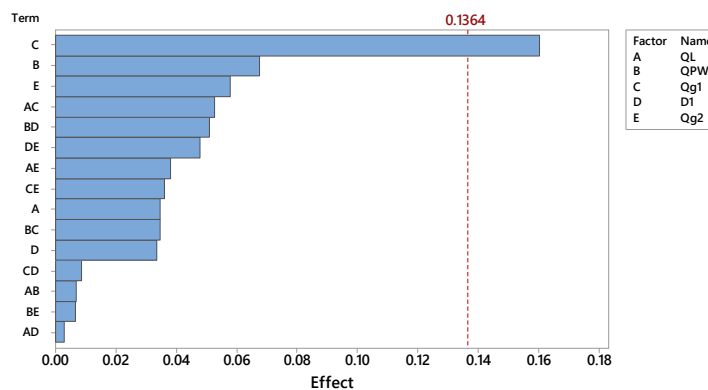
จากการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลในเทอมของตัวแปร D/uL ด้วยการทดลองแบบ 2^{k-1} พบว่าค่า $Q_{g,1}$ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในรูปที่ 4 แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางทฤษฎีพบว่า ค่า Q_L Q_{PW} และ $Q_{g,2}$ มีผลกระทบร่วมกับค่า $Q_{g,1}$ ดังแสดงในรูปที่ 5

ดังนั้น การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังลอยตะกอนในขั้นต้น ด้วยทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบ Two level half fractional factorial design (2^{k-1}) คัดปัจจัย D_1 ออกเพราะเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และไม่มีผลกระทบร่วมกับค่า $Q_{g,1}$ (ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) ต่อค่า D/uL

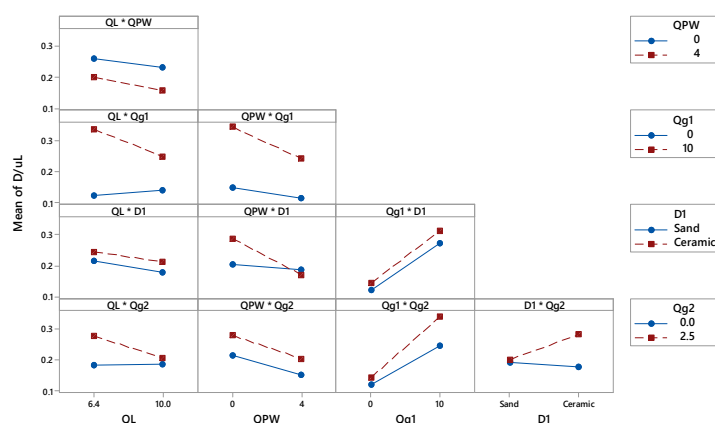
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังลอยตะกอนด้วย DOE แบบ CCD

จากผลการทดลองและการคัดกรองปัจจัยข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วยการทดลองแบบ CCD จะทำการศึกษาเพียง 4 ปัจจัย ได้แก่ Q_L Q_{PW} $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ (ดังสรุปในตารางที่ 3) จะได้จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 30 ชุด ซึ่งค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษาในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกับชุดการทดลองแบบ Two level half fractional factorial design (2^{k-1}) ทั้งหมด

โดยผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลจากการทดลองแบบ CCD ด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 7 และ 8 ซึ่งแสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย และกราฟ Surface and Contour plot ที่แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ตามลำดับ



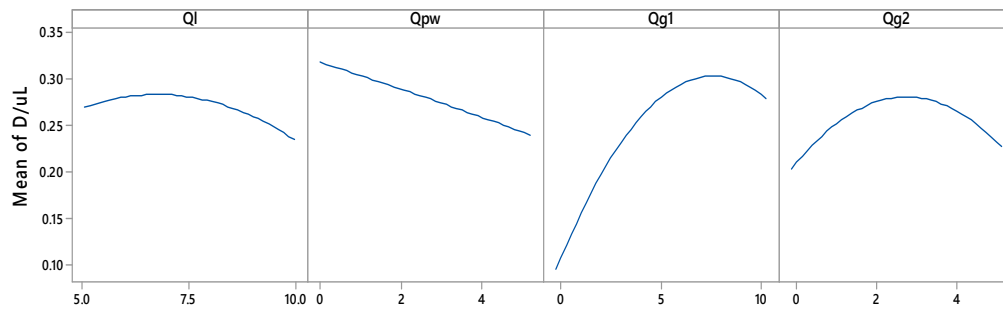
รูปที่ 4 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ 2^{k-1}



รูปที่ 5 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ 2^{k-1}

ตารางที่ 3 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษด้วย DOE แบบ CCD

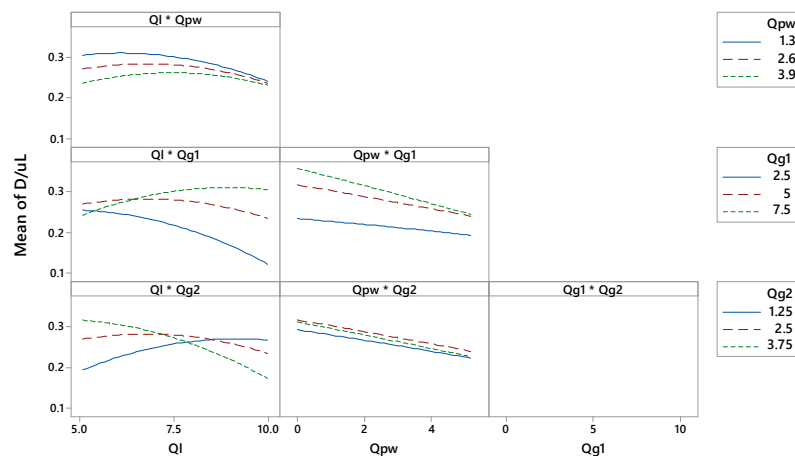
Factor	-2	-1	0	+1	+2
Q_L (lpm)	5.2	6.4	7.6	8.8	10
Q_{PW} (lpm)	0	1.3	2.6	4	5.2
$Q_{g,1}$ (lpm)	0	2.5	5	7.5	10
$Q_{g,2}$ (lpm)	0	1.25	2.5	3.75	5



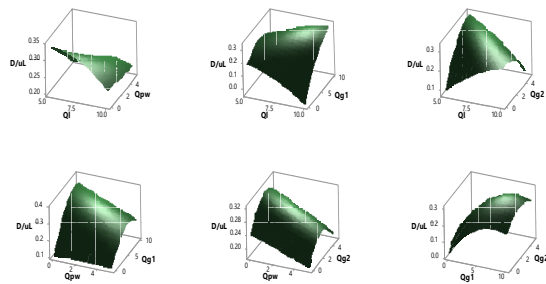
รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD

จากรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL พบว่า ค่า Q_L ไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญในช่วงที่ทำการศึกษานี้ ในขณะที่ค่า Q_{PW} มีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยที่ค่า D/uL

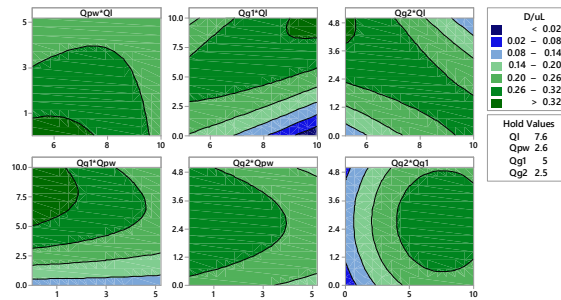
แปรผกผันกับค่า Q_{PW} ส่วนค่า $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ มีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการกำลังสอง โดยจากการวิเคราะห์ผลทางคณิตศาสตร์พบว่า D/uL มีค่าสูงสุด เมื่อ $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ มีค่าเท่ากับ 7.5 lpm และ 2.5 lpm ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) Surface plot (ข) Contour plot แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL

จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL พบว่า ผลกระทบร่วมของค่า Q_L กับ $Q_{g,1}$ และค่า Q_L กับ $Q_{g,2}$ มีต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลกระทบร่วมของค่า Q_L กับ Q_{PW} ค่า Q_{PW} กับ $Q_{g,1}$ และค่า Q_{PW} กับ $Q_{g,2}$ ไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงที่ทำการศึกษานี้ โดยที่ D/uL มีค่าสูงสุดเมื่อ Q_{PW} $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ มีค่าเท่ากับ 0 lpm 7.5 lpm และ 2.5 lpm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL

สมการวิเคราะห์ปัจจัยและทำนายค่า Dispersion number (d; D/uL)

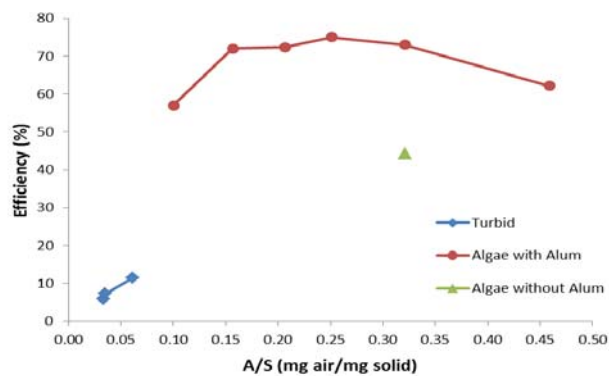
ในส่วนนี้จะทำการสร้างสมการทำนายค่า D/uL ทางทฤษฎี ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Q_L Q_{PW} $Q_{g,1}$ และ $Q_{g,2}$ โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression analysis) ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการประยุกต์ใช้สมการทำนายทางทฤษฎีพบว่ามีความคลาดเคลื่อน $\pm 6.5\%$

$$\begin{aligned} \frac{D}{uL} = & -0.118 + 0.055Q_L - 0.334Q_{PW} - 0.002Q_{g,1} + 0.1892Q_{g,2} + 0.0048Q_LQ_{PW} \\ & + 0.00797Q_LQ_{g,1} - 0.01772Q_LQ_{g,2} - 0.00282Q_{PW}Q_{g,1} - 0.0012Q_{PW}Q_{g,2} \\ & - 0.00465Q_L^2 - 0.00019Q_{PW}^2 - 0.00337Q_{g,1}^2 - 0.0094Q_{g,2}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังลอยตะกอน

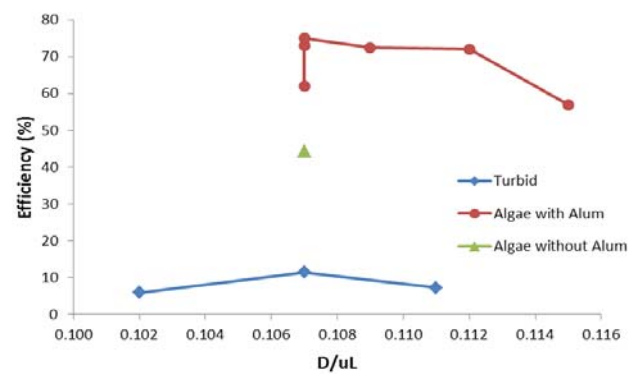
ผลการแยกอนุภาคสาหร่ายและอนุภาคความขุ่น ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในถังลอยตะกอน ที่สภาวะการเดินระบบดังนี้ อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ (Q_L) 3.5-6.4 lpm อัตราการไหลน้ำ

ความดันสูง (Q_{PW}) 1.6-4 lpm และใช้สารส้ม (Alum) เป็น Coagulant [14-16] แสดงดังรูปที่ 10-12 ซึ่งแสดงผลของค่า A/S ผลของค่า D/uL และกราฟ Contour plot ที่แสดงผลกระทบร่วมของค่า A/S และค่า D/uL ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ตามลำดับ



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่ค่า A/S ต่างๆ

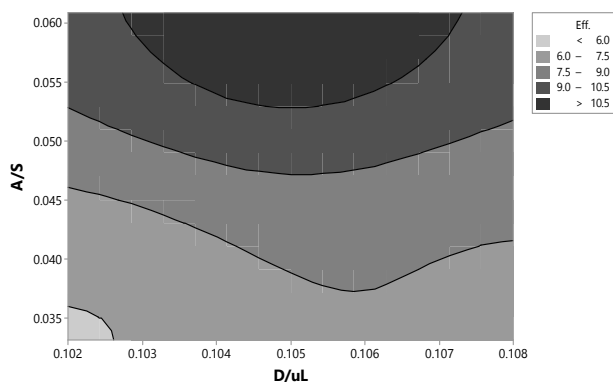
จากรูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสำหรับและอนุภาคความขุ่นที่ค่า A/S ต่างๆ พบว่า การแยกอนุภาคสำหรับด้วยการเดินระบบที่มีค่า A/S ระหว่าง 0.15-0.32 mg air/mg solid ร่วมกับการเติม Alum จะได้ประสิทธิภาพแยกสูงกว่า 72% แต่ถ้าเดินระบบโดยไม่เติม Alum จะได้ประสิทธิภาพการแยกประมาณ 44% ในขณะที่การแยกอนุภาคความขุ่นด้วยการเดินระบบที่มีค่า A/S ระหว่าง 0.03-0.06 mg air/mg solid ซึ่งสอดคล้องกับค่า



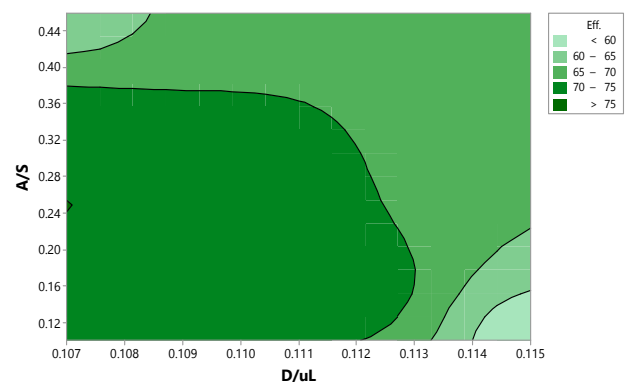
รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่ค่า D/uL ต่างๆ

A/S ที่ Metcalf & Eddy [2] แนะนำ แต่ได้ประสิทธิภาพการแยกต่ำกว่า 12%

จากรูปที่ 10 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสำหรับและอนุภาคความขุ่นที่ค่า D/uL ต่างๆ พบว่า รูปแบบการไหลของถังลอยตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค โดยการแยกอนุภาคสำหรับมีประสิทธิภาพสูงกว่า 72% เมื่อมีการเติมสารส้ม (Alum) และค่า D/uL ของถังลอยตะกอนมีค่าอยู่ในช่วง 0.107-0.112



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 Contour plot แสดงผลกระทบร่วมของค่า A/S และค่า D/uL ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ก) ความขุ่น และ (ข) สำหรับ

จากรูปที่ 11 แสดงผลกระทบร่วมของค่า A/S และค่า D/uL ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค พบว่า ถังลอยตะกอนสามารถแยกอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเดินระบบที่มีค่า A/S ระหว่าง 0.15-0.32 mg air/mg

solid ร่วมกับการเติม สารส้ม (Alum) และค่า D/uL ของถังลอยตะกอนมีค่าอยู่ในช่วง 0.107-0.112 จะได้ประสิทธิภาพการแยกสูงกว่า 72%

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหล และประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังลอยตะกอน ซึ่งสามารถสรุปประเด็นสำคัญจากผลการทดลองได้ดังนี้

1) ถังลอยตะกอนมีรูปแบบการไหลเป็นแบบท่อที่มีการแพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion)

2) ค่า Q_L และ D_1 ไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยสำคัญ ค่า Q_{PW} มีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยที่ค่า D/uL แปรผกผันกับค่า Q_{PW} ส่วนค่า $Q_{s,1}$ และ $Q_{s,2}$ มีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการกำลังสอง

3) D/uL มีค่าสูงสุด เมื่อ Q_{PW} $Q_{s,1}$ และ $Q_{s,2}$ มีค่าเท่ากับ 0 lpm 7.5 lpm และ 2.5 lpm ตามลำดับ

4) การแยกอนุภาคในถังลอยตะกอนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 72% ที่สภาวะการเดินระบบ ค่า A/S ระหว่าง 0.15-0.32 mg air/mg solid ร่วมกับการเติมสารส้ม (Alum) และค่า D/uL ของถังลอยตะกอนมีค่าอยู่ในช่วง 0.107-0.112

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนอุดหนุนโครงการเพิ่มศักยภาพส่วนงานในด้านการวิจัยและหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดปิโตรเลียมและน้ำมัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Sawyer, C. N., McCarty, P. L. and Parkin, G. F. 2003. Chemistry for Environmental Engineering and Science (5th Ed.). United States of America: McGraw-Hill.

[2] Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G. Burton, F. L. and Stensel, H. D. 2002. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th Ed.). United States of America: McGraw-Hill.

[3] Kawamura, S. 2000. Integrated Design and Operation of Water Treatment (2nd Ed.). United States of America: John Wiley & Son, Inc.

[4] Levenspiel, O. 1999. Chemical Reaction Engineering (3rd Ed.). United States of America: John Wiley & Son, Inc.

[5] Valade, M. T., Becker, W. B. and Edzwald, J. K. 2009. Treatment selection guidelines for particle and NOM removal. J. Water Supply Res. T. 58(6): 424-432.

[6] Behin, J. and Bahrami, S. 2012. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 59: 1-8

[7] Montgomery, D. C. 2008. Design and analysis of experiments. United States of America: John Wiley & Son, Inc.

[8] Minitab, I. 2000. MINITAB statistical software. Minitab release, 13.

[9] APHA, AWWA, and WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22th Ed.). United States of America: APHA.

[10] Shawwa, A. R. and Smith, D. W. 1998. Hydrodynamic characterization in dissolved air flotation (DAF) contact zone. Water Sci. Technol. 38(6): 245-252.

[11] Chegeni, M. H., Abdollahy, M. and Khalesi, M. R. 2015. Column flotation cell design by drift flux and axial dispersion models. Int. J. Miner. Process. 145: 83-86.

- [12] Mills, P. J. T. and O'Connor, C. T. 1992. Technical note the use of the axial dispersion model to describe mixing in a flotation column. *Miner. Eng.* 5(8): 939-944.
- [13] Xu, M. and Finch, J. A. 1991. The axial dispersion model in flotation column studies. *Miner. Eng.* 4(5): 553-562.
- [14] Bunker, D. Q., Edzwald, J. K., Dahlquist, J., and Gillberg, L. (1995). Pretreatment considerations for dissolved air flotation: water type, coagulants and flocculation. *Water Sci. Technol.* 31(3): 63-71.
- [15] Henderson, R., Parsons, S. A. and Jefferson, B. (2008). The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Water Res.* 42(8): 1827-1845.
- [16] Henderson, R. K., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2010). The impact of differing cell and algogenic organic matter (AOM) characteristics on the coagulation and flotation of algae. *Water Res.* 44(12): 3617-3624.