



กระบวนการลอยตะกอนแบบอากาศละลาย

แสงนวล ศรีรัตนชัยवाल และ อนรุักษ์ ปิติรักษ์สกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8247 อีเมล: anuruk.p@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.11.001

รับเมื่อ 7 พฤษภาคม 2559 ตอรับเมื่อ 7 กรกฎาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 1 พฤศจิกายน 2559

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การลอยตะกอนแบบอากาศละลาย (ดีเอเอฟ) คือกระบวนการแยกอนุภาคหรือหยดน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กมากซึ่งผลิตขึ้นจากการเพิ่มและลดความดันของน้ำอัดตัวลงมาที่ความดันบรรยากาศ ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนการนำดีเอเอฟไปประยุกต์ใช้ทั้งการบำบัดน้ำและการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของกระบวนการดีเอเอฟ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการดีเอเอฟประกอบด้วยการกวนเร็วเพื่อใช้ในการเติมสารรวมตะกอน ตามด้วยการกวนช้าเพื่อการก่อตะกอนให้ใหญ่ขึ้น จากนั้นปล่อยผ่านเข้าสัมผัสกับฟองอากาศที่ได้จากน้ำอัดตัวจากถังอัดอากาศ เข้าสู่ถังลอยตะกอนเพื่อให้ฟองอากาศชนกับตะกอนที่ก่อขึ้นเกิดเป็นฟล็อก-ฟอง อะกรีเกรท (Floc-bubble Aggregates) ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของถังลอยตะกอน โดยทั่วไปสภาวะในการเดินระบบดีเอเอฟคือความดัน 4–6 barg อัตราส่วนการบ้อนเวียนกลับ 10–30% อัตราภาระต่อพื้นที่หน้าตัด (Overflow Surface Loading Rate) เท่ากับ 5–15 m³/m²-h และ 20–40 m³/m²-h สำหรับอัตราการไหลต่ำและสูงตามลำดับ และการอัดอากาศเป็นแบบต่อเนื่องชนิดให้ความดันแบบกระแสน้ำวนเวียนกลับ (Continuous Recycled Stream Pressurization) โดยทั่วไปประสิทธิภาพของการกำจัดอนุภาคในน้ำขึ้นกับความเข้มข้นของฟองอากาศ ความเข้มข้นของอนุภาคและแรงทั้งหมดที่อนุภาคและฟองอากาศกระทำต่อกันซึ่งประกอบด้วยแรงไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic Force) และแรงพื้นผิว (Surface Force) แรงไฮโดรไดนามิกส์คือแรงผลที่เกิดระหว่างอนุภาค/ฟล็อกกับฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากการลอยตัวของฟอง ซึ่งแรงนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิจากน้ำ ขนาดของอนุภาค ขนาดของฟองอากาศและความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ส่วนแรงพื้นผิวประกอบด้วย แรงอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic Force) แรงแวนเดอร์วาล (Vander Waals Force) และแรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Force) ในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการลอยตะกอนมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพของการลอยตะกอน โดยแบบจำลองในช่วงแรกเป็นการใช้สมการเอมไพริคอล (Empirical Equations) และในระยะเวลาต่อมาได้พัฒนาจากสมการเอมไพริคอลเป็นแบบจำลองการชนเชิงเดี่ยว (Single-collector Collision) แบบจำลองทราเจกทอรี (Trajectory Model) และแบบจำลอง CFD

คำสำคัญ: การลอยตะกอน, ดีเอเอฟ, ฟองอากาศ, การบำบัดน้ำและการบำบัดน้ำเสีย

การอ้างอิงบทความ: แสงนวล ศรีรัตนชัยवाल และ อนรุักษ์ ปิติรักษ์สกุล, “กระบวนการลอยตะกอนแบบอากาศละลาย,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, หน้า 205–217, ม.ค.-เม.ย. 2560



Dissolved Air Flotation Processes

Sanguan Srirathchatchawarn and Anurak Petiruksakul*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8247, E-mail: anuruk.p@eng.kmutnb.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.11.001

Received 7 May 2016; Accepted 7 July 2016; Published online: 1 November 2016

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Dissolved Air Flotation (DAF) is a water clarification process that separates particles and/or oil droplets from water using fine bubbles produced from increasing and reducing the pressure of saturated water to atmospheric pressure. This article aims to review the application of DAF in water and wastewater treatment, and to develop a mathematical model to calculate the efficiency of DAF process. The DAF process normally consists of the fast mixing for coagulant addition, the slow mixing for flocculation, and the release for bubbles colliding with flocs to form floc-bubble aggregates floating to the surface of the tank. The conditions of the DAF operation are 4–6 barg pressure, 10–30% of recycle ratios, the overflow surface loading rate of 5–15 m³/m²-h for low rate and 20–40 m³/m²-h for high rate and continuous recycled stream pressurization. The particle removal efficiency typically depends on bubbles and particle concentrations, and the total forces between particles and bubble surfaces, namely, hydrodynamic and surface forces. The hydrodynamic force represents the repulsive interaction of particles/flocs around the rising bubbles. This force depends on the water temperature, the sizes of particles and bubbles, and the velocity of rising bubbles. The surface force contains electrostatic force, Van der Waals force and hydrophobic force. The flotation mathematical model is developed to predict the flotation efficiency. Empirical equations are used in the beginning, and developed to single-collector collision, trajectory model and CFD model, respectively.

Keywords: Flotation, DAF, Air Bubble, Water and Wastewater Treatment

1. บทนำ

การลอยตะกอนแบบอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF) หรือเรียกว่า “ดีเอเอฟ” คือกระบวนการแยกอนุภาคของแข็งหรือหยดน้ำมันออกจากน้ำ ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือน้ำอาจเรียกเป็นกระบวนการทำใส (Clarification Processes) ดีเอเอฟถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งการบำบัดน้ำ การบำบัดน้ำเสีย และการแยกสินแร่ ดีเอเอฟมีจุดเด่นคือสามารถประยุกต์ใช้ได้ดีถึงดีมากในการแยกน้ำมัน ไขมัน ตะกอนเบา และคอลลอยด์ (ที่เสถียรภาพ) เนื่องจากอนุภาคหรือหยดน้ำมันขนาดเล็กเหล่านี้ตกตะกอนช้ามากหรือไม่ตกเลย ทำให้การใช้ถังตกตะกอนในการแยกมีประสิทธิภาพต่ำ [1] หรือถ้าใช้กระบวนการกรองก็พบปัญหาเรื่องการอุดตัน ดีเอเอฟจึงเป็นกระบวนการทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดอีกวิธีหนึ่ง เป็นที่ทราบกันดีว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบกระบวนการดีเอเอฟส่วนใหญ่อิงกับผลการทดลองเป็นหลัก เนื่องจากระบบดีเอเอฟมีความซับซ้อนในการคำนวณทำให้ทฤษฎีและแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากสมมุติฐานที่กำหนดขึ้นจากการแก้สมการ ดังนั้นในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจะทบทวนการนำดีเอเอฟไปประยุกต์ใช้ด้านการบำบัดน้ำและการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีคุณลักษณะของน้ำที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีสภาวะในการเดินระบบที่ต่างกันแล้วจึงทบทวนถึงคุณลักษณะที่สำคัญของดีเอเอฟได้แก่ การผลิตฟองอากาศขนาดฟองอากาศ และแรงกระทำระหว่างฟองอากาศกับอนุภาครวมถึงการพัฒนาระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการดีเอเอฟ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ใช้อธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองแล้วนำไปสู่การออกแบบเชิงระบบเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่อไป

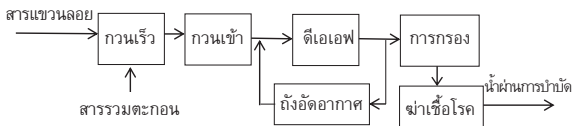
2. การประยุกต์ใช้ดีเอเอฟ

ดีเอเอฟเป็นการลอยตะกอนประเภทหนึ่งเกิดขึ้นจากการเพิ่มความดันให้กับน้ำโดยใช้อากาศ เมื่อความดันรวมในระบบเพิ่มขึ้นค่าการละลายของอากาศในน้ำมีค่า

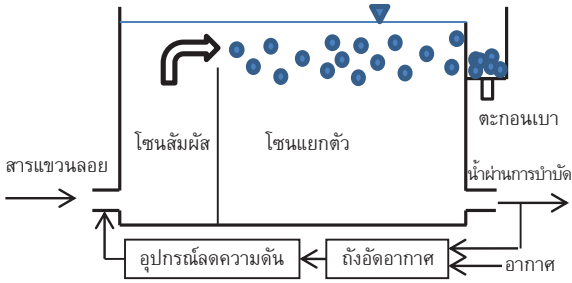
เพิ่มขึ้นตามกฎของก๊าซอากาศจึงละลายในน้ำได้มากขึ้น ที่ความดันสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อลดความดันรวมของระบบลงมาที่ความดันบรรยากาศ ค่าการละลายของอากาศจะเข้าสู่สมดุลใหม่ที่ความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศที่ละลายที่ความดันสูงถูกปลดปล่อยเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศที่ผลิตขึ้นนี้จะถูกปลดปล่อยให้ชนกับอนุภาคแขวนลอยในน้ำเกิดการเกาะยึดติดกันและเคลื่อนที่สู่ผิวน้ำ ดังนั้นกระบวนการแยกตะกอนแขวนลอยในน้ำโดยใช้ฟองอากาศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่มีตะกอนจมตัวยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1 การประยุกต์ใช้ดีเอเอฟในการบำบัดน้ำ

ในกระบวนการบำบัดน้ำหรือผลิตน้ำดื่มจากดีเอเอฟ เริ่มต้นมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960s ในประเทศแถบสแกนดิเนเวียคือฟินแลนด์ สวีเดน และแอฟริกาใต้ [2] ในประเทศสหราชอาณาจักรมีรายงานการศึกษาดีเอเอฟในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับภาคสนามเมื่อต้นทศวรรษที่ 1970s และก่อสร้างโรงงานดีเอเอฟหลายแห่งในทศวรรษที่ 1980s [3] ส่วนในทวีปเอเชีย เช่น ในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน มีโรงบำบัดน้ำด้วยดีเอเอฟขนาด 500,000 m³/d ที่เมือง Tianjin [4] และในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตามรายงานมีการใช้ดีเอเอฟในการบำบัดน้ำในมาเลเซีย [5] ดีเอเอฟมีการสร้างอย่างมากในทวีปอเมริกาเหนือซึ่งเชื่อว่ามีมากกว่า 150 โรง [6] ในสหรัฐอเมริกาเริ่มต้นโดยบริษัท Krofta Engineering Corporation โดยเริ่มก่อสร้างในทศวรรษ 1980s และขยายเข้าสู่ประเทศแคนาดาในเวลาต่อมา ดีเอเอฟถูกใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำจัดสาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม เริ่มต้นตั้งแต่การพิจารณาสารเจือปนที่อยู่ในแหล่งน้ำ ถ้าแหล่งน้ำมีสารแขวนลอยต่ำ แต่มีสาหร่ายขนาดเล็กเจือปน ดีเอเอฟจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการตกตะกอน หรือการใช้กระบวนการกรอง หรือโดยส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกัน เช่น รูปที่ 1 เป็นกระบวนการที่ใช้สารรวมตะกอนในขั้นต้นก่อนการบำบัดขั้นต้น เพื่อก่อ



รูปที่ 1 กระบวนการดีเอเอฟแบบกระแสป้อนเวียนกลับ



รูปที่ 2 ถังลอยตะกอน

ตะกอนขนาดใหญ่และถูกกำจัดออกด้วยดีเอเอฟ ตามด้วยการกรองและการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ความดันที่ใช้ในดีเอเอฟมีค่า 4–6 barg และอัตราการป้อนเวียนกลับ (Recycle Ratio) 5–15 % [7] อัตราการป้อนเวียนกลับนิยามว่า คือ อัตราการไหลของน้ำจากถังอัดอากาศ (Air Saturator) ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้า (Influent) (รูปที่ 2 ประกอบ) และค่าอัตราการไหลล้นต่อพื้นที่หน้าตัด (Overflow Surface Loading Rate) นิยมเดินระบบที่ 5–15 m³/m²-h สำหรับอัตราการไหลต่ำและที่อัตราการไหลสูง (High Rate) ที่ 20–40 m³/m²-h [2]

2.2 การประยุกต์ใช้ดีเอเอฟในการบำบัดน้ำเสีย

ดีเอเอฟเริ่มใช้ในการบำบัดน้ำเสียตั้งแต่ทศวรรษ 1950s [8] ได้รายงานว่า การบำบัดน้ำเสียประเภทน้ำมัน และ คอลลอยด์สามารถใช้การลอยตะกอนได้ดี ซึ่งในเวลานั้น การลอยตะกอนมีการใช้ในการแยกสินแร่เป็นส่วนใหญ่ ดีเอเอฟเป็นเทคนิคหนึ่งของการลอยตะกอน สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่น โรงงานผลิตน้ำมันพืช โรงฆ่าสัตว์ อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียความดันที่ใช้มีค่าในย่าน

เดียวกันกับการใช้ดีเอเอฟบำบัดน้ำคือ 4–6 barg แต่ใช้อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S ratio) ร่วมกับอัตราการป้อนเวียนกลับ และ ค่าอัตราการไหลล้นต่อพื้นที่หน้าตัดจะต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 0.5–1.0 m³/m²-h [1] ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่นำมาบำบัดเป็นหลัก

3. คุณลักษณะที่สำคัญของระบบดีเอเอฟ

การลอยตะกอน (Flotation) คือการผลิตฟองก๊าซหรือฟองอากาศในน้ำแล้วเคลื่อนที่ขึ้นใต้น้ำจนเกาะกับฟองอากาศเรียกว่าอะโกลเมอเรท (Agglomerate) หรือ ฟลอค-ฟองอะกรีเกรท (Floc-bubble Aggregates) แล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะ ดังนี้

3.1 การผลิตฟองอากาศ

กลไกการผลิตฟองอากาศนี้ เกิดจากสภาวะอิมพัลย์ยวด ในขณะที่ลดความดัน [9] ซึ่งประกอบด้วย 2 กลไกย่อย คือการเกิดนิวเคลียสในระบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) โดยเริ่มเกิดนิวเคลียส (Nuclei) จากการเกิดคาวิเตชัน (Cavitation) และนิวเคลียสเริ่มขยายใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวของฟองข้างเคียง ขนาดของนิวเคลียสแสดงในเทอมเส้นผ่านศูนย์กลางฟองวิกฤติ (Critical Bubble Diameter, d_{cb}) แสดงตามสมการที่ (1) ซึ่งแปรผันตรงกับแรงตึงผิว (Surface Tension, σ) และแปรผกผันกับผลต่างความดัน (Pressure Difference, ΔP)

$$d_{cb} = 4\sigma/\Delta P \quad (1)$$

กลไกย่อยที่ 2 การเกิดนิวเคลียสในระบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) ซึ่งเกิดนิวเคลียสบนผิวของอนุภาคหรือวัตถุ เช่น หัวฉีด เป็นต้น โดยนิวเคลียสเริ่มขยายใหญ่ขึ้นจากการรวมตัวของฟองขนาดเล็กเช่นกัน ในดีเอเอฟพบว่ากลไกที่สองมีความสำคัญมาก ทำให้การออกแบบหัวฉีดรวมทั้งอุปรกรณ์ลดความดันเป็นจุดสนใจ [6] อนุรักษ์และคณะ [10], [11] ได้พัฒนาอุปรกรณ์ลดความดันขึ้น 2 แบบ โดยใช้หลักการลดความดันผ่าน

ออริฟิส (Orifice) และให้ของไหลไหลผ่านท่อกรวยกลม ผลการทดลองพบว่าได้ฟองอากาศที่มีการกระจายตัวแคบกว่าการใช้วาล์วเข็ม (Needle Valve) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการลดความดันของระบบบีโอดีเอฟ ฟองอากาศที่ผลิตขึ้นมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มความดันรวมที่ใช้ในการอัดอากาศ และผลต่อจำนวนฟองหรือแสดงในเทอมความเข้มข้นฟองมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันรวมที่ใช้ในการอัดอากาศ ขนาดของฟองอากาศที่ผลิตขึ้น พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อความดันรวมเปลี่ยนแปลงในช่วง 2–4 barg และถ้าความดันรวมที่มากกว่า 4 barg ขนาดของฟองอากาศมีขนาดลดลงไม่มากหรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการเดินระบบบีโอดีเอฟเชิงการค้าโดยทั่วไปจึงนิยมเลือกเดินระบบที่ความดันรวม 4–6 barg เนื่องจากการเดินระบบที่ความดันสูงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงมีความเข้มข้นของฟองอากาศมากกว่าที่ความดันต่ำ ดังนั้นการเดินระบบบีโอดีเอฟที่ความดันสูงกว่า 6 barg จึงเหมาะสมกับงานที่มีพื้นที่ติดตั้งจำกัด

3.2 การหาขนาดฟองอากาศ (Determination of Air-bubble Diameter)

ขนาดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของอากาศที่ละลายจนอิ่มตัวในน้ำขึ้นกับความดันรวมของระบบ ฟองอากาศที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่สัมผัสที่สูงกว่า เคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำช้ากว่าและมีความเข้มข้นของฟองที่มากกว่า ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับอนุภาคได้ดีกว่าเนื่องจากฟองอากาศที่ผลิตขึ้นมีขนาดเล็กจึงนิยมตั้งสมมติฐานว่ารูปร่างของฟองเป็นทรงกลมการวัดขนาดฟองอากาศสามารถใช้การวัดโดยตรงจากภาพถ่ายฟอง หรืออาจใช้เครื่องมือตรวจวัด เช่น เครื่องวัดขนาดด้วยเทคนิคเลเซอร์ตีฟแพรคชัน (Laser Diffraction) Couto และคณะ [12] การหาขนาดฟองก๊าซยังเป็นที่ถกเถียงกัน เนื่องจากการวัดจากภาพถ่ายนั้น มีข้อจำกัดเรื่องจำนวนฟองที่ตรวจวัดมีน้อยเกินไปในขณะที่

การใช้เครื่องมือตรวจวัดให้ค่าเฉลี่ยของขนาดฟองที่ต่างกัน เมื่อใช้สูตรคำนวณที่แตกต่างกัน เช่น การใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยให้ค่าที่ต่างจากการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชาวเทอร์ (Sauter Mean Diameter) และต่างจากการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยตามความสัมพันธ์พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamic Correlation) แสดงในสมการที่ (2) ซึ่งเทคนิคเลเซอร์ตีฟแพรคชันตามรายงานของ Couto and co-workers [12] ให้ข้อสรุปที่น่าสนใจ 3 ประการ คือ ประการแรก ขนาดฟองอากาศที่ความดัน 300–600 kPag ให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชาวเทอร์มากกว่าแบบความสัมพันธ์พลศาสตร์ของไหลเล็กน้อย ประการที่สอง เมื่อเทียบการวัดขนาดฟองโดยเทคนิคเลเซอร์ตีฟแพรคชันในช่วงความดัน 300–400 kPag ให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 32–40 μm ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการใช้เทคนิคถ่ายภาพให้ค่า 33–37.5 μm ประการที่สาม เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในน้ำเทคนิคเลเซอร์ตีฟแพรคชันยังคงใช้ได้ดีและพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวจะช่วยลดขนาดฟองลงอย่างมีนัยสำคัญ

$$d_b = \left[\frac{18\mu_L}{(\rho_L - \rho_G)g\varepsilon_L^{4.65}} \right]^{0.5} \quad (2)$$

โดย μ_L คือความหนืดของของเหลว ρ_L และ ρ_G คือความหนาแน่นของของเหลวและของก๊าซตามลำดับ ε_L คืออัตราส่วนปริมาตรของของเหลวสุดท้ายที่มีการขยายตัวต่อปริมาตรของเหลวเริ่มต้น

3.3 ปริมาณอากาศที่ละลาย

ปริมาณอากาศส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัดเนื่องจากปริมาณอากาศที่ละลายจนอิ่มตัวที่ความดันหนึ่งๆ เป็นปริมาณอากาศสูงสุดที่จะผลิตฟองขนาดเล็กเมื่อลดความดันลง ถ้าประสิทธิภาพการละลายของอากาศลดลงย่อมส่งผลต่อปริมาณฟองอากาศที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากอากาศจะละลายจนอิ่มตัวที่ความดันหนึ่งๆ การป้อนอากาศให้เกินจุดอิ่มตัวจึงถือเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งการป้อนอากาศที่มากเกินไปจนจุดอิ่มตัวยัง

เปิดโอกาสให้เกิดฟองอากาศที่ไม่ละลายในน้ำหลุดเข้าสู่ถังลอยตะกอน ฟองอากาศในส่วนนี้มักมีขนาดใหญ่มาก ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ดังนั้นปริมาณอากาศที่ละลายจึงควรมีค่าที่เหมาะสม

การละลายของอากาศในบรรยากาศ 1 atm สามารถคำนวณได้จากสมการตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) ซึ่งให้ค่าการละลายอิ่มตัวที่ 25°C มีค่าประมาณ 23 mg/kg (ค่าคงที่เฮนรีของออกซิเจนและไนโตรเจนเท่ากับ 756.7 atm/mol-L และ 1600 atm/mol-L ตามลำดับ) และเนื่องจากสัดส่วนความดันย่อยของไนโตรเจนในอากาศมีค่าประมาณ 0.79 ออกซิเจนมีค่าประมาณ 0.21 ทำให้ที่ความดัน 1 บรรยากาศไนโตรเจนจึงละลายได้มากกว่าออกซิเจน แต่ถ้าเปรียบเทียบที่สัดส่วนความดันย่อยเท่ากันแล้วออกซิเจนจะละลายน้ำได้ดีกว่าไนโตรเจน ซึ่งค่าการละลายที่ต่างกันนี้เป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลให้การเดินระบบดีเอเอฟแบบต่อเนื่องชนิดให้ความดันแบบกระแสนวนเวียนกลับ (Continuous Recycled Stream Pressurization) [13] โดยที่สภาวะคงตัวจะให้ค่าการละลายของไนโตรเจนต่างจากในช่วงแรก เนื่องจากสัดส่วนโมล (ความดันย่อย) ของอากาศจะเปลี่ยนแปลงไปจากสัดส่วนโมลของไนโตรเจนในบรรยากาศ โดยรายงานของ Edzwald [6] ระบุว่าสัดส่วนของไนโตรเจนอาจสูงถึงร้อยละ 85 (จากร้อยละ 79) ทำให้ประสิทธิภาพของถังอัดอากาศที่สภาวะคงตัวลดลงเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นเดินระบบ เมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นเป็น 4 barg ค่าการละลายของอากาศที่สมดุลมีค่าประมาณ 114 mg/kg [14] และที่อุณหภูมิ 5°C ความดัน 1 บรรยากาศ ค่าการละลายมีค่าประมาณ 32 mg/kg พบว่าปริมาณอากาศที่ละลายลงในน้ำบริสุทธิ์ส่งผลต่อความเข้มข้นของฟองในดีเอเอฟโดยมีปัจจัยขึ้นกับอุณหภูมิ น้ำ ความดัน และประสิทธิภาพของถังอัดอากาศ

ถังอัดอากาศที่ใช้ในดีเอเอฟนิยมสร้างเป็นถังทรงกระบอก แคปซูล หรือท่อที่ขุดไปมา เพื่อหน่วงเวลาให้น้ำสัมผัสกับอากาศ โดยทั่วไปมักออกแบบให้มีอัตราการระเหยของเหลวต่อพื้นที่หน้าตัด 10–15 kg/m²-s [6] โดยมีเวลากัก 5–15 นาที ภายในถังอาจมีแพ็คกิ้ง หรือไม่มีก็ได้แต่เนื่องจาก

ถังอัดอากาศที่มีแพ็คกิ้งให้ประสิทธิภาพการละลายที่สูงกว่า จึงได้รับความนิยมมากกว่า

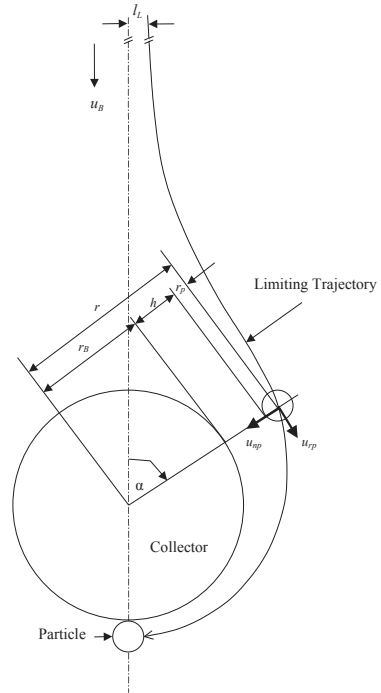
ฟองอากาศที่ผลิตได้จะเคลื่อนที่สัมผัสกับสารแขวนลอยก่อนเข้าถึงถังลอยตะกอน เพื่อให้เป่ามีขนาดใหญ่ขึ้น สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กต้องทำให้รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นการเติมสารรวมตะกอนเพื่อทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคตามด้วยการรวมตะกอน (Flocculation) จึงเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการลอยตะกอน สารรวมตะกอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสียได้แก่ สารส้ม (Alum) เพอร์ริคคลอไรด์ (Ferric Chloride, FeCl₃) และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น ในถังลอยตะกอนได้รับการออกแบบให้ประกอบด้วย โชนผสม หรือบางครั้งเรียกว่า โชนสัมผัส และ โชนแยกตัว (ดูรูปที่ 2 ประกอบ) เมื่ออากาศและสารแขวนลอยไหลเข้ามาจึงเกิดการสัมผัสกันในโชนผสม เพื่อเพิ่มโอกาสให้ฟองอากาศเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนเกิดการสัมผัสกับสารแขวนลอยและการเกาะติดกันของฟองอากาศกับอนุภาคสารแขวนลอยซึ่งเรียกว่า ฟล็อก-ฟอง อะกรีเกรท ดังนั้น โชนผสมจึงมักออกแบบให้มีปริมาตรร้อยละ 10–20 ของปริมาตรถังลอยตะกอนและมีเวลาสัมผัสสั้น โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 10 วินาที ถึง 2 นาที ส่วนฟองอากาศและสารแขวนลอยที่ไม่ได้สัมผัสกันจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันเข้าสู่โชนแยกตัว ฟล็อก-ฟอง อะกรีเกรท และฟองอากาศอิสระจะเคลื่อนที่ขึ้นในโชนแยกตัว ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและไม่ได้รวมตัวกับฟองอากาศจะเคลื่อนที่ขึ้นตามกระแสน้ำ ส่วนของตะกอนขนาดใหญ่จะตกตะกอนลงด้านล่างของถังลอยตะกอน ดังนั้นในการออกแบบถังลอยตะกอนจึงนิยมสร้างแบบพื้นด้านล่างเอียงทำมุมเพื่อรวบรวมตะกอนหนักและระบายออกจากถังลอยตะกอน

3.4 แรงกระทำของดีเอเอฟในโชนสัมผัส

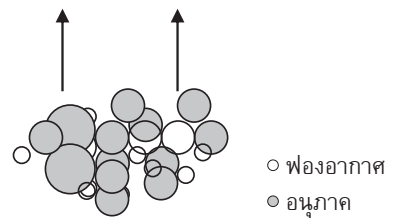
ในโชนสัมผัสฟองอากาศและตะกอนจะเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนแรงกระทำระหว่างฟองอากาศกับตะกอนประกอบด้วยแรงหลัก 2 แรง คือ แรงไฮโดรไดนามิกส์ และแรงพื้นผิว แรงไฮโดรไดนามิกส์ เกิดจากการเคลื่อนที่

ของฟองอากาศขึ้นสู่น้ำ ในขณะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่จะเกิดการชนเป้า ซึ่งคืออนุภาคหรือฟลอคที่เกิดจากการรวมตัว ถ้าเป้าหมายอยู่ในรัศมีการชนจึงมีโอกาสที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ชนแต่ถ้าเป้าหมายอยู่ห่างออกไปการรวมตัวเป็นฟลอค-ฟองอะกรีเกรทจะน้อยลงหรือไม่เกิดขึ้น ส่วนแรงพื้นผิวประกอบด้วยแรงลอนดอน-แวนเดอร์วาล (London-vander Waals Forces) แรงอิเล็กโตรสแตติก และแรงไฮโดรโฟบิก ในขณะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ขึ้นน้ำที่อยู่ด้านบนของฟองจะถูกบีบอัดให้เคลื่อนที่ไปด้านข้างไปตามผิวสัมผัสฟองไปสู่ด้านล่างของฟอง ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 กรณีคือเป้าหมายมีขนาดเล็กหรือใกล้เคียงกับฟองและในอีกกรณีคือเป้าหมายเป็นฟลอคที่มีขนาดใหญ่กว่าฟองมาก ถ้าเป้าหมายมีขนาดเล็กอนุภาคหรือฟลอคที่อยู่บริเวณด้านบนของฟองในแนวแกนที่ฟองสามารถเคลื่อนที่ชนได้จะเคลื่อนที่ตามทิศทางของน้ำที่ถูกบีบอัด เป้าหมายจึงเคลื่อนออกด้านข้างและสัมผัสกับฟองที่บริเวณด้านล่างของฟอง แสดงตามรูปที่ 3 ถ้าผลลัพธ์ของแรงพื้นผิวเป็นแรงดึงดูด เป้าหมายจะถูกดึงดูดให้ออกจากกระแสการไหล และยึดติดกับฟองและอยู่ใต้ฟองในขณะที่ฟองเคลื่อนที่ขึ้น ส่วนในกรณีที่เป้าหมายมีขนาดใหญ่ฟองที่มีขนาดเล็กจะให้ผลของแรงผลักไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic Repulsion Forces) ต่ำกว่าแรงดึงดูดฟองจะเกาะติดและกระจายในฟลอคคล้ายกับฟลอคทำหน้าที่เมทริกซ์ ยึดฟองอากาศหลายๆ ฟองเข้าด้วยกัน ถ้าแรงลอยตัวสุทธิมากกว่าแรงโน้มถ่วงฟลอคจะลอยสู่น้ำ แสดงตามรูปที่ 4 [15]

แรงพื้นผิวเป็นแรงที่เกิดจากการกระทำของแรงระหว่างฟอง-ฟองหรืออนุภาค-อนุภาคหรืออนุภาค-ฟอง (อนุภาคในที่นี้รวมถึงฟลอคด้วย) แรงพื้นผิวเป็นพันธะทุติยภูมิ เกิดระหว่างพื้นผิวของวัตถุ (ทั้งอนุภาคและฟอง) โดยทั่วไปเรียกรวมๆ ว่าแรงลอนดอน-แวนเดอร์วาลเป็นแรงดึงดูดซึ่งมีผลให้วัตถุเข้าใกล้กัน ถ้าเป็นฟองอากาศซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แรงกระทำคือไดโพลเหนี่ยวนำชั่วคราว หรือเรียกอีกอย่างว่า London-dispersion ถ้าเป็นอนุภาค อาจเกิดแรงไดโพลถาวร แรงไดโพลเหนี่ยวนำ และ



รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและสัมผัสกับฟองอากาศบริเวณด้านล่างของฟอง



รูปที่ 4 ฟองอากาศรวมตัวกับฟลอคขนาดใหญ่

แรงไดโพลเหนี่ยวนำชั่วคราว

แรงพื้นผิวเทอมที่สองคือแรงอิเล็กโตรสแตติกส่วนใหญ่เป็นแรงผลัก เกิดขึ้นจากประจุที่ผิวอนุภาคซึ่งมีประจุเหมือนกัน โดยที่ประจุที่ผิวของอนุภาคแสดงในเทอมของศักย์ซีตา (Zeta Potentials) ถ้ามีค่ามากแรงอิเล็กโตรสแตติกจะมีค่ามากตาม การตรวจวัดศักย์ซีตาของฟองมีรายงานตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970s [16], [17]

งานในยุคแรกๆ ใช้เซลล์ไฟฟ้า ผลิตฟองและตรวจวัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส (Electrophoresis) ต่อมาจึง

มีนักวิจัยทำการตรวจวัดศักย์ซีต้าของฟองอากาศ [18]–[20] ซึ่งงานในช่วงแรกนักวิจัยจะเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลายเพื่อให้ฟองอากาศมีความเสถียร พบว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อศักย์ซีต้ามาก ถ้าใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) จะส่งผลให้ศักย์ซีต้าเป็นประจุบวกและในทางตรงข้ามถ้าใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic Surfactant) ให้ศักย์ซีต้าเป็นประจุลบตาม ส่วนถ้าใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant) ให้ผลทั้งบวกและลบขึ้นกับชนิดของสารลดแรงตึงผิวและสภาวะในการตรวจวัดเช่น พีเอชในขณะตรวจวัด เป็นต้นตามรายงานพบว่าฟองอากาศในน้ำกลั่นที่ไม่เติมสารเคมีใดๆ ให้ค่าศักย์ซีต้าประจุลบในช่วงพีเอช 2–12 โดยช่วงพีเอช 7–8 ให้ค่าประจุลบต่ำสุดในช่วง -25mV ถึง -50mV [21] เหตุผลที่ฟองอากาศในน้ำกลั่นให้ประจุลบ อาจเกิดจากฟองอากาศที่ไม่มีประจุ (Non Polar) ถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุลบซึ่งมีขนาดเล็กกว่าประจุบวกของไฮเดรทไฮออนประจุบวก (Hydrated Cations) เช่น ที่สมมูลของน้ำกลั่นที่อ้อมตัวด้วยอากาศ อาจเกิด HCO_3^- ซึ่งมีขนาดประมาณ 4 \AA ขณะที่ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) มีขนาดประมาณ 9 \AA [6] ประจุลบรอบๆ พื้นผิวของฟองอากาศจึงมีความหนาแน่นของประจุลบที่สูงกว่าประจุบวกทำให้ศักย์ซีต้าของฟองอากาศในน้ำกลั่นแสดงค่าติดลบ ส่วนศักย์ซีต้าของอนุภาคขึ้นกับชนิดของสารและสภาวะในสารละลาย ถ้ามีการเติมสารรวมตะกอน ศักย์ซีต้าของตะกอนจะมีค่าต่ำ (อาจเป็นทั้งประจุบวกหรือประจุลบ) เนื่องจากการเติมสารรวมตะกอนจะช่วยลดแรงผลักรจากประจุที่เหมือนกันทำให้ตะกอนรวมตัวกัน

แรงพื้นผิวตัวสุดท้ายคือแรงไฮโดรโฟบิก ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระยะทางไกล จุดกำเนิดของแรงไฮโดรโฟบิกนี้ยังไม่แน่ชัดแต่เชื่อว่าเกิดจากการเติมสารลดแรงตึงผิว [22] หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลกอฮอล์ การค้นพบแรงนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาเครื่องมือวัดแรงพื้นผิวโดยตรง (Direct Surface Force Measurements) ในทศวรรษ 1980s พบว่าเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลาย [23] โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการ

ดูดซับบนผิวอนุภาคและส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค-อนุภาค โดยอิทธิพลของแรงนี้มีระยะใกล้หรือไกลขึ้นกับสารลดแรงตึงผิวที่เติม โดยระยะห่างของแรงมีค่าอยู่ในช่วง $0-15 \text{ nm}$ [22] แรงไฮโดรโฟบิกสามารถเกิดระหว่างพื้นผิวที่ต่างกัน เช่นพื้นผิวของอนุภาคกับฟองอากาศโดยเฉพาะระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสมบัติของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยส่วนหัวที่มีขั้ว กับส่วนหางที่ไม่มีขั้วทำให้เกิดกลไกการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของสาร ในระบบดีเอเอฟที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจึงเกิดแรงไฮโดรโฟบิกขึ้นเช่นกัน

3.5 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของดีเอเอฟ

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของดีเอเอฟในยุคแรกๆ นั้น อัตรารวมกันของอนุภาคกับฟองคำนวณจากโอกาสในการเกาะติด (Probability of Adhesion) และโอกาสในการหลุดจากการเกาะติด (Probability of Detachment) ซึ่งประสิทธิภาพของการชนแสดงในรูปสมการเอมไพริคอล (Empirical Equation) จากผลการทดลอง โดยให้แนวคิดเรื่องการชนกันจะเกิดขึ้นได้เมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคกับฟองต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีวิกฤติ (Critical Radius) จากนั้น Reay และ Ratcliff, [24] ได้นำแนวคิดมาปรับปรุงโดยเพิ่มเทอมประสิทธิภาพการยึดเกาะ และปรับปรุงรายละเอียดของสมการเอมไพริคอลในการหาค่าประสิทธิภาพการชนและการยึดเกาะ ระยะเวลาต่อมาเริ่มมีแนวคิดในการหาอัตราการกำจัดอนุภาค (Rate of Particle Removal) โดย Collins และคณะ [16] เสนอว่าอัตราการกำจัดอนุภาคแปรตามความเข้มข้นอนุภาคอันดับหนึ่ง และในแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ เริ่มเสนอแรงพื้นผิวในแบบจำลอง โดยอิเล็กโตรโมบิลิตี (Electromobilities) (หรือก็คือศักย์ซีต้า) ของทั้งอนุภาคและฟองถูกเชื่อมโยงผ่านค่าคงที่อัตรา

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของดีเอเอฟในยุคที่สองเป็นการชนเชิงเดี่ยว ที่มีการพิจารณาแรงไฮโดรไดนามิกส์ กล่าวคือพิจารณาอนุภาค 1 อนุภาคเคลื่อนที่ชนกับฟอง 1 ฟอง ซึ่ง Ward [25] เสนอว่าประสิทธิภาพในการชนเชิง

เดี่ยวรวม (Total Single-collector Collision Efficiency, η_T) ประกอบด้วยผลรวมของ ประสิทธิภาพการแพร่ บราวเนียน (Brownian Diffusion Efficiency, η_D) ประสิทธิภาพอินเตอร์เซพ (Interception Efficiency, η_I) และประสิทธิภาพจากแรงโน้มถ่วง (Efficiency of the Gravity Force, η_G) ตามสมการที่ (3)–(6)

$$\eta_T = \eta_d + \eta_i + \eta_g \quad (3)$$

$$\eta_d = 6.18 \left(\frac{k_B T}{g \rho_w} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{d_p} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (4)$$

$$\eta_i = 3/2 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (5)$$

$$\eta_g = \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (6)$$

โดย k_B คือค่าคงที่โบลทซ์แมน (Boltzmann Constant), ρ_w คือความหนาแน่นน้ำและ ρ_p คือความหนาแน่นอนุภาค d_p และ d_b คือเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคและฟองอากาศตามลำดับ

แบบจำลองการชนเชิงเดี่ยวไม่ได้กล่าวถึงแรงพื้นผิว ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการเกาะติดระหว่างอนุภาคกับฟอง ดังนั้นในช่วงเวลาใกล้เคียงกันจึงมีนักวิจัยอีกกลุ่มเสนอแนวคิดเรื่องแรงพื้นผิวและแรงไฮโดรไดนามิกส์ [26]–[28] อย่างไรก็ตามแบบจำลองในช่วงนี้ยังไม่มีความชัดเจนของแรงไฮโดรโฟบิก เนื่องจากดีเอเอฟที่ใช้ในงานในยุคต้นมีการเติมสารรวมตะกอนประเภทสารอนินทรีย์เช่น สารส้มในการก่ตะกอนทำให้แรงไฮโดรโฟบิกไม่ค่อยมีอิทธิพลมากต่อแรงพื้นผิว และในที่นี้จะขอแนะนำเสนอเฉพาะแบบจำลองของ Okada และคณะ [26] เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ใช้ทฤษฎีพื้นฐานมากกว่าการใช้สมการเอมไพริคอล โดยแบบจำลองนี้มีข้อสมมติฐานดังนี้ อนุภาคเล็กมากเมื่อเทียบกับฟองและทั้งอนุภาคและฟองมีรูปร่างทรงกลม การเคลื่อนที่ของฟองสามารถใช้สมการตามกฎของสโตก

(Stokes' Law) และแรงบาวเนียนมีค่าน้อยมากโดยแบบจำลองนี้เรียกว่า แบบจำลองทราเจกโทรี (Trajectory Model)

แบบจำลองของการชนกันของฟองอากาศกับอนุภาคอธิบายถึงทางเดินของอนุภาครอบฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้น (Around Rising an Air Bubble) ตามรูปที่ 3 โดย l_L คือแนวเส้นทางเดินจำกัด (Limiting Trajectory) h คือระยะห่างของอนุภาคกับฟอง r_B และ r_p คือรัศมีของฟองและอนุภาค และ α คือมุมที่อนุภาคทำกับฟอง (วัดจากจุดศูนย์กลางของอนุภาคและฟอง) ถ้าแรงพื้นผิวสุทธิเป็นแรงดึงดูด อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าในแนวเส้นทางเดินจำกัดจะถูกดูดเข้าหาฟองหรืออธิบายว่าอนุภาคที่อยู่ในแนวเส้นทางเดินจำกัดคือระยะที่ไกลที่สุด (วัดจากแนวแกน) ที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ชนกับฟอง ถ้าแรงพื้นผิวสุทธิเป็นแรงผลักรอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหาฟองจะผลักรออกจากพื้นผิวฟองไม่แสดงค่าของเส้นทางเดินจำกัดหรืออธิบายว่าอนุภาคกับฟองไม่เกาะติดกัน ดังนั้นความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่ในทิศปกติ (Normal Direction, u_{np}) และทิศสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Direction, u_{tp}) แสดงตามสมการที่ (7), (8)

$$u_{np} = r_p \frac{dH}{dt} = \frac{F_t f_1}{6\pi\mu r_p} \quad (7)$$

$$u_{tp} = r_p \frac{da}{dt} = u a f_3 \quad (8)$$

โดย $H = h/r_p$, f_1 และ f_3 คือฟังก์ชันนิเวอแซลของอนุภาคในทิศปกติและทิศสัมผัสตามลำดับ $R = r_p/r_B$ และ F_t คือแรงรวมทั้งหมดที่ไม่รวมแรงไฮโดรโฟบิก แสดงตามสมการที่ (9)

$$F_t = F_e + F_v + F_n \quad (9)$$

โดย F_e คือแรงอิเล็กโตรสแตติกระหว่างฟองกับอนุภาค F_v คือแรงแวนเดอวาล์วระหว่างฟองกับอนุภาค และ F_n คือแรงในทิศปกติของแรงไฮโดรไดนามิกส์ที่ฟองกระทำกับอนุภาค

จากการพิจารณาอนุภาคทรงกลมกระแสการไหลของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมในทิศปกติแสดงได้ตามสมการที่ (10) และ (11) สำหรับความเร็วและแรงในทิศปกติตามลำดับ

$$u_n = -\frac{1}{r^2 \sin \alpha} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} = -\frac{3R^2(H+1)^2 u_B \cos \alpha}{2(1+HR+R)^2} \quad (10)$$

$$F_n = -\frac{3R^2(H+1)^2}{2(1+HR+R)^2} 6\pi r_p u_B f_2 \cos \alpha \quad (11)$$

เมื่อแทนสมการแสดงแรงพื้นผิวและแรงไฮโดรไดนามิกส์จะได้สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาครอบฟองดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dH}{d\alpha} &= \frac{F_i f_1}{6\pi \mu r_p^2} \\ &= \frac{f_1}{6\pi \mu r_p^2} \left\{ -\frac{A_H}{6r_p H^2} + \pi \epsilon r_p \kappa \zeta_p \zeta_b \left[\frac{4 \exp(-\kappa r_p H)}{1 + \exp(-\kappa r_p H)} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{3R^2(H+1)^2}{2(1+HR+R)^2} 6\pi \mu r_p u_B f_2 \cos \alpha \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

สมการของกระแสการไหลของของไหลรอบฟอง แสดงความเร็วในทิศสัมผัส (Tangential Velocity, $u\alpha$) ดังนี้

$$u\alpha = \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{3R(H+1)u_B \sin \alpha}{2(1+HR+R)} \quad (13)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3R(H+1)u_B f_3 \sin \alpha}{2r_b(1+HR+R)^2} \quad (14)$$

เมื่อรวมสมการที่ (12) และ (13) เข้าด้วยกันจะได้สมการการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของฟองกับอนุภาคกับมุม α

$$\begin{aligned} \frac{dH}{d\alpha} &= \frac{f_1}{6\pi \mu r_p^2} \frac{2(1+HR+R)^2}{3R^2(H+1)u_B f_3 \sin \alpha} \\ &\quad \left\{ -\frac{A_H}{6r_p H^2} + \pi \epsilon r_p \kappa \zeta_p \zeta_b \left[\frac{4 \exp(-\kappa r_p H)}{1 + \exp(-\kappa r_p H)} \right] \right. \end{aligned}$$

$$\left. - \frac{3R^2(H+1)^2}{2(1+HR+R)^2} 6\pi \mu r_p u_B f_2 \cos \alpha \right\} \quad (15)$$

ในการแก้สมการเพื่อหาเส้นทางเดินจำกัด l_L อาจใช้วิธีนิวเมอริคัล จากนั้นนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคต่อจำนวนฟอง (Particle Capture Efficiency Per Bubble, η_{tc}) ตามสมการที่ (16)

$$\eta_{tc} = (l_L/r_B)^2 \quad (16)$$

ตามที่กล่าวในข้างต้น แรงพื้นผิวไฮโดรโฟบิกเป็นแรงที่มีอิทธิพลเมื่อมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในสารละลาย ในดีเอเอฟที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวหรือโปรตีนและไขมันตามธรรมชาติที่เจือปนในน้ำ หรือการใช้สารรวมตะกอนกลุ่มพอลิเมอร์มีโอกาที่แรงไฮโดรโฟบิกเริ่มส่งอิทธิพล ดังนั้นในสมการที่ (9) ควรเพิ่มเทอมของแรงไฮโดรโฟบิกแสดงตามสมการที่ (17)

$$\frac{F_h}{R} = C_1 \exp \left\{ -\frac{H}{D_1} \right\} \quad (17)$$

โดย C_1 และ D_1 คือค่าคงที่ของสมการแรงไฮโดรโฟบิก ในปัจจุบันการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดีเอเอฟ นอกจากอาศัยการทดลองแล้ว การใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เข้ามาศึกษาโครงสร้างการไหลของของไหลในถังลอยตะกอนช่วยทำให้การออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เทคนิคที่ได้รับความนิยมคือ การคำนวณพลศาสตร์ของไหล(ซีเอฟดี)(Computational Fluid Dynamics, CFD) [29] ใช้ซีเอฟดีทำนายโซนการไหล (Flow Zone) และโซนมุมอับ ในถังลอยตะกอน อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและการเพิ่มอัตราการป้อนเวียนกลับทำให้ลดโซนมุมอับลง แต่กลับเพิ่มอัตราเฉือน (Shear Rate) ให้กับฟล็อก-ฟองอากาศอะกรีเกรท ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของดีเอเอฟในการกำจัดตะกอนลดลง ดังนั้นในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในระยะหลังจึงเริ่มศึกษาถึงความแข็งแรงของฟล็อก (Floc Strength) และความแข็งแรง



ของฟล็อก-ฟองอะกรีเกรท โดยรวมเทอมของแรงเฉือนที่ส่งผลต่อการแตกของตะกอนเข้าในการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนขึ้น

4. สรุป

ดีเอเอฟเป็นกระบวนการแยกหยดน้ำมันหรืออนุภาคแขวนลอย โดยการใช้ฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งผลิตจากการลดความดันของอากาศที่ความดันสูงลงสู่ความดันบรรยากาศ กลไกสำคัญของการผลิตฟองเกิดจากการละลายอิมิตวียิงยวดและการเกิดคาวิตีชันในขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงความดัน ฟองอากาศที่ผลิตมีขนาดในช่วง 40–100 ไมครอน ในการออกแบบกระบวนการดีเอเอฟโดยทั่วไปประกอบด้วยการเติมสารรวมตะกอนในน้ำหรือน้ำเสียตามด้วยการก่อตะกอน เมื่อตะกอนแขวนลอยไหลเข้าผสมกับฟองอากาศที่ผลิตขึ้นในถังรวมตะกอน (บางระบบจะผสมก่อนเข้าถังลอยตะกอน) โดยมีขั้นตอนสำคัญ 2 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในถังลอยตะกอนคือการสัมผัสระหว่างฟองกับอนุภาคหรือฟล็อกและการแยกตัวของฟองอากาศ-ฟล็อก แอกรีเกรท จากนั้นในถังลอยตะกอนขั้นตอนการชนกันหรือสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศกับตะกอนเป็นปัจจัยสำคัญของการแยกสารแขวนลอยในน้ำ ดังนั้นแบบจำลองการชนของฟองกับอนุภาคจึงถูกนำเสนอในงานวิจัยขึ้นหลายกลุ่ม เริ่มต้นเป็นแบบจำลองอย่างง่ายขึ้นกับผลการทดลองตามสมการเอมไพริคอลและพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามของไหลที่ไหลรอบฟองอากาศทรงกลมหรือแรงไฮโดรไดนามิกส์โดยพิจารณาพร้อมกับแรงพื้นผิวที่ประกอบด้วยแรงอเล็กโตรสแตติก แรงแวนเดอร์วาล และแรงไฮโดรโฟบิก อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นยังมีความซับซ้อนและมีข้อจำกัดในการใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่ยังคงใช้ประโยชน์ในการอธิบายผลการทดลองที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง ในปัจจุบันนี้ดีเอเอฟได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งการบำบัดน้ำและน้ำเสียอย่างแพร่หลาย โดยอาจติดตั้งเป็นระบบแยกตะกอนขั้นต้นหรือเป็นระบบแยกตะกอนหลักอย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Metcalf and H. P. Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2004.
- [2] J. K. Edzwald, “Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment,” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 56, no. 6, pp. 399–409, 2007.
- [3] R. Gregory, “Summary of general developments in DAF for water treatment since 1976,” in *Proceedings Dissolved Air Flotation Conference*, The Chartered Institution of Water and Environmental Management, London, 1997, pp. 1–8.
- [4] Tianjin Water Works Company (2016, June 23). *Tianjin Jie Yuan Water Treatment Plant, Tianjin, China* [online]. Available: <http://www.water-technology.net/projects/tianjinjieyuan/>
- [5] A. H. Sharaai, N. Z. Mahmood, and A. H. Sulaiman, “Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of potable water production in Malaysia: A comparison among different technology used in water treatment plant,” *Environment Asia*, vol. 3, no. 1, pp. 95–102, 2010.
- [6] J. K. Edzwald, “Dissolved air flotation and me,” *Water Research*, vol. 44, pp. 2077–2106, 2010.
- [7] J. P. Malley and J. K. Edzwald, “Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters,” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 40, no. 1, pp. 7–17, 1991.
- [8] R. W. Hess, “Sewage and industrial wastes,” *Water Environment Federation*, vol. 25, no. 6, pp. 706–728, 1953.



- [9] L. V. Bravina and E. E. Zabrodin, "Aspects of the bubble nucleation in a first order phase transition," *Physics Letters A*, vol. 202, pp. 61–67, 1995.
- [10] A. Petiraksakul, T. Kimsom, and P. Chanyaem "Air bubble generator from pressure reduction of water saturated with air," Thai petty Patent 8386, Oct 3, 2013.
- [11] A. Petiraksakul, J. Watakoonsin, P. Chanyaem, and P. Choorut "Air bubble generator from pressure reduction of water saturated with air using force balance technique," Thai petty Patent 8423, Oct 17, 2013.
- [12] H. J. B. Couto, D. G. Nunes, R. Neumann, and S. C. A. Franca, "Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique," *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 330–335, 2009.
- [13] A. Petiraksakul "Dissolved air flotation," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 5, no 6, pp. 39–45, 1995.
- [14] The engineering toolbox (2016, June 23). [online]. Available : http://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html.
- [15] A. Petiraksakul and P. Worathanakul, *Environmental Technology*, KMUTNB Textbook Publishing Center, Bangkok, 2014.
- [16] G. L. Collins, M. Motarjemi, and G. J. Jameson, "A method for measuring the charge on small gas bubbles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 63, no.1, pp. 69–75, 1978.
- [17] Y. Fukui and S. Yuu, "Measurement of the charge on small gas bubble," *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 28, no. 5, pp. 866–868, 1982.
- [18] K. Kubota, S. Hayashi, and M. Inaoka, "Convenient experiment method for measurement of zeta potentials generating on the bubble suspended in aqueous surfactant solutions," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 95, no. 2, pp. 362–369, 1983.
- [19] R. H. Yoon and J. L. Yordan, "Zeta-potential measurements on microbubbles generated using various surfactants," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 113, no. 2, pp. 430–438, 1986.
- [20] K. Okada and Y. Akagi, "Method and apparatus to measure the zeta-potential of bubbles," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 20, no. 1, pp. 11–15, 1987.
- [21] H. Mooyoung and D. Seok, "Zeta potential measurement of bubbles in DAF process and its effect on the removal efficiency," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 461–466, 1998.
- [22] R. H. Yoon and S. A. Ravishankar, "Long-range hydrophobic forces between mica surfaces in dodecylammonium chloride solutions in the presence of dodecanol," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 179, pp. 391–402, 1996.
- [23] J. N. Israelachvili and R. M. Pashley, "Measurement of the hydrophobic interaction between two hydrophobic surfaces in aqueous electrolyte solutions," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 98, no. 2, pp. 500–514, 1984.
- [24] D. Reay and A. Ratcliff, "Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 51, pp. 178–185, 1973.



- [25] A. S. Ward, "Dissolved air flotation for water and wastewater treatment," *Transactions of the Institution of Chemical Engineers Journal*, vol. 70, pp. 214–218, 1992.
- [26] K. Okada, Y. Akagi, M. Kogure, and N. Yoshioka, "Analysis of particle trajectories of small particles in flotation when the particles and bubbles are both charged," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 68, pp. 614–621, 1990.
- [27] R. H. Yoon and L. Mao, "Application of extended DLVO theory IV," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 181, pp. 613–626, 1996.
- [28] G. H. Luttrell and R. H. Yoon, "A hydrodynamic model for bubble-particle attachment," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 154, no. 1, pp. 129–137, 1992.
- [29] J. Behin and S. Bahrami, "Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 59, pp. 1–8, 2012.