Executive Summary

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการแยกแบบทำให้ลอย และหาทางประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตของงาน ในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาการเกิดไมโครอีมัลชันของน้ำมันต่างๆ ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันตัดหล่อเย็น และน้ำมันเครื่องยนต์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวผสมและสารลดแรงตึงผิวชนิดยืด (Extended surfactant) จากนั้นเป็นขั้นตอนการทดลองระบบแยกแบบทำให้ลอย (Froth Flotation) เพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำ โดยได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคน้ำและน้ำมันต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดของฟองอากาศในถังทำให้ลอยกับประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และผลของการมีตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ทำให้ลอย

ในส่วนการทดลองระบบทำให้ลอยแบบกะ พบว่าประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลจากน้ำ ขึ้นกับความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นเกลือที่เติม อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ และความเร็วของฟองอากาศ โดยผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันขึ้นกับ 2 ปัจจัยหลักได้แก่ ค่าIFT จะต้องต่ำและลักษณะฟองต้องมีความเสถียรสูงด้วย ในส่วนของการทดลองระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวแบบยืด มีค่าเท่ากับ 0.08% (CμC)ที่ความเข้มข้นเกลือ 4% ในการทำให้เกิดไมโครอีมัลชันแบบWinsor Type III ในส่วนของการทดลองระบบทำให้ลอย พบว่าจำเป็นต้องเติมสารลดแรงตึงผิว โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต(SDS) เพื่อทำให้ฟองมีความเสถียรเพียงพอสามารถลอยออกจากคอลัมน์ได้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมระบบสามารถแยกน้ำมันได้สูงสุด 96% ในส่วนของการทดลองนำเทคนิค Colloidal Gas Aphron (CGA) มาร่วมใช้ในระบบทำให้ลอย ในการทดลองนี้ได้ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดยืด พบว่า สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 0.1% ความเข้มข้นเกลือ 0.3% ความเร็วรอบ 5,000 rpm และเวลาในการกวน 5 นาที สามารถแยกน้ำมันเครื่องได้สูงสุด 97% ในส่วนของการทดลองระบบทำให้ลอยต่อเนื่องเพื่อแยกน้ำมันตัดหล่อเย็น สภาวะที่เหมาะสมของระบบทำให้ลอยต่อเนื่อง ได้แก่ ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวแบบยืดเท่ากับ 0.3% ความเข้มข้นเกลือ 10% อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.3 l/min ความสูงของฟองเท่ากับ 31 cm และเวลาเก็บกักเท่ากับ 20 นาที ระบบมีประสิทธิภาพแยกน้ำมันได้สูงสุด 83% ในส่วนการทดลองผลของการเติมตัวกลาง (Packing media) ในคอลัมน์ทำให้ลอย โดยพบว่าการเติมตัวกลางในสัดส่วน 50% ของคอลัมน์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตัดหล่อเย็นสูงสุด 98.1%

นอกจากนี้ยังนำองค์ความรู้ทางด้านระบบทำให้ลอยไปประยุกต์ใช้ด้านอื่นๆ ได้แก่การแยกสารลดแรงตึงผิวกลับมาใช้ใหม่ การแยกอนุภาคของแข็งที่ความแตกต่างความชอบน้ำ(Hydrophilicity) /ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ออกจากกัน การทำให้Carbon Nanotube ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์และความเข้มข้นสูงขึ้น และการทำให้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์และความเข้มข้นสูงขึ้น

1. วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

- ศึกษาแผนภาพไมโครอีมัลชันของน้ำมันต่างๆ ได้แก่น้ำมันดีเซล น้ำมันตัดหล่อเย็น และน้ำมันเครื่องยนต์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวผสมและสารลดแรงตึงผิวชนิดยืด (Extended surfactant)
- ศึกษาปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการควบคุมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบแยกแบบทำให้ลอย
- หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคน้ำกับน้ำมันและลักษณะของฟองต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบทำให้ลอย
- ศึกษาผลการเติมสารลดแรงตึงผิวต่อขนาดและความเร็วของฟองอากาศในคอลัมน์ทำให้ลอย
- พัฒนาระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องโดยมีตัวกลางบรรจุ (Packing media) และระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องหลายขั้นตอน

2. เนื้อหางานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยได้เริ่มต้นเป็นการทดลองแบบกะ (Batch) และต่อมาได้ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมต่อไป โดยเนื้อหางานวิจัยแบ่งเป็นหัวข้อย่อยสามารถ สรุปได้ดังนี้

2.1 <u>การทดลองแยกน้ำมันดีเซลโดยระบบทำให้ลอยแบบกะ</u>

งานวิจัยนี้ได้ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดยืด (Extended surfactant) คือ Branched alcohol propoxylate sulfate sodium salt ซึ่งมีจำนวนคาร์บอน 14 ถึง 15 และมี PO group เท่ากับ 4 พบว่าสามารถทำให้เกิด ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) กับน้ำมันดีเซลที่ให้ค่า interfacial tension ต่ำได้ จากนั้นได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลโดยใช้ระบบทำให้ลอยแบบกะ โดยได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นเกลือที่เติม อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ และความเร็วฟองอากาศ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะฟองที่เกิดขึ้น (Foam characteristics) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลโดยระบบทำให้ลอยแบบกะขึ้นกับสองปัจจัยหลัก ได้แก่ ค่า IFT ของระบบควรต่ำและลักษณะฟองที่เกิดขึ้นต้องมีเสถียรภาพของฟองสูงอีกด้วย

2.2 <u>การทดลองแยกน้ำมันดีเซลโดยระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่อง</u>

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการทำให้เกิด Microemulsion ของน้ำมันดีเซลกับน้ำ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดยืด (Extended surfactant) ได้แก่ Branched alcohol propoxylate sulfate มีชื่อทางการค้าว่า Alfoterra โดยในส่วนนี้ได้สร้างแผนภาพไมโครอิมัลชัน ซึ่งแสดงประเภทไมโครอิมัลชันต่างๆที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวและเกลือต่างๆ โดยพบว่าความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวต่ำสุดที่ทำให้เกิด Microemulsion แบบ Winsor Type III คือ 0.08 wt.% ที่ความเข้มข้นต่ำสุดนี้เรียกว่า CμC (Critical microemulsion concentration) โดยที่ CμC นี้จะให้ค่า IFT ต่ำสุดและมีค่า Optimum salinity ที่ 4 wt.% ส่วนของงานวิจัยช่วงที่ 2 เป็นการทดลองระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่อง พบว่าไม่สามารถผลิตฟองที่เสถียรพอ จึงไม่มีฟองล้นออกจากส่วนบนของคอลัมน์ ซึ่งทำให้ไม่มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารลดแรงตึงผิว SDS (Sodium dodecyl sulfate) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดฟองและเพิ่มเสถียรภาพของฟอง แต่ระบบสารลดแรงตึงผิวผสมนี้ไม่สามารถให้ค่า Ultralow IFT แต่สามารถให้ค่าเสถียรของฟองสูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในการแยกน้ำมันดีเซลจากน้ำโดยระบบทำให้ลอยขึ้นกับเสถียรภาพของฟองมากกว่าสภาวะ Ultralow IFT โดยระบบ

ทำให้ลอยแบบต่อเนื่องนี้สามารถแยกน้ำมันดีเซลได้สูงสุดถึง 96% แสดงบ่งชี้ให้เห็นว่าระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องนี้สามารถประยุกต์ใช้งานจริงได้

2.3 การทดลองระบบทำให้ลอยภายใต้สภาวะColloidal Gas Aphron

ในส่วนของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาว่าการใช้สภาวะ CGA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันโดยระบบทำให้ลอยได้หรือไม่ ในส่วนแรกเป็นการใช้สารลดแรงตึงผิวแบบยืด (Extended surfactant) ได้แก่ Branched alcohol propoxylate sulfate ในการทำให้น้ำมันเครื่องผสมกับน้ำในสภาวะที่ให้ค่า IFT ต่ำสุด คือที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 0.5 wt% และที่ความเค็มที่ 4 wt.% โดยสภาวะที่ให้ค่า IFT ต่ำสุดนี้ได้นำไปใช้ในการทดลองระบบทำให้ลอย จากผลการทดลองพบว่า ระบบที่ทำให้น้ำและน้ำมันเป็น CGA จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ CGA ที่เหมาะสมเตรียมที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 0.1 wt.% ความเข้มข้นเกลือที่ 0.3 wt.% ความเร็วรอบในการกวน 5000 rpm และเวลาในการกวน 5 นาที เมื่อนำไปแยกโดยระบบทำให้ลอยจะให้ประสิทธิภาพแยกน้ำมันสูงถึง 97%

2.4 การทดลองระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องเพื่อแยกน้ำมันตัดหล่อเย็น

การทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาการเกิดไมโครอิมัลชันแบบต่างๆของน้ำมันตัดหล่อเย็นโดยใช้สารลดแรงตึงผิวแบบยืด (Extended Surfactant) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง $C_{14\text{-}15}(PO)_3SO_4$ (Branched alcohol propoxylate sulfate sodium salt) มีชื่อว่า Alfotera ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวัดค่า Interfacial Tension (IFT) โดยพบว่าที่ความเข้มข้น Alfotera 0.3 wt.% จะให้ค่า IFT ต่ำสุด จากการวัดความสูงของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นและการวัดค่า IFT สามารถนำมาใช้ในการสร้างภาพไมโครอิมัลชันต่างๆ ในส่วนที่สองเป็นการทดลองระบบทำให้ลอยโดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น Alfotera และ NaCl ต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตัดหล่อเย็นนี้สูงสุดเมื่อระบบอยู่ในช่วงไมโครอิมัลชันแบบที่สาม (Winsor Type III microemulsion หรือ Middle phase microemulsion) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของเวลาเก็บกัก โดยได้พบว่า ที่เวลาเก็บกักยาวนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตัดหล่อเย็นสูงขึ้น โดยสรุปได้ว่าระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันตัดหล่อเย็นสูงสุด 83 % เมื่อระบบถูกควบคุมที่ 0.3 wt.% Alfotera 10 wt.% NaCl อัตราไหลของอากาศเท่ากับ 0.3 l/min ความสูงของฟองในคอลัมน์เท่ากับ 31 cm และที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 20 นาที จากการทดลองถ่ายรูปขนาดฟองอากาศลอยตัวในคอลัมน์ พบว่าสารลดแรงตึงผิวทำให้ฟองอากาศรวมตัวได้ยากขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวถ่ายโอนมวลสูงขึ้น และทำให้ฟองอากาศมีความเร็วไหลขึ้นช้าลง จึงทำให้สามารถแยกน้ำมันได้สูงขึ้น

2.5 การทดลองระบบทำให้ลอยแบบต่อเนื่องที่มีตัวกลางบรรจุเพื่อแยกน้ำมันตัดหล่อเย็น

การทดลองนี้ใช้น้ำมันตัดหล่อเย็น (Cutting oil) และใช้สารลดแรงตึงผิว Sodium dodecylsulfate (SDS) โดยได้ทำการทดลองที่มีตัวกลางบรรจุในสัดส่วน 0, 50, 75 และ 100% ของปริมาตรจุในคอลัมน์ ได้พบว่าการเติมตัวกลางบรรจุที่ 50% ให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 98.1% ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้น SDS เท่ากับ 0.1% ความเข้มข้น NaCl เท่ากับ 6% อัตราไหลอากาศเท่ากับ 200 mL/min และเวลาเก็บกักเท่ากับ60 นาที

นอกจากนี้ยังได้นำความรู้เกี่ยวกับการแยกโดยทำให้เป็นฟองลอยนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านอื่นๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- การแยกสารลดแรงตึงผิวกลับมาใช้ใหม่โดยระบบฟองลำดับส่วนแบบหลายขั้นตอน
- การแยกผงคาร์บอนแบล็คจากผงซิลิกาโดยกระบวนการทำให้ลอย
- การทำให้คาร์บอนขนาดนาโนชนิดผนังเดียวให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการทำให้ลอย

- การทำให้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพมีความบริสุทธิ์และเข้มข้นสูงขึ้นโดยกระบวนการทำให้ลอย

3. ผลงานที่ได้รับจากโครงการ (Output)

3.1 บทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1. Yanatatsaneejit, U., Chavadej, S. and Scamehorn, J.F. (2008). Diesel Oil Removal by Froth Flotation Under Low Interfacial Tension Conditions II: Foam Characteristics and Equilibrium Time, *Separation Science and Technology*, 43, 1520-1534

2. Watcharasing, S., Chavadej, S. and Scamehorn, J.F. (2008). Diesel Oil Removal by Froth Flotation Under Low Interfacial Tension Conditions II: Continuous Mode of Operation, *Separation Science and Technology*, 43, 2048-2071

3. Watcharasing, S., Anglathumyakul, P. and Chavadej, S. (2008). Diesel Oil Removal from Water by Froth Flotation under Low Interfacial Tension and Colloidal Gas Aphon Conditions, *Separation and Purification Technology*, 62, 118-127

4. Watcharasing, S., Watkongkowit, W. and Chavadej, S. (2009), Motor Oil Removal by Continuous Froth Flotation using Extended Surfactant: Effect of Air Bubble Parameters and Surfactant Concentration, *Separation and Purification Technology*, 70, 179-189

นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยที่ใช้ความรู้พื้นฐานการแยกโดยทำให้ลอย (Froth Flotation) ในการประยุกต์เพื่อแยกคาร์บอนแบลค์จากซิลิกา การทำให้ Single-Walled Carbon Nanotube มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น การแยกสารลดแรงตึงผิวจากน้ำ และ การทำให้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพมีความบริสุทธิ์และเข้มข้นสูงขึ้น โดยได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเหล่านี้ในวารสารนานาชาติดังนี้

1. Chungchamroenkit, P., Chavadej, S., Yanatatsaneejit, U. .and Kitiyanan. B. (2008), Residue Catalyst Support Removal and Purification of Carbon Nanotubes by NaOH Leaching and Froth Flotation, *Separation and Purification Technology,* 60, 206-214

2. Chungchamroenkit, P., Chavadej, S., Scamehorn, J. F., Yanatatsaneejit, U. and Kitiyanan. B. (2009), Separation of Carbon Black from Silica by Froth Flotation Part I: Effect of Operational Parameters, 44, 203-226

3. Boonyasuwat, S., Chavadej, S., Malakul, P. and Scamehorn, J. F. (2009), Surfactant Recovery from Water Using a Multistage Foam Fractionator: Effect of Surfactant Type, *Separation Science and Technology,* 44, 1544-1561

4. Sarachat, T., Pornsunthorntawee, O., Chavadej, S. and Rujiravanit, R. (2010), Purification and Concentration of a Rhamnolipid Biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* SP4 using Foam Fractionation, *Bioresource Technology*, 101, 324-330

3.2 ผลิตบัณฑิต

3.2.1 บัณฑิตระดับปริญญาเอก

ดร. สุนิสา วัชรสิงห์

3.2.2 บัณฑิตระดับปริญญาโท

น.ส. อภิชญา บรรเทิงประทุมรัฐ

3.3 เสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

- Chavadej, S., Nedcharaporn, A. and Watcharasing, S. (2008), Cutting Oil Removal by Continuous Froth flotation using an Extended Surfactant: Effect of Microemulsion Type and Operational Parameters, *Proceedings of International Workshop on Process Intensification 2008*, October 15-18, Tokyo Institute of Technology, O-okayama Campus, Tokyo, Japan, 64-65

- Watcharasing, S., Kongkowit, W., Chavadej, S. and Scamehorn, J. F. (2007), Bubble Size Distribution and Bubble Velocity in a Froth Flotation Column under Ultra-Low Interfacial Tension Conditions in Relation to Oil Removal, *2nd Asia Conference on Colloidal & Interface Chemistry*, October 28-30, Jinan, Shangdons, China (poster presentation)

- Watcharasing, S., Scamehorn, J. F. and Chavadej, S. (2007), Bubble Size Distribution in a Froth Flotation Column under Ultra-Low Interfacial Tension Conditions and Relation to Foam Characteristics, *98th AOC Annual Meeting & Expo*, May 12-16, 2007, Quebec City, Canada (oral presentation)

3.4 ได้รับเชิญไปเป็นวิทยากร

1. ได้รับเชิญไปบรรยาย (Invited speaker) ในการประชุมวิชาการนานาชาติ (International Symposium in Science and Technology ที่ Kansai University, ประเทศญี่ปุ่น ในช่วง 31 กรกฎาคม ถึง 1 สิงหาคม 2550 เรื่อง "Biohydrogen Production from Glucose – Containing Wastewater in Anaerobic Sequencing Batch Reactors"

2. ได้รับเชิญไปบรรยาย (Invited speaker) ในการประชุมวิชาการนานาชาติ "2nd Asian Conference of Colloid and Interface Sciences" ที่ Shangdong University, Jinan, ประเทศจีน ในช่วง 28 ถึง 31 ตุลาคม 2550 โดยบรรยายเรื่อง "Separation of Carbon Black from Silica by Froth Flotation: Affect of Operational parameters and Air Bubble Size"

3. ได้รับเชิญไปบรรยาย (Invited speaker) ในการประชุมวิชาการ "2007 Annual Meeting of Japan Research Institute of Material Technology" ในช่วง 30 พฤศจิกายน ถึง 1 ธันวาคม 2550 ที่ Tokyo University of Sciences, Noda, Chiba, ประเทศญี่ปุ่น ในหัวข้อเรื่อง "Synthesis of Single–Walled Carbon Nanotubes by Catalytic Disproportionation of Carbon–Containing Gases and Their Purification using Froth Flotation" นอกจากนี้ยังได้รับรางวัล Lectureship Award จาก Japan Institute of Material Technology

4. ได้รับเชิญไปบรรยาย (Invited speaker) ในการประชุมวิชาการ "Eco–Energy and Materials Science and Engineering Symposium" ในช่วง 21–24 พฤศจิกายน 2550 ที่พัทยา ประเทศไทย โดยบรรยายเรื่อง "Purification of Carbon Nanotubes by NaOH Leaching and Froth Flotation"