



การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัวด้วย
ฟองอากาศเหนียวนำและร่วมกับวิธีทางชีวภาพ

**Oil Separation from Palm Oil Mill Effluent Using Induced Air Flotation and
Combined with Biological Method**

ธิประภา จันพรหมศรี

Siprapa Janpromsri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Biotechnology

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัวด้วย
ฟองอากาศเหนียวนำและร่วมกับวิธีทางชีวภาพ

**Oil Separation from Palm Oil Mill Effluent Using Induced Air Flotation and
Combined with Biological Method**

สิประภา จันพรมศรี

Siprapa Janpromsri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Biotechnology

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัว
ด้วยฟองอากาศเหนียวนำและร่วมกับวิธีทางชีวภาพ

ผู้เขียน นางสาวสิประภา จันพรมศรี

สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร.วิริยะ ดวงสุวรรณ)

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เบญจมาศ เขียรศิลป์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรุณ หันพงษ์กิตติกุล)

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

.....กรรมการ
(ดร.วิริยะ ดวงสุวรรณ)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร.วิริยะ ดวงสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(ศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(นางสาวสิประภา จันทรมศรี)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวตีประภา จันทรมศรี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวน้ำและร่วมกับวิธีทางชีวภาพ

ผู้เขียน นางสาวติประภา จันพรมศรี

สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ประเทศไทยผลิตน้ำมันปาล์มดิบเป็นอันดับที่ 3 ของโลก คือประมาณ 2.2 ล้านตันต่อปี ซึ่งกำลังการผลิตที่สูงนี้ก่อให้เกิดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (palm oil mill effluent, POME) ในปริมาณมากเช่นกัน องค์ประกอบของ POME จากเครื่องดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมด 43,000-49,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สารแขวนลอย 20,000-23,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี 31,000-39,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 4.7 และน้ำมันและไขมัน 8,000-12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันที่ปนเปื้อนไปกับน้ำทิ้งนั้นถือเป็นการสูญเสียผลิตภัณฑ์ของโรงงาน การศึกษาและวิจัยนี้จึงสนใจการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME โดยใช้เทคนิคการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวน้ำ (induced air flotation, IAF) งานวิจัยนี้ได้สร้างและพัฒนาเครื่องแยกน้ำมันออกจาก POME ด้วยระบบ IAF โดยเปรียบเทียบการใช้ถังแยกน้ำมัน (ขนาด 20 ลิตร) 3 รูปแบบ คือ (a) แบบถังเดี่ยวทรงกระบอก, (b) แบบถังเดี่ยวทรงกระบอกที่ภายในมีท่อแอร์ลิฟต์ และ (c) แบบถังเดี่ยวทรงกระบอกที่ภายในมีท่อแอร์ลิฟต์และมีแผ่นบัพเฟิล

ระบบ IAF ในงานวิจัยนี้อาศัยหัวฉีดเหนียวน้ำอากาศที่มีการไหลของของเหลวผ่านหัวฉีดเป็นตัวสร้างความดันสุญญากาศในหัวฉีด เพื่อให้สามารถดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาในระบบได้ ทำการสร้างหัวฉีดด้วยพลาสติกซูเปอร์ลีน (superlene plastic) และทดสอบการดูดอากาศของหัวฉีดด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์ (น้ำผสมกับน้ำมันปาล์มรีไฟน์ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ ให้มีค่าเริ่มต้นของน้ำมันในน้ำเท่ากับ 4,000, 8,000, 12,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์ผ่านหัวฉีดโดยอาศัยวาล์วบายพาสซึ่งสังเกตจากค่าความดันของน้ำทิ้งสังเคราะห์ขาเข้าหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลงไป (2.5, 3.75, 5, 6, 8 และ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าสามารถดูดอากาศได้ 2-10 ลิตรต่อนาทีที่อัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์ผ่านหัวฉีดเท่ากับ 8-14 ลิตรต่อนาที และจากการวัดขนาดของฟองอากาศที่ผลิตได้จากระบบ IAF ที่สร้างขึ้น โดยอาศัยการวิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศจากภาพถ่าย แต่เนื่องจาก POME มีสีเข้มมากไม่สามารถมองเห็นฟองอากาศใน POME ได้เลย จึงจำเป็นต้องใช้น้ำประปาแทน POME

จึงจะสามารถถ่ายรूपฟองอากาศได้ พบว่าฟองอากาศที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ (ประมาณ 70%) มีขนาด 1-4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความดันน้ำก่อนเข้าหัวฉีด 2.5, 5, 7.5 และ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ซึ่งแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีด) ในที่นี้จึงเลือกใช้ค่าความดัน 7.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้วสำหรับการนำไปใช้กับเครื่องแยกน้ำมันระบบ IAF ต่อไป

วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำเป็นวิธีที่สามารถเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเข้ามากระจายตัวในรูปแบบของฟองอากาศในระบบ ทำให้สัมผัสกับอนุภาคสารอินทรีย์ต่างๆ ใน POME และทำให้น้ำมันลอยตัวขึ้นสู่ชั้นผิวหน้าได้ดี โดยจากการเดินเครื่องระบบ IAF กับ POME เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความดัน POME ก่อนเข้าหัวฉีด 7.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าถึง (a), (b) และ (c) แยกน้ำมันออกจาก POME เฉลี่ยทั้ง 3 อุณหภูมิได้ 38.92, 35.58 และ 43.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำตัวอย่าง POME ก่อนและหลังการทดลองจากถึง (a), (b) และ (c) ไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสและตะกอน พบว่าน้ำมันในส่วนใสลดลง 73.92, 66.09 และ 79.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และน้ำมันในตะกอนลดลง 15.10, 11.33 และ 14.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าของแข็งทั้งหมดใน POME จากถึง (a), (b) และ (c) ลดลง 50.91, 51.54 และ 55.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าของแข็งแขวนลอยลดลง 23.74, 21.24 และ 19.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าซีไอลดลง 29.17, 38.21 และ 56.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทุกการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือจาก 4.7 เป็น 5.0 จากผลการทดลองในภาพรวมจึงได้เลือกใช้ถึง (c) กับระบบ IAF และเลือกอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป

เนื่องจากเชื้อ *Bacillus subtilis* A2 มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสออกมาออกนอกเซลล์ซึ่งจะอยู่ในน้ำหมัก จึงทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อกับการใช้เอนไซม์ของเชื้อซึ่งเป็นส่วนใสที่หมุนเหวี่ยงแยกเชื้อ (supernatant) ออกจากน้ำหมัก และมีชุดควบคุมคือการใช้อาหารเหลวซีเอ็มซีที่ไม่เติมเชื้อ ปริมาณ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร เติมลงใน POME ปริมาตร 45 มิลลิลิตร คือคิดเป็นอัตราส่วน 1:22.5, 1:9 และ 1:4.5 เขย่าเป็นเวลา 36 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เพื่อดูการแยกน้ำมันในพลาสติกขนาด 150 มิลลิลิตร พบว่าการเติมเชื้อในน้ำหมักปริมาณ 5 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง แสดงผลการแยกน้ำมันออกจากตะกอนของ POME ได้ดีที่สุด 37.25% จึงเลือกวิธีการเติมเชื้อพร้อมน้ำหมักลงใน POME ในอัตราส่วน 1:9 โดยปริมาตร และเลือกใช้เวลา 12 ชั่วโมงในการพักเชื้อสำหรับการแยกน้ำมันปาล์มออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ในถึง (c)

จากการเดินเครื่องระบบ IAF ถึง (c) และมีการเติมเชื้อ *B. subtilis* ที่เลี้ยงในอาหารเหลวซีเอ็มซี (culture broth) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ปรับปริมาณเชื้อเริ่มต้นของหัวเชื้อให้มีค่า OD_{660} เท่ากับ

0.5 เลียงเชื้อใน POME 50 องศาเซลเซียส และความดัน POME ก่อนเข้าหัวฉีด 7.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยเติมหัวเชื้อปริมาณ 1.77 ลิตร ลงในถัง (c) ที่มี POME 16 ลิตร (อัตราส่วน 1:9 โดยปริมาตร) แบ่งการทดลองเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ 1 เดินเครื่องระบบ IAF ทันทเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และกรณีที่ 2 พักเชื้อภายในถัง 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงเดินเครื่องระบบ IAF เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเชื้อ พบว่ากรณีที่ 1 และ 2 สามารถแยกน้ำมันออกจาก POME ได้ 52.86 และ 65.09% ตามลำดับ ในขณะที่หากไม่มีการเติมเชื้อจะแยกน้ำมันได้เพียง 34.56% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบ IAF ร่วมกับการใช้เชื้อ *B. subtilis* ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ให้ผลการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ได้ดีกว่าการใช้ระบบ IAF เพียงวิธีเดียว โดยมีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นประมาณ 30%

Thesis title Oil Separation from Palm Oil Mill Effluent Using Induced Air Flotation and Combined with Biological Method
Author Miss.Siprapa Janpromsri
Major Program Biotechnology
Academic Year 2017

Abstract

Thailand ranks third among palm oil producing countries, which produces about 2.2 million tonnes of crude palm oil per year. This high palm oil production capacity corresponds to high generation of palm oil mill effluent (POME). The characteristics of POME from decanter of the palm oil mill was analyzed, showing 43,000-49,000 mg/l of total solids, 20,000-23,000 mg/l of suspended solids, 31,000-39,000 mg/l of COD, pH 4.7 and 8,000-12,000 mg/l of oil and grease. Oil in POME is considered as a loss of main product from the milling process. This research was interested in separation of crude palm oil from POME using induced air flotation (IAF). This work had constructed a 20 liter – IAF system for separation of oil from POME. Three forms of separation tank were produced: (a) a vertical cylindrical drum, (b) a vertical cylindrical drum with airlift tube and (c) a vertical cylindrical drum with airlift tube and baffles.

The IAF system in this work used the induced air nozzle to produce bubbles for flotation. The nozzle was made from superlene plastic and tested its air suction rates using synthetic oily wastewater, homogenized from the mix of water and refined palm oil. Three temperatures were used: 30, 40 and 50°C. The wastewater flow rates were 2.5, 3.75, 5, 6, 8 and 10 L/min. The air suction rate about 2-10 L/min corresponded to wastewater flow rate of 8-14 L/min were obtained. Therefore, the wastewater pressure before entering the nozzle of 7.5 psi was chosen for investigating of oil separation from POME using IAF system.

Sizes of bubbles produced from the IAF system were measured. However, tap water was used instead of POME due to dark brown color of POME prevented the bubbles to be captured by the camera. The liquid temperatures were 50, 60 and 70°C, and the nozzle inlet pressures were 2.5, 5, 7.5 and 10 psi which were proportional to its flow rate. About 70% of the induced bubbles have diameters in the range of 1-4 mm.

The IAF system was run with POME for 6 hours at temperatures 50, 60 and 70°C and inlet nozzle pressure of 7.5 psi. In average of three temperatures, the separation tank (a), (b) and (c) showed the oil separation about 38.92, 35.58 and 43.82%, respectively. The oil reductions in supernatant of POME for each tank were 73.92, 66.09 and 79.31%, respectively, whereas the oil reduction in sludge of POME were 15.10, 11.33 and 14.15%, respectively. The reductions of total solids were 50.91, 51.54 and 55.12%, respectively. The reductions of suspended solids were 23.74, 21.24 and 19.6%, respectively. The reductions of COD were 29.17, 38.21 and 56.00%, respectively. A little bit increases of pH were observed (pH from 4.7 to 5). In a whole picture of these results, tank (c) was chosen for further studies.

Bacillus subtilis A2 has the ability to produce extracellular cellulose enzymes for cellulose digestion. The use of whole culture broth of *B. subtilis* A2, its supernatant, and CMC medium (control) were compared, each of 3 volumes: 2, 5 and 10 ml, were added into 45 ml of POME separately, the ratio of 1: 22.5, 1: 9 and 1: 4.5 respectively. The experiment was conducted under shaking and incubating at 45°C for 36 hours. The best oil separation of 37.25% was found at 12 hours of shaking in the 150-ml flask which 5 ml culture broth was added. From this reason, POME together with adding culture broth of *B. subtilis* A2 in the volume ratio to POME of 1:9, and 12 hours incubation before IAF were selected for study of oil separation in tank (c).

The IAF system with tank (c) using 1.77 liters of *B. subtilis* A2 culture broth in CMC (12 hour incubation, the initial amount of inoculation was adjusted to $OD_{660} = 0.5$ before adding to POME) mixed with 16 liters of POME (1:9 volume ratio) were run for 6 hours at 50°C with inlet

pressure of POME at 7.5 psi. Two cases were compared: (i) the IAF was turned on just after adding culture broth into tank (c) and (ii) the IAF was turned after 12 incubation of the mixed liquid (culture broth and POME) in tank (c). Cases (i) and (ii) showed oil separation of 52.86 and 65.09%, respectively. In conclusion, the use of the IAF system combined with culture broth of *B. subtilis* A2 containing cellulase enzymes resulted in 30% increase of separation of crude palm oil from POME than the use of IAF system.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.วิริยะ ดวงสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ และ ศ.ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษา ให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการค้นคว้าและการทำงานวิจัย ตลอดจนการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เบญจมาศ เชียรศิลป์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศ.ดร.อรัญ หัน พงศ์กิตติกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันยิ่งใหญ่ในการให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ และการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมจรรยา มารยาท รวมทั้งให้ความเมตตาต่อข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้ามาโดยตลอด และขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนนักศึกษาสำหรับความช่วยเหลือต่างๆ และกำลังใจที่มีให้ เสมอมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่คณะอุตสาหกรรมเกษตรและทุกท่านที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ด้วยดี

สิประภา จันทรมศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	i
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	iv
กิตติกรรมประกาศ.....	vii
สารบัญ.....	viii
รายการตาราง.....	xiii
รายการรูป.....	xiv
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3-4
บทที่ 2 บทตรวจเอกสาร.....	5
2.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของทะลายปาล์มน้ำมัน (palm fruit bunch) และใยผลปาล์มน้ำมัน (palm fruit fiber).....	5
2.1.1 เซลลูโลส.....	5
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส.....	6
2.1.3 ลิกนิน.....	7
2.2 น้ำมันปาล์มดิบ.....	7
2.2.1 แหล่งของน้ำมันปาล์มดิบในผลปาล์ม.....	9
2.2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียก.....	9
2.3 น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	10
2.3.1 น้ำทิ้งจากขั้นตอนการฆ่าเชื้อ.....	12
2.3.2 น้ำทิ้งจากการสกัดและการย่อย.....	12
2.3.3 น้ำทิ้งจากการแยกเมล็ดปาล์มและการทำแห้ง.....	13
2.4 วิธีการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME	15
2.4.1 รูปแบบของน้ำมัน.....	15

2.4.2	วิธีทางกายภาพ.....	16
2.4.2.1	การตกจม.....	16
2.4.2.2	การลอยตัวด้วยฟองอากาศ.....	16
	(1) การอัดอากาศให้อิ่มตัวในของเหลว (Dissolved air flotation).....	17
	(2) การกระจายอากาศ (Dispersed air flotation).....	19
	(3) การดึงอากาศ (Induced air flotation).....	19
2.4.2.3	การหมุนเหวี่ยง.....	29
2.4.3	วิธีทางเคมี.....	29
2.4.4	วิธีทางชีวภาพ.....	30
2.4.4.1	การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้ เชื้อจุลินทรีย์.....	31
2.4.4.2	เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง.....	35
	(1) เซลลูเลส (Cellulase).....	35
	(2) ไซลานเนส (Xylanase).....	37
2.5	สมการเบอร์นูลลีสำหรับการออกแบบหัวฉีดดูดอากาศ.....	38
บทที่ 3	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	41
3.1	วัสดุและอุปกรณ์.....	41
3.1.1	หัวฉีดอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.1.2	ชุดทดสอบหัวฉีดเหนียวนำอากาศด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์.....	41
3.1.3	ชุดถังทดสอบการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME.....	42
3.1.4	การวัดขนาดฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดเหนียวนำอากาศ.....	45
3.1.5	วัสดุคืบ.....	46
	3.1.5.1 น้ำทิ้งสังเคราะห์.....	46
	3.1.5.2 น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME).....	46
3.1.6	อาหารเลี้ยงเชื้อ.....	47
3.1.6	อุปกรณ์อื่นๆ.....	47

3.2 วิธีการทดลอง.....	48
3.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวฉีดเหนียวนำอากาศด้วย น้ำที่สังเคราะห์.....	48
3.2.2 การหาขนาดของฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดฟองอากาศ.....	48
3.2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมของถังแยกน้ำมันในการแยกน้ำมัน ออกจาก POME.....	49
3.2.4 การใช้จุลินทรีย์ในการช่วยแยกน้ำมันออกจาก POME (คัดแปลงจาก วรรณิการ์ สิริสิงห์, 2522).....	50
3.2.4.1 การศึกษาการเจริญและการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส โดย <i>B. subtilis</i>	50
3.2.4.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มร่วมกับการใช้เชื้อ <i>B. subtilis</i>	50
3.2.4.3 การแยกน้ำมันออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ร่วมกับการประยุกต์ใช้เชื้อ <i>B. subtilis</i>	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	52
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพหัวฉีดด้วยน้ำที่สังเคราะห์.....	52
4.2 การวัดขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน	55
4.3 การใช้ระบบ IAF แยกน้ำมันออกจาก POME.....	61
4.3.1 การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	61
4.3.2 การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากส่วนใสของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	64
4.3.3 แสดงผลการวิเคราะห์การแยกน้ำมันออกจากตะกอนของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	66
4.3.4 แสดงผลการวิเคราะห์การแยกของแข็งทั้งหมดออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	68

4.3.5 แสดงผลการวิเคราะห์การแยกของแข็งแขวนลอยออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	70
4.3.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ.....	71
4.3.7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของ POME ที่ผ่านการให้อากาศโดยใช้ถังแยกทั้ง 3 แบบ.....	73
4.3.8 แสดงผลการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านท่อ.....	76
บทสรุปการทดลองที่ 4.3.....	77
4.4 การใช้จุลินทรีย์ในการแยกน้ำมันออกจาก POME	78
4.4.1 การศึกษาการเจริญและการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดย <i>B. subtilis</i>	78
4.4.2 การแยกน้ำมันจาก POME โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ <i>B. subtilis</i> ในอาหารเหลวซีเอ็มซี เปรียบเทียบระหว่างการเติมเชื้อ <i>B. subtilis</i> ในอาหารซีเอ็มซี (Culture broth) และส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร เซลลูเลสแบบเติมทั้งเชื้อที่อยู่ในอาหารซีเอ็มซี (Culture broth) และส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร.....	80
บทสรุปการทดลองที่ 4.4.....	84
4.5 การแยกน้ำมันออกจาก POME โดยใช้โดยใช้เชื้อ <i>B. subtilis</i> ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ ร่วมกับถังแยกน้ำมันด้วยระบบ IAF (ขยายขนาดการทดลอง).....	86
บทสรุปการทดลองที่ 4.5.....	88

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 บทสรุป.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก	104
ประวัติผู้เขียน.....	111

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบหลักทางเคมีของปาล์มน้ำมัน	5
2	มาตรฐานน้ำทิ้งที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย	11
3	คุณสมบัติของ POME ในส่วนของไอน้ำกลั่นตัวจากหม้อนิ่งฆ่าเชื้อ (sterilizer condensate), น้ำเสียจากการตกตะกอน (clarification wastewater) และน้ำเสียจากไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone wastewater)	12
4	ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME)	14
5	การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆระหว่างการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ (induced air flotation; IAF) และการลอยตัวด้วยฟองอากาศอิ่มตัว (dissolved air flotation; DAF)	26
6	แสดงการเปรียบเทียบการใช้ <i>B. subtilis</i> เพื่อผลิตเอนไซม์	35
7	องค์ประกอบของ POME ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	47
8	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำมัน, ของแข็งทั้งหมด, ของแข็งแขวนลอย, ค่าซีไอดี และค่าพีเอชหลังการลอยตัวด้วยฟองอากาศ	76
9	ปริมาณน้ำมันในกากตะกอนและส่วนใสของ POME หลังการเติมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างเดียว, อาหารเลี้ยงเชื้อที่มี <i>B. subtilis</i> และส่วนใสจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี <i>B. subtilis</i>	83
10	สมมูลมวลของปริมาณน้ำทิ้งระหว่างการทดลองด้วยระบบ IAF	90

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของผลปาล์ม	7
2	กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	8
3	กระบวนการย่อย 3 กระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันขณะฟองอากาศลอยตัวเพื่อจับอนุภาคแขวนลอยในของเหลว	17
4	ตัวอย่างระบบการแยกน้ำมันจากน้ำเสียที่มีน้ำมันเจือปนด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวน้ำ	23
5	ชุดแยกน้ำมันจาก POME ขนาด 200 ลิตร ของ เมธาวิ ทองนอก และ วันดี ทองมา	27
6	รูปประกอบการอธิบายสมการเบอร์นูลลี	38
7	ลักษณะของหัวฉีดเหนียวน้ำอากาศ	41
8	ชุดเครื่องมือทดสอบอัตราการดูดอากาศของหัวฉีดของ Duangsuwan และคณะ (2014) ที่ขอขืมมาใช้กับงานวิจัยนี้	42
9	ชุดเครื่องมือทดลองการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวน้ำแบบกะ ขนาด 20 ลิตร จำนวน 3 แบบ สำหรับแยก CPO ออกจาก POME (a) ตัวเดียว, (B) ตัวเดียว+ท่อแอร์ลิฟต์, (C) ตัวเดียว+ท่อแอร์ลิฟต์+แผ่นกั้นบัพเฟิล, (d) รูปถ่ายจริง 1 = ถังแยก, 2 = บั้ม, 3 = หัวกระจายอากาศ, 4 = ฮีตเตอร์, 5 = ตัวควบคุมอุณหภูมิ, 6 = หัววัดอุณหภูมิ, 7. = ก๊อกสุ่มตัวอย่าง, 8 = ท่ออากาศขาเข้า, 9 = เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ, 10 = วาล์ว, 11 = เกจวัดความดัน, 12 = เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ, 13 = หัวฉีดเหนียวน้ำอากาศ, 14 = ท่อแอร์ลิฟต์ 15 = บัพเฟิล	43
10	ขนาดของท่อแอร์ลิฟต์ที่ใส่ลงในถังแยกในรูปที่ 9(a) และ 9(b) เพื่อให้ POME ไหลวนในแนวตั้งในถังแยก	44
11	ขนาด, รูปร่าง, และจำนวนของแผ่นกั้นบัพเฟิลที่ใช้ในถังแยกในรูปที่ 9(c)	44
12	รูปถ่ายแสดงการตัดแปลงถังแยกเพื่อให้สามารถถ่ายรูปฟองอากาศได้	45
13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำเสียน้ำผ่านหัวฉีดเหนียวน้ำอากาศกับอัตราการดูดอากาศของหัวฉีดดังกล่าว	54
14	รูปถ่ายฟองอากาศที่ผลิตจากหัวฉีดเหนียวน้ำอากาศของถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 12	57

15	ขนาดของฟองอากาศในน้ำที่ผลิตจากหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ	59
16	การลดลงของปริมาณน้ำมันใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70	60
17	การลดลงของปริมาณน้ำมันในส่วนใสของ POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C	63
18	การลดลงของปริมาณน้ำมันในตะกอนของ POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C	65
19	การลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมดใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C	67
20	การลดลงของปริมาณของแข็งแขวนลอยใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C	69
21	การเปลี่ยนแปลงของ pH ใน POME ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C เทียบกับเวลา : (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)	72
22	ค่าซีโอดี (COD) ของ POME ก่อนและหลัง 6 ชั่วโมงของการทดลอง : (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)	74
23	อัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผ่านหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C: (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)	75
24	การเจริญเติบโตและค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อ <i>B. subtilis</i>	79
25	ปริมาณน้ำมันในกากตะกอนและส่วนใสของ POME หลังจากการเติมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างเดียว, อาหารเลี้ยงเชื้อที่มี <i>B. subtilis</i> และส่วนใสจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี <i>B. subtilis</i> ที่ระยะเวลาต่างๆ	82
26	การใช้ <i>B. subtilis</i> ขนาด 5 มิลลิลิตรและเขย่าที่ 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสส่งผลให้เกิดตะกอนตกตะกอนและลอยตัวอยู่บนพื้นผิว	85
27	กิจกรรมของเซลลูเลสเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม <i>B. subtilis</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อลงในถังแยกและให้อากาศด้วยระบบ IAF และการเติม <i>B. subtilis</i> ในอาหารเลี้ยงเชื้อลงในถังแยกเป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วให้อากาศด้วยระบบ IAF	86

- 28 ปริมาณของแข็ง และการแยกน้ำมันในตะกอนและน้ำมันในส่วนใสออก โดยการเติมเชื้อ *B. subtilis* ลงในถังแยกทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง แล้วจึงให้อากาศด้วยระบบ IAF 87
- 29 เปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่หลังการบำบัดด้วยวิธีและระยะเวลาแตกต่างกัน 87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันน้ำมันปาล์มถือเป็นน้ำมันพืชที่มีการผลิตในปริมาณมาก และมีการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆอย่างรวดเร็วและกว้างขวาง อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจึงจัดเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2557 ทั่วโลกมีการผลิตน้ำมันปาล์มดิบถึง 62.34 ล้านตัน โดยที่ 85% มาจากประเทศอินโดนีเซีย 30.5 ล้านตัน รวมกับประเทศมาเลเซีย 19.9 ล้านตัน (Ahmed *et al.*, 2015) ในขณะที่ปี พ.ศ. 2560 ประเทศอินโดนีเซียได้เพิ่มกำลังการผลิตเป็น 36 ล้านตัน มาเลเซีย 19.5 ล้านตัน ส่วนประเทศไทยนั้นมียังกำลังการผลิตเป็นอันดับที่ 3 ของโลก คือ 2.2 ล้านตัน (Lauren, 2018) อย่างไรก็ตามการผลิตน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดวัสดุเศษเหลือที่ได้จากกระบวนการผลิต คือ ทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch) 23%, เส้นใยปาล์ม (palm fiber) 12%, กะลาปาล์ม (shell) 5% และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (palm oil mill effluent, POME) 60% (Baker *et al.*, 2018) ซึ่งน้ำทิ้งนี้คิดเป็น 0.5-0.75 ลบ.เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด (Ahmed *et al.*, 2015) โดยมีแหล่งที่มาหลักๆจากหม้อนึ่งปาล์ม (น้ำนึ่งปาล์ม) และเครื่องตีแคนเตอร์ น้ำทิ้งดังกล่าวมีสีน้ำตาลเข้ม ประกอบด้วยน้ำ 95-96% อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ของแข็งทั้งหมด 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอย 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand: BOD) 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าน้ำมันและไขมัน (oil&grease) 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 4.7 (Saifuddin and Dinara, 2011) POME มีลักษณะเป็นอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบใน POME เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้า มักขัดขวางประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย หากสามารถแยกน้ำมันดังกล่าวคืนมาได้ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม อีกทั้งยังช่วยให้ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานทำงานได้ง่ายขึ้น

มีการศึกษาการแยกน้ำมันออกจาก POME หลายวิธี เช่น การใช้จุลินทรีย์โดยตรงที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลาลเนสเติมลงใน POME โดยเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Aspergillus niger* ATCC 6275, *Rhizopus* sp. ST29, *Rhizopus* sp. ST4, *Bacillus subtilis* ที่สามารถผลิตเอนไซม์ที่แยกน้ำมันในน้ำทิ้งได้ (อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2553; เสถียรพงษ์ อุดมศิลป์ และ พูนสุข

ประเสริฐสรรพ, 2552; สัญทัศน์ สันจรรุญศักดิ์, 2554) การใช้สารตกตะกอนเดิมลงในน้ำทิ้ง (Ahmad *et al.*, 2006; Poh *et al.*, 2014) และการใช้ฟองอากาศเร่งการลอยตัวของหยดน้ำมันในน้ำทิ้ง ซึ่ง Ho และ Tan (1989) พบว่าวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศสามารถแยกน้ำมันได้ดีที่สุดถึง 97%

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME โดยใช้วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ (induced air flotation) ซึ่งจะออกแบบถังแยกน้ำมัน โดยเพิ่มท่อ Airlift ภายในถัง เปรียบเทียบกับการเพิ่มการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลภายในท่อ Airlift เนื่องจากท่อ Airlift จะช่วยในการไหลวนของน้ำทิ้งในระบบมากขึ้นและแผ่นกั้นบัพเฟิลจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันของฟองอากาศและอนุภาคสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ฟองอากาศเหนี่ยวนำเกิดจากอากาศภายนอกที่ถูกดูดเข้ามาผ่านคอคอดของหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (induced air nozzle) ที่ออกแบบไว้ เมื่อน้ำทิ้งไหลผ่านคอคอดของหัวฉีด ความดันของน้ำในคอคอดจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ หากเจาะรูที่คอคอดจะทำให้อากาศภายนอกถูกดูดเข้ามาในหัวฉีดและแตกกระจายกลายเป็นฟองอากาศผสมกับน้ำไหลออกจากหัวฉีด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำอากาศของหัวฉีดด้วย ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นกับความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านหัวฉีด, ความดันของของเหลวก่อนเข้าหัวฉีด, เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดของหัวฉีด และรวมทั้งการศึกษาการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่เชื้อจุลินทรีย์ผลิตในการช่วยเสริมการแยกน้ำมันออกจาก POME โดยวิธีวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างถังต้นแบบเพื่อแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ (IAF)
2. ศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยการใช้ถังแยกน้ำมันตามข้อ 1. โดยเปรียบเทียบระหว่างผลของการติดตั้งแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้นในถัง, การแปรผันอุณหภูมิของน้ำทิ้งที่ใช้, อัตราการไหลของน้ำทิ้ง
3. ศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยการใช้ถังแยกน้ำมันตามข้อ 1 ร่วมกับการใช้เชื้อจุลินทรีย์ *B. subtilis*

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (induced air nozzle, IAF) ขึ้นมาจำนวน 1 ชิ้น โดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจเอกสาร (literature review)

2. ทำการทดสอบความสามารถในการดูดหรือเหนี่ยวนำอากาศของหัวฉีดในข้อ 1. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลในหัวฉีดกับปริมาณอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในหัวฉีด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของหัวฉีด โดยของเหลวที่ใช้แทน POME ในการทดลองนี้ จะใช้ศัพท์ว่า “น้ำทิ้งสังเคราะห์” ซึ่งเตรียมจากน้ำและน้ำมันปาล์มรีไฟน์ นำมาผสมกันด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ โดยในการทดลองจะทำการแปรผันค่าอุณหภูมิ, อัตราการไหล และปริมาณน้ำมันเริ่มต้นในน้ำทิ้งสังเคราะห์

3. สร้างถังแยกน้ำมันจาก POME โดยใช้ถังแยก 3 รูปแบบ คือ (a) ถังแยกธรรมดา, (b) ถังแยกที่เพิ่มการติดตั้งท่อ Airlift ภายในถัง และ (c) ถังแยกที่เพิ่มการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลภายในท่อ Airlift โดยอาศัยหลักการการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ โดยใช้หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศในข้อ 1. มาผลิตฟองอากาศ และใช้ POME จริงในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของถังแยกนี้ที่ใช้ระบบ IAF เป็นตัวช่วย

4. ศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันจาก POME ในขวดพลาสติก โดยการประยุกต์ใช้เชื้อ *B. subtilis* ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำมัน

5. ใช้ถังแยกน้ำมันระบบ IAF พร้อมทั้งสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3. มาทดสอบประสิทธิภาพการแยกน้ำมันจาก POME ร่วมกับการประยุกต์ใช้เชื้อ *B. subtilis*

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเหนี่ยวนำอากาศของหัวฉีดที่ออกแบบไว้
2. ได้ทราบสภาวะที่เหมาะสมของการแยกน้ำมันจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ โดยใช้ถังแยกที่ติดตั้งหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่ออกแบบไว้
3. ได้ทราบสภาวะที่เหมาะสมของการแยกน้ำมันจาก POME ด้วยระบบ IAF
4. ได้ทราบสภาวะที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* เพื่อผลิตเอนไซม์ที่ช่วยในการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME

5. ได้ทราบสถานะที่เหมาะสมของการแยกน้ำมันจาก POME ด้วยระบบ IAF ร่วมกับการประยุกต์ใช้ *B. subtilis*
6. ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการขยายขนาดของถังแยกน้ำมันด้วยวิธีการข้างต้น

บทที่ 2

บทตรวจเอกสาร

2.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปาล์มน้ำมัน

ต้นปาล์มส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินประกอบด้วย ลำต้น (trunk), ทางปาล์ม (frond) และทะลายผลปาล์ม (palm fruit bunch) โดยที่ทะลายผลปาล์ม เมื่อสลัดผลปาล์ม (palm fruit) ออก จะกลายเป็นทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch; EFB) สำหรับผลปาล์มนั้นจะประกอบด้วยส่วนเนื้อเปลือกที่มีน้ำมัน กะลา (shell) และเมล็ดใน (kernel) ส่วนเนื้อเปลือกที่มีน้ำมันนั้นเมื่อบีบน้ำมันออกแล้วจะได้เส้นใย (fiber) ของผลปาล์ม องค์ประกอบหลักๆทางเคมีของส่วนต่างๆของปาล์มน้ำมันที่กล่าวข้างต้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, ไขมัน, เถ้า และอื่นๆ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปาล์มน้ำมัน

Component	Frond	Trunk	Fiber	Shell	EFB
Cellulose (wt. %, d.b)	31.0	39.9	19.0	14.7	35.8
Hemicellulose (wt. %, d.b)	17.1	21.2	15.2	16.4	21.9
Klason lignin (wt.%, d.b)	22.9	22.6	30.5	53.6	17.9
Wax (wt.%, d.b)	2.0	3.1	9.1	2.3	3.0
Ash (wt.%, d.b)	2.8	1.9	7.0	2.3	3.0
Other (by difference)	24.2	11.3	19.2	10.7	17.4

ที่มา: Yuliansyah และคณะ (2012)

2.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชและเป็นสารอินทรีย์ที่มีมากที่สุดในส่วนชีวมวล และเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส (glucose) จำนวน 1,000-10,000 โมเลกุล ต่อกันเป็นโพลีเมอร์ (polymer) เชื่อมกันด้วยพันธะ β -1,4 glycosidic linkage (อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2553) แต่ละสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไปเป็นกลุ่ม

40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช จากการศึกษาโดยใช้วิธีการ X - ray diffraction โครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสเรียกว่า ไฟบริล (fibril) แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นระเบียบ (crystalline) โครงสร้างจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ เป็นผลึก ซึ่งมีปริมาณ 50- 90 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมด (Fan and Lee, 1983) และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (amorphous) โครงสร้างจัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ รูปร่างไม่แน่นอน เป็นส่วนที่ดูดซับน้ำได้ดีสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าส่วนที่เป็นผลึก และมีประมาณร้อยละ 15 ของทั้งหมด (อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2553) การจัดเรียงตัวของ ไมโครไฟบริลในลักษณะที่แตกต่างกันนี้จะมีผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ ทำให้อัตราในการย่อยสลายเซลลูโลสบริเวณต่างๆ มีความแตกต่างกัน กล่าวคือส่วนที่เป็น amorphous จะถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ง่ายกว่าส่วนที่เป็น crystalline (Fan and Lee, 1983)

2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโพลีแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักของโมเลกุลต่ำ มีลักษณะโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกันมากกว่า 250 แบบ จำแนกตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ D-xylose, D-mannose, D-galactose และ L-arabinose แต่ละกลุ่มจะมีความหลากหลายของโครงสร้างมาก จึงมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามกลุ่มของน้ำตาล เช่น ไซแลน (xylan), แมนแนน (mannan), กาแลกแทน (galactan) และอะราบินัน (arabinan) ซึ่งสำหรับเซลล์พืชที่พบมาก มักเป็นกลุ่มของน้ำตาลไซโลส (Wang *et al.*, 2015)

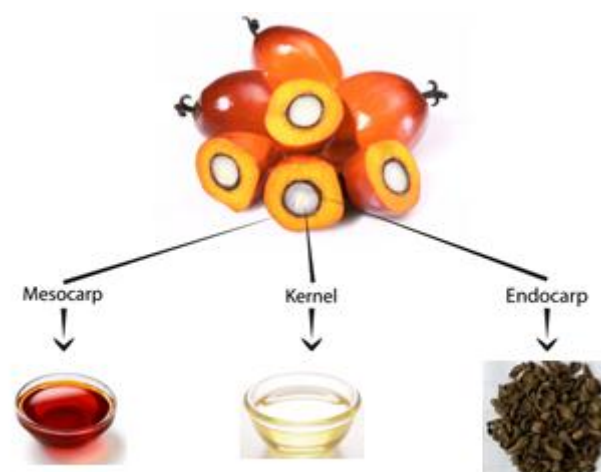
ไซแลน เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (heterogeneous polysaccharides) ที่พบในผนังเซลล์ของพืช มีหน่วยย่อย คือน้ำตาลไซโลส (D-xylose) ร้อยละ 85-93 ส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาล L-arabinose และ glucuronic acid ไซแลนที่พบมากที่สุด ในไม้เนื้อแข็ง ประกอบไปด้วยสายหลักของไซแลนคือน้ำตาลไซโลส ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1-4 เชื่อมกับ D-xylopyranose ไซแลนแบ่งออกได้ตามการเชื่อมต่อของพันธะได้ดังนี้ homoxylan, arabinoxylan, glucuronoxylan และ glucuronoarabinoxylan ไซแลนที่ไม่มีหมู่ acetyl จะไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายต่าง และสลายด้วยกรดได้ง่าย ไซแลนที่มีหมู่ acetyl สามารถถูกสกัดด้วยน้ำร้อน และละลายน้ำได้มาก ไซแลนที่มีหมู่ acetyl ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ (อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2553)

2.1.3 ลิกนิน

ลิกนิน เป็นสารประกอบโพลีฟีนอลิก (polyphenolic compound) ที่มีโครงสร้างซับซ้อนที่มีการเชื่อมโยงขององค์ประกอบ 3 กลุ่ม คือ coniferyl alcohol, sinapyl alcohol และ p-coumaryl alcohol ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีคุณสมบัติในการยึดหยุ่น พันธะที่พบภายใน โครงสร้างที่สำคัญคือพันธะเอสเทอร์ (C-O-C) ซึ่งจะทนต่อการถูกย่อยสลายด้วยกรด นอกจากนี้ยังพบพันธะคาร์บอน (C-C) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายด้วยกรดหรือด่าง เป็นเหตุให้พืชที่มีลิกนินมาก จะมีโครงสร้างที่แข็งแรงมาก ลิกนินเป็นส่วนที่แทรกอยู่ระหว่างเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และเพคตินในผนังเซลล์ เป็นส่วนประกอบของเปลือก ชัง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วน โคนต้นไปสู่อยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย (Mohr, 1995)

2.2 น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)

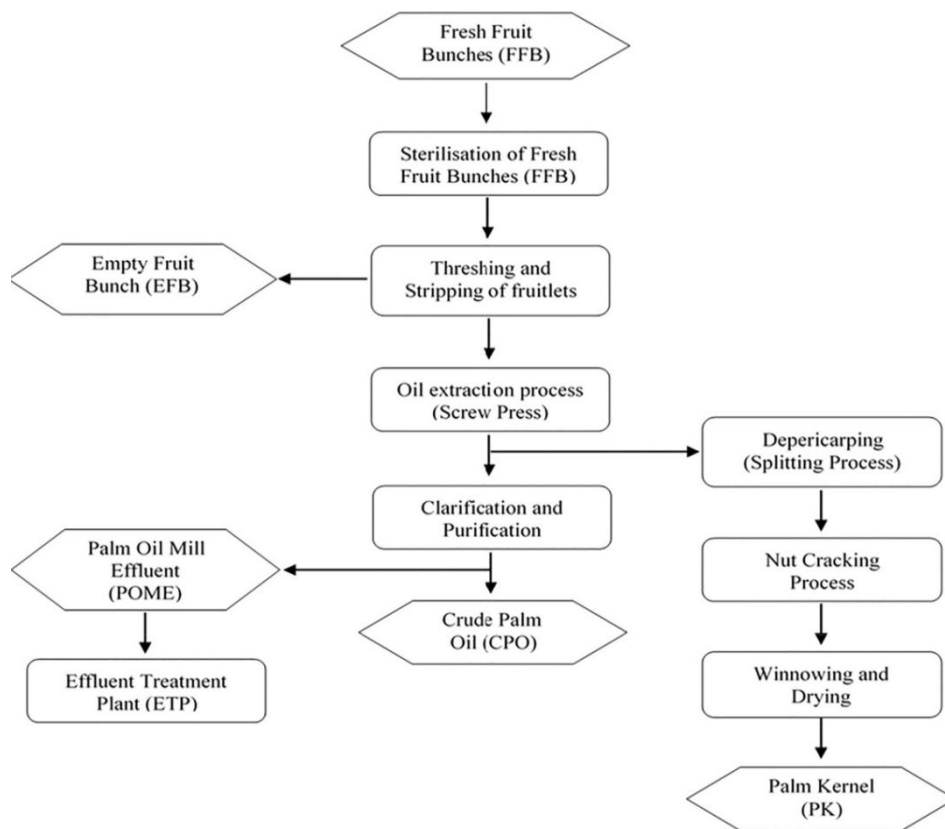
น้ำมันปาล์มถูกสร้างขึ้นจากเนื้อเยื่อชั้นกลางของผลปาล์ม (mesocarp) ซึ่งคิดเป็น 70-80% ของผลปาล์ม (รูปที่ 1) ซึ่งผลปาล์มนั้นมีน้ำมันจากเมล็ดประมาณ 10% และน้ำมันจากส่วนที่ไม่ใช่เมล็ดอีก 90% (Cheong *et al.*, 2014) น้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์ 93-95% และกรดไขมันอิสระ 2.3-6.7% (Muppaneni *et al.*, 2013)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของผลปาล์ม

ที่มา: ดัดแปลงจาก <https://amj.co.id/en/products>

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil extraction process หรือ milling process) ที่นิยมกันแพร่หลายในปัจจุบันคือ กระบวนการสกัดแบบเปียกดังแสดงเป็นแผนผังในรูปที่ 2 เริ่มตั้งแต่การนำผลปาล์มทั้งทะลายมาล้างด้วยไอน้ำ จากนั้นสกัดผลปาล์มออกมา เข้าเครื่องบีบแบบสกรู โดยที่กะลาไม่แตก เมื่อนำน้ำมันที่หีบได้มาทำบริสุทธิ์จะได้น้ำมันปาล์มดิบและน้ำทิ้ง (palm oil mill effluent, POME) ในส่วนของผลปาล์มที่หีบเสร็จแล้วจะนำไปแยกเปลือกและกะลาต่อไป



รูปที่ 2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

ที่มา: [Panapanaan และคณะ \(2009\)](#) อ้างโดย Baker และคณะ (2018)

2.2.1 แหล่งของน้ำมันในผลปาล์มน้ำมัน

ปาล์มทะลายสด (fresh fruit bunch, FFB) เป็นผลผลิตจากต้นปาล์มซึ่งประกอบด้วย ทะลายเปล่า (empty bunch) และผลปาล์ม (fruit) ส่วนของชั้นเปลือก (mesocarp) คิดเป็น 70-80% ของผลปาล์ม ถัดจากชั้นเปลือกจะมีกะลา (shell) หุ้มเมล็ดใน (endocarp) อยู่

น้ำมันปาล์ม (palm oil) ได้จากผลปาล์ม 2 ส่วนคือ

1. จากเปลือกหุ้มภายนอก (mesocarp) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเนื้อผลปาล์ม (palm oil) ซึ่งมีประมาณ 45-50% ของเปลือกหุ้มภายนอก โดยเกือบทั้งหมดจะเป็นน้ำมันชนิดอิมตัว
2. จากเนื้อในของเมล็ด (palm kernel) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) ซึ่งมีความอิมตัวประมาณ 81% (อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ, 2553)

2.2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียก

ขั้นตอนและกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม มีกระบวนการผลิต 4 ขั้นตอน คือ เริ่มต้นด้วยการรับและการเก็บรักษาผลปาล์ม โดยเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวและทำการขนส่งเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการนึ่งผลปาล์ม ในระหว่างการขนส่งต้องระมัดระวังเรื่องความเสียหายที่จะก่อให้เกิดผลปาล์มมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากเกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid ; FFA) (Ahmed *et al.*, 2015) รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆมีดังนี้

1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) โดยการอบที่อุณหภูมิ 130 ถึง 135 องศาเซลเซียส ใช้ความดัน 2.5 ถึง 3 Bars ระยะเวลา 50 ถึง 75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ที่ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย
2. การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มที่ได้ไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด
3. การสกัดน้ำมัน (Oil Extraction) นำส่วนผลปาล์มมาผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมัน 66% น้ำ 24% และของแข็ง 10%

4. การทำบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) น้ำมันปาล์มดิบที่ได้ประกอบด้วย น้ำมันปาล์ม 35-45%, น้ำและเศษเส้นใย 45-55% จึงต้องส่งเข้าเครื่องแยก น้ำมันปาล์มดิบจะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (crude palm oil olein) ปริมาณประมาณ 30 ถึง 50% ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองส้ม (crude palm oil stearin) ปริมาณประมาณ 50 ถึง 70% หลังจากนั้นส่งไปยังถังแยกเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อไล่น้ำออก และส่งเข้าถังเก็บน้ำมันต่อไป ขั้นตอนนี้จะมีเศษกากตะกอนออกมาประมาณ 1.5 ตันต่อน้ำมันปาล์มดิบ 1 ตัน

5. การแยกเส้นใย (depericarping and nut fiber separation) สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ดและนำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งโดยให้มีความชื้นไม่เกิน 7% จากนั้นบรรจุลงในกระสอบเพื่อรอจำหน่าย ใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือหีบน้ำมันต่อไป

6. การแยกเมล็ดและการอบแห้ง (separation of kernels and drying) เมล็ดปาล์มจะถูกแยกออกจากเปลือกหุ้มด้วยเครื่องไฮโดรไซโคลน โดยอาศัยความแตกต่างของแรงโน้มถ่วงเฉพาะ (specific gravity; SG) น้ำเสียที่เหลือจะถูกปล่อยออกมา ได้แก่ น้ำเสียไฮโดรไซโคลน ประมาณ 0.1 ตันต่อตันการผลิตน้ำมันปาล์ม (Ahmed *et al.*, 2015)

2.3 น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

POME ประกอบด้วยน้ำ 95-96%, ของแข็งทั้งหมด 4-5%, ของแข็งแขวนลอย 2-4% และน้ำมัน 0.6-0.7% (Sharifudin *et al.*, 2015) ของแข็งหรือของแข็งแขวนลอยต่างๆ ได้แก่ ผงนังเซลล์ เส้นใยสั้นๆ คาร์โบไฮเดรตคือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ไปจนถึงน้ำตาล โปรตีน กรดอะมิโน ส่วนประกอบของสารอินทรีย์และแร่ธาตุ (Ugoji, 1997) จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน จะมีน้ำทิ้งออกมาในปริมาณมาก ส่วนใหญ่จะมาจาก 2 ขั้นตอน คือน้ำนึ่งปาล์ม หรือน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ (sterilizer condensate) และน้ำทิ้งจากเครื่องดีแคนเตอร์ หรือเครื่อง separator ก่อนจะไปรวมเป็นน้ำทิ้งรวมในบ่อบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย มีกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมที่ค่อนข้างเข้มงวด โดยมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งของประเทศมาเลเซียแสดงในตารางที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามหลายๆ โรงงานยังคงไม่

สามารถปฏิบัติตามกฎระเบียบในการระบายน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐาน ส่งผลให้เกิดมลพิษในแม่น้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำทิ้งที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย

Parameter limits for POME discharge into watercourses in Malaysia (Laws of Malaysia, 1994).						
Parameters ^a	Limits according to periods of discharge					
	1-7-1978– 30-6-1979	1-7-1979– 30-6-1980	1-7-1980– 30-6-1981	1-7-1981– 30-6-1982	1-7-1982– 31-12-1983	1-1-1984 and thereafter
BOD ₃ ^b	5000	2000	1000	500	250	100
COD	10,000	4000	2000	1000	–	–
Total solids	4000	2500	2000	1500	–	–
Suspended solids	1200	800	600	400	400	400
Oil and grease	150	100	75	50	50	50
Ammoniacal nitrogen	25	15	15	10	150 ^c	150 ^c
Total nitrogen	200	100	75	50	300 ^c	200 ^c
pH	5.0–9.0	5.0–9.0	5.0–9.0	5.0–9.0	5.0–9.0	5.0–9.0
Temperature	45	45	45	45	45	45

a All parameters are in units of mg/l with the exception of pH and temperature (°C).

b The sample for BOD analysis is incubated at 30 °C for 3 days.

c Value of filtered sample.

ที่มา: Wu และคณะ (2010)

2.3.1 น้ำทิ้งจากขั้นตอนการฆ่าเชื้อ

ขั้นตอนแรกในการฆ่าเชื้อประกอบด้วย ผลปาล์มสดฆ่าเชื้ออบไอน้ำ 50 นาทีที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียสและความดันของ 3×10^5 Pa เพื่อให้ผลปาล์มหลุดออกจากขั้วได้ง่าย ปริมาณน้ำทิ้งที่ออกมา (น้ำทิ้งจากเครื่องคอนเดนเสท) จะมีปริมาณประมาณ 0.9 ตันต่อน้ำมันปาล์มดิบที่ได้ 1 ตัน (Wu *et al.*, 2010)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ POME ในส่วนของไอน้ำกลั่นตัวจากหม้อนิ่งฆ่าเชื้อ (sterilizer condensate), น้ำเสียจากการตกตะกอน (clarification wastewater) และน้ำเสียจากไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone wastewater)

Parameter	Sterilizer condensate	Clarification wastewater	Hydrocyclone wastewater
Chemical oxygen demand (COD) (mg/L)	47,000	64,000	15,000
Biochemical oxygen demand (BOD, 30 °C) (mg/L)	23,000	29,000	5,000
Dissolved solid (DS) (mg/L)	34,000	22,000	100
Suspended solid (SS) (mg/L)	5,000	23,000	7,000
Total nitrogen (TN) (mg/L)	500	1,200	100
Ammoniacal nitrogen (mg/L)	20	40	–
Oil and grease (mg/L)	4,000	7,000	300
pH	5	4.5	–

ที่มา: Ahmed และคณะ (2015)

2.3.2 น้ำทิ้งจากขั้นตอนการสกัดและการย่อย

วัตถุประสงค์ของการสกัดเพื่อแยกผลปาล์มที่ผ่านการฆ่าเชื้อออกจากทะเลาะ โดยใช้เครื่องหมุนนวดทะเลาะ ทะเลาะเปล่าจะถูกแยกออกและลำเลียงไปยังที่ดิน สวน ไร่ เพื่อใช้เป็นปุ๋ย หรือเผาให้เป็นถ่านเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ส่วนผลปาล์มจะถูกย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม โดยให้ความร้อนในเครื่องที่มีอุณหภูมิประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส เพื่อให้คลายตัวและส่วนเปลือกและเนื้อแยกออกจากส่วนเมล็ดหรือกะลา และเข้าสู่การบีบอัดน้ำมัน น้ำมันจะถูกแยกออกจากส่วน

เนื้อเยื่อชั้นใน (mesocarp) และเมล็ด น้ำมันปาล์มดิบที่สกัดมาจากเครื่องย่อยผลปาล์มจะมีการควบคุมปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน การทำให้น้ำแยกออกจากน้ำมันดิบสามารถทำได้โดยการตกตะกอนและเหวี่ยงแยกเนื่องจากน้ำมันนั้นไม่ละลายน้ำ และกากตะกอนจะถูกแยกออกไปทางด้านล่าง ซึ่งมีปริมาณประมาณ 1.5 ตันต่อการผลิตน้ำมันปาล์ม 1 ตัน คุณสมบัติของกากตะกอนแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของแข็งของกากตะกอนนั้นมีปริมาณสูงกว่าของเสียจากขั้นตอนอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนที่สูงขึ้นขององค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ

2.3.3 น้ำทิ้งจากขั้นตอนการแยกเมล็ดปาล์มและการทำแห้ง

ขั้นตอนการแยกเส้นใยในหลังการบีบอัดผลปาล์มเพื่อสกัดน้ำมันปาล์มจากเส้นใย กากเส้นใยเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแยกเส้นใย การแยกเส้นใยสามารถทำได้โดยวิธีกลหรือการใช้กระแสอากาศ น้ำมันดิบที่สกัดออกมานั้น ประกอบด้วยน้ำซึ่งไม่บริสุทธิ์ มีส่วนของของแข็งที่ไม่ละลายปะปนอยู่ สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการตั้งทิ้งไว้หรือการหมุนเหวี่ยง น้ำที่ปะปนอยู่ในน้ำมันจะแยกออกมาอยู่ส่วนล่าง และถูกกำจัดออกไปยังถังแยกกากตะกอน ซึ่งมีประมาณ 1.5 ตันของกากตะกอนของเสีย

POME เป็นน้ำที่มีส่วนผสมของคอลลอยด์หนา มีสีน้ำตาล มีน้ำมันและของแข็งปะปนอยู่ อุณหภูมิสูงถึง 80-90 องศาเซลเซียส และมีค่าบีโอดีสูงมาก ซึ่งจัดว่าเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรก หนาเสียว และมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 4.5 (Wu *et al.*, 2010) ดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะทั่วไปของ POME

ตารางที่ 4 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME)

Parameter	Concentration range	Element	Concentration range (mg/l)
pH	4.15–4.45	Phosphorus	94–131
COD (mg/l)	45500–65000	Potassium	1281–1928
Soluble COD (mg/l)	20500–24500	Magnesium	254–344
BOD (mg/l)	21500–28500	Calcium	276–405
Total solid (mg/l)	33790–37230	Manganese	2.1–4.4
Total volatile solid (mg/l)	27300–30150	Iron	75–164
Suspended solid (mg/l)	15660–23560	Zinc	1.2–1.8
Total dissolved solid (mg/l)	15500–29000	Copper	0.8–1.6
Oil and grease (mg/l)	130-18000	Chromium	0.05–0.43
Total nitrogen (mg/l)	500–800	Cobalt	0.04–0.06
Ammoniacal nitrogen (mg/l)	4-80	Cadmium	0.01–0.02
Temperature (°C)	80-90		
Colour (ADMI)	>500		
Cellulose (g/l)	0.25-8.0		
Lignin (g/l)	2.90-7.89		

ที่มา: Teoh และ Mashitah (2010)

2.4 วิธีการแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

2.4.1 รูปแบบของน้ำมันในน้ำ

สถานะของน้ำมันและไขมันในน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. น้ำมันละลายน้ำ โดยทั่วไปมักคิดกันว่า น้ำมันไม่เข้ากับน้ำ หรือน้ำมันไม่ละลายน้ำ แท้จริงแล้ว น้ำมัน สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมันไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้ง่าย (น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) มักละลายน้ำได้ดี โมเลกุลที่ไม่อึดตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีนจะละลายได้ดี เช่น น้ำมันเบนซีน สามารถละลายน้ำได้ถึง 1,650 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันละลายน้ำมักมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่อาจรับรู้ได้ เช่นการไต่กลิ่น เป็นต้น

2. น้ำมันลอยบนผิวน้ำ เป็นน้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่ก็มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงเป็นเรื่องปกติที่จะพบว่ามีน้ำมันลอยอยู่เหนือผิวน้ำเป็นฝ้าหรือเป็นฟิล์ม ซึ่งขวางกั้นการถ่ายเทออกซิเจนหรือบั้งแสง

3. น้ำมันในรูปอิมัลชัน เป็นน้ำมันที่อยู่ในรูปอนุภาคขนาดเล็กคล้ายคอลลอยด์ ดังนั้นจึงมองเห็นเป็นความขุ่นในน้ำ น้ำมันละลายน้ำหรือน้ำมันลอยน้ำอาจกลายเป็นอิมัลชันได้เมื่อถูกกระทำด้วยแรงภายนอก เช่นแรงสับจากเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น และถ้าในน้ำมีสารประเภทสารลดแรงตึงผิว (Detergent) จะทำให้น้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันเพิ่มขึ้นอิมัลชันแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

(1) อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion, O/W) มีน้ำมันเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น นม (milk) ซอสสังเกต หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำ มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) สูงกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำ (water soluble dye)

(2) อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion, W/O) มีน้ำเป็นวัฏภาคภายใน และน้ำมันเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น เนย (butter) มายองเนส (mayonnaise) น้ำสลัด (salad dressing) ไส้กรอก (sausage) ซอสสังเกต หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำมัน มีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ต่ำกว่า ผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำมัน (oil soluble dye) (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ, 2010)

2.4.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีทางกายภาพ

2.4.2.1 การตกจม (Normal settling)

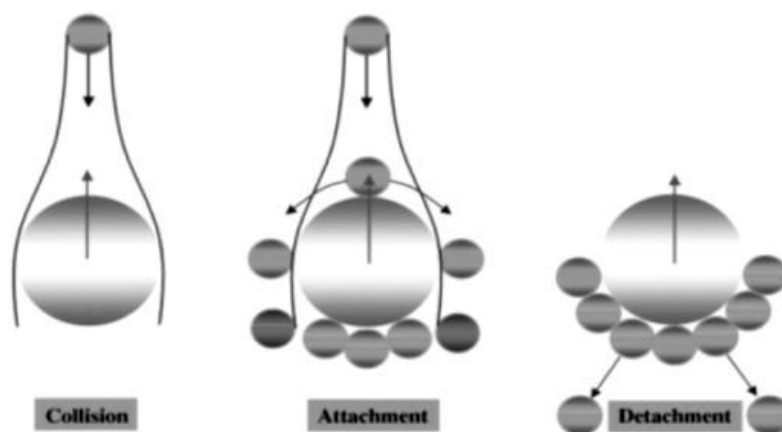
การตกจมเป็นกระบวนการแยกส่วนของอนุภาคของแข็งหรือคอลลอยด์ออกจากของเหลวโดยวิธีทางธรรมชาติ อาศัยความต่างของความถ่วงจำเพาะของของแข็งกับน้ำ อนุภาคของของแข็งจะเคลื่อนตัวลงสู่ก้นภาชนะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านขนาดและความหนาแน่นของของแข็งและคุณสมบัติทางด้านความหนาแน่นและความหนืดของของเหลว

Alrawi และคณะ (2014) รายงานการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโมเลกุลของของแข็งแขวนลอยใน POME กับการตกจมด้วยแรงโน้มถ่วงโลก โดยการตั้ง POME ให้ตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงโลกเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง แยกส่วนใสและตะกอนออกจากกันและนำไปแช่แข็งให้แข็งเพื่อหาปริมาณน้ำมันจากตะกอนโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ชั่งน้ำหนักอนุภาคของแข็งโดยร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องตะแกรงต่างกันจากใหญ่ไปเล็ก คือ จาก 1,400, 1,000, 800, 500, 250, 125, 63, 48 และ 20 ไมโครเมตร เป็นเวลา 20 นาที และชั่งน้ำหนักของอนุภาคในแต่ละตะแกรง จากนั้นหาความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งของแต่ละขนาด ผลการทดลองพบว่าขนาดของของแข็งและความหนาแน่นนั้นมีความสัมพันธ์กันในเรื่องของพฤติกรรมการตกจม โดยเหตุผลแรกพบว่าเมื่อน้ำทิ้งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อนุภาคของแข็งที่มากขึ้นนี้จะกีดขวางกันเอง ทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ช้าลง เหตุผลที่สองพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งในปริมาณมากนี้จะปิดกั้นการเคลื่อนที่ขึ้นของส่วนที่เป็นของเหลว อนุภาคเหล่านี้จึงใช้เวลามากขึ้นในการตกจม

2.4.2.2 กระบวนการลอยตัวด้วยฟองอากาศ (Bubble flotation)

จัดเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเพื่อแยกแร่ธาตุส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำที่ผสมกันเป็นอิมัลชันออกจากกัน เช่น การแยกหมึกออกจากกระดาษรีไซเคิล การบำบัดน้ำทิ้งและการแยกน้ำมันด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยฟองอากาศเป็นกระบวนการที่ใช้ความสามารถของฟองอากาศที่ใช้ในการเกาะติดกับพื้นผิวของอนุภาคสารอินทรีย์และลอยขึ้นสู่ชั้นผิวน้ำพร้อมกับฟองอากาศ ซึ่งความสามารถในการแยกอนุภาคสารอินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้าสัมผัสระหว่างอนุภาคของฟองอากาศและสารอินทรีย์ โดยฟองอากาศควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ในขณะที่ขนาด

ของอนุภาคสารอินทรีย์ควรมีขนาดประมาณ 50 ถึง 600 ไมครอนหรือเล็กกว่า (Sarhan *et al.*, 2016) ดังนั้นการสัมผัสกันระหว่างหยดน้ำมันและฟองอากาศจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 3 กระบวนการย่อย 3 กระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันขณะฟองอากาศลอยตัวเพื่อจับอนุภาคแขวนลอยในของเหลว

ที่มา: [Tao \(2005\)](#)

การจับกับอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำของฟองอากาศอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งเป็นพื้นฐานของการลอยตัวด้วยฟองอากาศเพื่อแยกอนุภาคสารอินทรีย์นั้นแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การชน, การยึดติด และการแยกออก ดังรูปที่ 3 ซึ่งการลอยตัวด้วยฟองอากาศสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ ดังนี้

(1) การลอยตัวแบบการอัดอากาศให้อิ่มตัวในของเหลว (dissolved air flotation; DAF) เป็นการทำให้น้ำอิ่มตัวด้วยอากาศอัดภายใต้ความดัน แล้วปล่อยให้ปลดความดันในระบบน้ำทิ้ง ทำให้เกิดฟองอากาศในระบบ เป็นกระบวนการที่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันซึ่งไม่สามารถตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงได้เอง เนื่องจากหยดน้ำมันมีความสามารถในการตกตะกอนต่ำ กระบวนการ DAF จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความแตกต่างการลอยตัวของหยดน้ำมัน โดยการใช้ฟองอากาศเล็กๆ (ขนาดต่ำกว่า 100 ไมโครเมตร) เข้าจับตัวกับหยดน้ำมัน

Karhu และคณะ (2014) รายงานการทดลองโดยเริ่มจากนำน้ำทิ้งสังเคราะห์ คือ น้ำมันมอเตอร์, น้ำมันโซ่ และน้ำ มารวมกันเป็นน้ำทิ้งสังเคราะห์ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการทดลอง

ใช้ Cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB (ความบริสุทธิ์ 99%) เป็นสารลดแรงตึงผิว และ PolyDADMAC, polydiallyldimethylammonium chloride ความเข้มข้น 40% เป็นสารช่วยตกตะกอน ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยวิธี DAF ได้รับการประเมินโดยการวัดค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และค่าประจุพื้นผิวทั้งหมด (TSC) ผลการทดลองพบว่าการใช้วิธี DAF ร่วมกับ PolyDADMAC มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดี โดยทำให้ลดค่าซีโอดีได้สูงสุดคือ 70% และมีปริมาณที่เหมาะสมของ PolyDADMAC คือ 200 ppm

Ng และคณะ (1988) รายงานการแยกส่วนที่เป็นของเหลวออกจากของแข็งในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยมีการควบคุมแรงดันอากาศ อัตราการบรรทุกของแข็งแขวนลอย อัตราน้ำล้นผิว อัตราการให้อากาศ และความต้องการสารตกตะกอน จากนั้นเปรียบเทียบโดยใช้แรงดันอากาศต่ำและสูงที่ต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ฟองอากาศขนาดเล็กส่งผลในการแยกส่วนของเหลวออกจากของแข็งได้ดี อัตราการแยกของสารแขวนลอยเพิ่มมากขึ้น คุณภาพของน้ำทิ้งจะเสื่อมมากหากมีการเพิ่มขึ้นของสารแขวนลอยมากกว่า 1650 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

Rattanapan และคณะ (2011) ศึกษาการใช้กระบวนการ DAF ร่วมกับการการใช้สารส้มตกตะกอน และเติมกรด โดยอันดับแรกนำน้ำทิ้งจากการผลิตไบโอดีเซลมาเติมกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 1, 3, 5, 6 และ 7 จากนั้นหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ เมื่อครบกำหนดเวลานำไปตรวจหาปริมาณไขมันและค่าอื่นๆ อันดับสอง เติมสารช่วยตกตะกอนชนิดต่างๆ คือ สารส้ม (alum) สารตกตะกอน PAC และสารตกตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ปริมาณต่างๆคือ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 กรัมต่อลิตร เพื่อหาสารตกตะกอนและปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสม โดยหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ เมื่อครบกำหนดเวลานำไปตรวจหาปริมาณไขมันและค่าอื่นๆ อันดับสุดท้าย นำน้ำทิ้งที่ผ่านการเติมกรดและเติมสารตกตะกอนเข้าสู่กระบวนการ DAF แบบเต็มและแบบรีไซเคิลที่ความดันและระยะเวลาการให้อากาศที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชต่ำลง ขนาดของหยดน้ำมันจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากกรดที่เพิ่มขึ้นทำให้ผิวที่หยดน้ำมันเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุ หยดน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงมีความสามารถในการรวมตัวกันได้มากขึ้น ส่งผลให้

หยคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้ โดยพีเอชที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 3 และในช่วงวันที่ 1 จะสามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะสามารถกำจัดได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำมันคือ 1-3 วันเพราะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงและใช้เวลาน้อยที่สุด สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ สารส้ม ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร และกระบวนการ DAF คือแบบรีไซเคิลเพราะแก้ปัญหาเรื่องการอุดตันของกากน้ำมันได้

(2) การลอยตัวแบบกระจายฟองอากาศ (dispersed air flotation) เป็นระบบการให้อากาศเข้าสู่ น้ำที่ตรง โดยใช้ diffuser ที่มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่บริเวณก้นถัง มีการอัดอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศมีให้มวลฟองลอยละเอียดมาก ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กมาก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 75-655 μm) จำนวนมากกระจายเข้าสู่ระบบ

Sato และคณะ (1980) รายงานการทำการทดลองโดยเตรียมน้ำเสียที่มีอนุภาคน้ำมันที่มีอนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 μm เติมสารละลายไฮโดรคลอริกเพื่อปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 4 การกำจัดน้ำมันดำเนินการเป็น 2 แบบ คือ แยกโดยใช้การลอยตัวแบบกระจายฟองอากาศ และแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า คอลัมน์มีความสูง 0.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 65 มิลลิเมตร ความลึกของของเหลวคงที่ 32 เซนติเมตร ในการแยกโดยการกระจายฟองอากาศจะใช้ก๊าซไนโตรเจนแทนอากาศทั่วไป ในโตรเจนจะถูกทำให้เป็นฟองโดยผ่านรูพรุนที่มีขนาดแตกต่างกันไปในช่วง 0.1-0.5 เซนติเมตร น้ำมันที่เหลือจะได้รับการวิเคราะห์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ส่วนการใช้กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดฟองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 μm ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากขั้วไฟฟ้า ทองคำ วจรไฟฟ้าจะดำเนินการผลิตฟองเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะปล่อยฟองเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 3 นาที ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำซ้ำทั้งหมด 12 รอบ และวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำมันที่เหลือ ผลการวิเคราะห์ของวิธีการลอยตัวด้วยการกระจายฟองอากาศเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าความเข้มข้นของน้ำมันลดลง 80% ของค่าเริ่มต้น ส่วนวิธีการแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้าพบว่าสามารถลดความเข้มข้นของน้ำมันได้สูงสุด 60% จึงสรุปได้ว่า วิธีการกำจัดน้ำมันโดยการกระจายฟองอากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันได้ดีกว่าการกำจัดน้ำมันด้วยกระแสไฟฟ้า

(3) การลอยตัวแบบการเหนี่ยวนำอากาศ (Induced Air Flotation ; IAF) เป็นระบบการแยกน้ำมันหรือของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำที่ตรง โดยการชักนำอากาศภายนอกให้เข้ามาเกิดฟองลอยอยู่ในน้ำ กระบวนการนี้สามารถทำได้โดยเมื่อมีการลดความดันของของเหลว และมีช่อง

เชื่อมต่อกับอากาศภายนอก ทำให้เกิดการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับน้ำที่ภายในถัง เกิดฟองอากาศกระจายในน้ำที่ ฟองอากาศขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 700-1500 ไมโครเมตร) จะเข้าจับกับสารแขวนลอย ทำให้แรงตึงผิวลดลง เกิดความหนาแน่นที่ต่างกันอย่างรวดเร็วและเกิดการแยกชั้นตามมา จึงทำให้สารแขวนลอยลอยตัวไปยังพื้นผิวของน้ำ เทคนิคการลอยตัวของฟองอากาศเหนียวนำถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำที่มาจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเคมีและโรงงานเคมี, โรงงานแปรรูปก๊าซธรรมชาติและโรงงานอุตสาหกรรมที่คล้ายกัน (Painmanakul *et al.*, 2010) การลอยตัวแบบการเหนียวนำอากาศสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ แบบเวนจูรี่ (venture tube) เป็นการบีมน้ำผ่านท่อเวนจูรี่ ซึ่งจะมีคอคอดให้อากาศผ่านเข้าไปได้ เมื่อน้ำผ่านท่อเวนจูรี่จะเกิดความดันตกที่บริเวณคอคอดของท่อเวนจูรี่ ทำให้อากาศรอบๆบริเวณนั้นถูกดูดเข้ามายังท่อเวนจูรี่ ส่งผลให้ภายในท่อมีอากาศผสมกับน้ำ ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากภายในถัง และแบบเชิงกล (mechanical-type) เป็นการใช้มอเตอร์หมุนใบพัด ทำให้น้ำในถังลดระดับลงและดูดเอาอากาศบริเวณรอบๆแกนใบพัดเข้ามาแทนที่น้ำ จึงทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก

Painmanakul และคณะ (2010) ได้ศึกษาระบบ IAF โดยใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 เมตรและสูง 2 เมตร ใช้น้ำที่สังเคราะห์ที่สร้างขึ้นจากส่วนผสมของน้ำประปา 10,000 มิลลิกรัม / น้ำมันปาล์ม 1 ลิตร จากนั้นกวนผสมที่ 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ผลการวิจัยพบว่า การใช้กระบวนการ IAF มีประสิทธิภาพมากถึง 60-80% เมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด 99% โดยมีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 8-10 และใช้สารส้มในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 800 และ 1,400 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของก๊าซที่ดีที่สุดคือ 5 มิลลิตรต่อวินาที

ชาญชล นานันต์ และ นภัสสร วงศ์เขื่อนแก้ว (2557) ศึกษาการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศระบบถังคู่ โดยถังแรกจุน้ำได้ 209 ลิตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง 57 เซนติเมตร สูง 82 เซนติเมตร) และถังที่สองจุน้ำได้ 204 ลิตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง 57 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร) มีความจุน้ำที่รวมทั้งสองถังถึง 413 ลิตร นำน้ำที่เข้าสู่ชุดถังแยกเปิดปั๊มเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบการปรับอัตราการไหล 19.2, 27.0, 30.6 และ 35.4 ลิตรต่อวินาที ผลผลิตฟองอากาศโดยสูบน้ำที่จากถังที่สองให้ไหลผ่านหัวฉีดแบบเจตที่วางอยู่ในถังที่หนึ่ง เพื่อสร้างแรงดูดสุญญากาศในหัวฉีดเพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้ามากระจายตัวเป็นฟองอากาศในถังที่

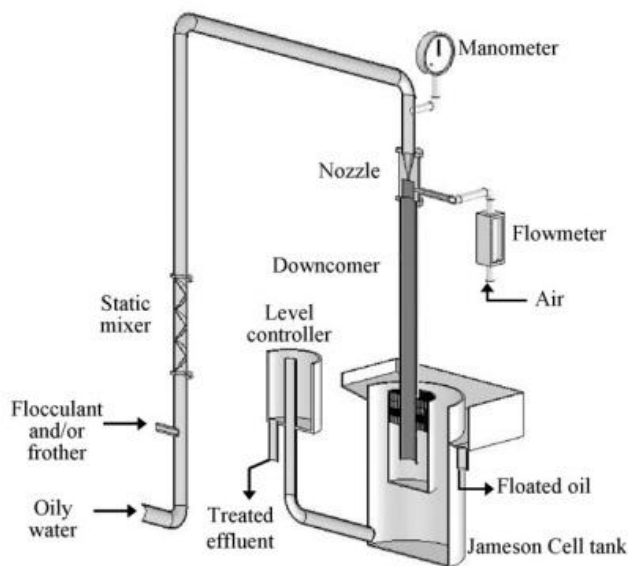
หนึ่ง จากนั้นปล่อยให้ฟองอากาศและน้ำทิ้งไหลล้นจากถังที่หนึ่งไปยังถังที่สองแล้วจึงไหลวนกลับเข้าสู่เครื่องสูบลูกเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังก่อนหมายเลข 4 โดยเก็บทุกๆ 15 นาทีในช่วงแรก ทุกๆ 30 นาทีในช่วงที่ 2 และ 3 และทุกๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงที่ 4, 5 และ 6 จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า ค่าของแข็งทั้งหมดและสารแขวนลอยสามารถกำจัดออกได้ในช่วง 15 นาทีแรก เนื่องจากช่วงแรกในถังพักอากาศมีการไหลวนของน้ำภายในถังจากการส่งน้ำทิ้งมาจากถังให้อากาศ เมื่อเวลาผ่านไประดับน้ำในถังพักอากาศลดระดับลง ไม่มีการหมุนวนของน้ำทิ้งในถัง ทำให้ของแข็งมีการตกจมสู่ก้นถังซึ่งเป็นบริเวณที่เก็บตัวอย่าง ค่าพีเอชในน้ำทิ้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเริ่มต้นมากนัก คือ 3.5-5 เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถละลายในน้ำได้ จึงไม่เกิดการคาร์บอนิกซึ่งมีความเป็นกรดอ่อน ส่วนค่าซีโอดีค่อนข้างคงที่ เนื่องจากบริเวณที่เก็บตัวอย่างอยู่ด้านล่างของถังซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนการวิเคราะห์ค่าปริมาณไขมันในน้ำทิ้งพบว่า ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกไขมันจะมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากน้ำที่สูบลูกในช่วงแรกๆ ยังผสมเป็นน้ำเนื้อเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปไขมันจากน้ำทิ้งจะสามารถแยกน้ำมันได้มากขึ้น และเมื่อทำการหาค่าประสิทธิภาพโดยรวมในการแยกน้ำมันของแต่ละอัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 27.0 ลิตรต่อนาที สามารถแยกน้ำมันออกมาได้มากที่สุดคือ 72.28% รองลงมาคือที่อัตราการไหล 30.6 19.2 และ 35.4 ลิตรต่อนาที แยกน้ำมันออกมาได้ 58.85% 23.57% และ 21.52% ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการไหลต่ำ 19.2 ลิตรต่อนาที จะผลิตฟองอากาศขนาดใหญ่ บาง ทำให้แตกได้ง่าย ไม่สามารถนำโมเลกุลของน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันได้น้อย ในขณะที่อัตราการไหลที่ 27.0 ลิตรต่อนาที จะผลิตฟองอากาศได้ขนาดเล็กกว่า มีความแข็งแรงกว่า มีการเกาะตัวของฟองอากาศมาก จึงมีโอกาสในการจับกับโมเลกุลของน้ำมันได้มาก จึงสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งได้ดีที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศสูงขึ้น ทำให้ฟองอากาศความเร็วมากขึ้น ไม่สามารถเกาะที่ผิวของน้ำมันได้ทัน จึงไม่ทำให้น้ำมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้ดี ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันจึงลดลง

Muhammad และคณะ (2016) รายงานการบำบัด POME ด้วยวิธีลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวนำร่วมกับเมมเบรน คือใช้เคลอรินโพลีเอทิลีน (PE) ร่วมกับการลอยตัวของอากาศ โดยใช้ถังที่ทำจากแก้ว มีการกั้นแยกออกเป็นหลายห้อง น้ำทิ้งจากห้องที่ 1 จะไหลไปสู่ห้องที่ 2 และห้องถัดไป ห้องที่ 1 และ 2 จะถูกอัดลมเพื่อให้สารแขวนลอยที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

และน้ำมันที่ปะปนอยู่ในน้ำทิ้งถูกแยกออกจากกัน ของแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวจะตกตะกอนในห้องที่ 3, 4 และ 5 ด้วยแรงโน้มถ่วง ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 3, 4 และ 5 วัน โดยไม่มีการเติมอากาศเพิ่ม อัตราการไหลของอากาศที่ลอยอยู่ที่ 11, 8 และ 5 ลิตรต่อนาที จากนั้นจึงส่งเข้าสู่การกรองด้วยแผ่นเมมเบรนเคลอริน โพลีเอทิลีนที่มีขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าค่าซีไอลดลงมากที่สุดในวันที่ 5 ด้วยอัตราการให้อากาศ 8 ลิตรต่อนาที คือลดลง 36.1% ของแข็งแขวนลอยลดลงมากที่สุดในวันที่ 5 ด้วยอัตราการให้อากาศ 11 ลิตรต่อนาที คือลดลง 86.4% และน้ำมันและไขมันลดลงมากที่สุดในวันที่ 5 ด้วยอัตราการให้อากาศ 11 ลิตรต่อนาที คือลดลง 52.6% และเมื่อทดลองนำน้ำทิ้งวันที่ 5 ที่ได้รับอัตราการไหลของอากาศ 5 และ 11 ลิตรต่อนาทีมากรองผ่านเมมเบรน พบว่าค่าซีไอลดลงได้มากที่สุด 91.1 และ 97.0% ตามลำดับ ของแข็งแขวนลอยลดลงได้มากที่สุด 98.0 และ 93.9% ตามลำดับ และค่าน้ำมันและไขมันลดลงได้มากที่สุด 99.5 และ 99.9% ตามลำดับ

Gu และคณะ (2004) ทำการทดลองแยกขางมะตอยออกจากน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนียวภายใต้อุณหภูมิต่างกัน คือ 22, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และวัดขนาดและความเร็วของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการลอยตัวด้วยฟองอากาศที่แตกต่างกัน โดยจากการทดลองฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.23 มิลลิเมตร ในสารละลายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนั้นมีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 40.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนในสารละลายที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสนั้นมีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 28.1 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิจึงมีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ คือ อุณหภูมิที่ลดลงนั้นจะส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศลดลง

Santander และคณะ (2011) ได้เสนอรูปแบบชุดแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งแบบต่อเนื่องโดยวิธี IAF และมีการเติมสารตกตะกอนลงในน้ำทิ้งที่มีน้ำมันเจือปนและให้ทั้งหมดไหลผ่านท่อผสมแบบสถิต (static mixer) จากนั้นไหลเข้าสู่หัวฉีดดูดอากาศ และถังลอยตัว น้ำมันที่แยกได้จะลอยขึ้นออกทางปากถัง ส่วนน้ำทิ้งที่มีน้ำมันน้อยจะไหลออกทางก้นถัง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างระบบการแยกน้ำมันจากน้ำเสียที่มีน้ำมันเจือปนด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศ
เหนียวหนา

ที่มา: Santander และคณะ (2011)

ระบบ IAF ของ Santander และคณะ (2011) ประกอบด้วยท่อทางเข้าสำหรับน้ำทิ้งที่มีน้ำมันเจือปน (oily wastewater) ถัดมาเป็นช่องเติมสารก่อการเกิดฟอง (frother) หรือสารก่อการจับกลุ่ม (flocculants) ถัดมาเป็นเครื่องผสมแบบสถิต (static mixer) ที่ติดตั้งอยู่ในท่อสำหรับผสมน้ำทิ้งที่มีน้ำมันเจือปนกับสารก่อการเกิดฟองหรือสารก่อการจับกลุ่ม เมื่อของเหลวไหลออกจากเครื่องผสมแบบสถิตจะไหลเข้าสู่หัวฉีด ที่ปลายหัวฉีดมีการลดลงของความดันของของเหลว และมีช่องต่อกับอากาศภายนอก ทำให้อากาศถูกดูดเข้ามาผสมกับของเหลวในท่อ และถูกแรงเฉือนทำให้อากาศแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กกระด้าง 100-600 ไมครอน ไหลไปพร้อมน้ำเข้าสู่ท่อ down comer และออกจากปลายท่อลงสู่ถังด้านล่างเพื่อปล่อยให้ฟองอากาศลอยตัวจับกับอนุภาคน้ำมัน น้ำมันที่ฟองอากาศจับพาลอยขึ้นด้านบนจะถูกแยกออกที่ด้านบนของถัง ส่วนน้ำที่ได้จากการแยกน้ำมันจะไหลออกจากถังที่ทางออกก้นถัง โดยได้ทำการทดลองแยกน้ำมันปิโตรเลียมที่ปะปนอยู่ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ประมาณ 50-600 มิลลิกรัมต่อลิตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำมันมีขนาด 20 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องแยกน้ำมันระบบ IAF ที่ออกแบบเอง เติมสารช่วยรวมตัว polyvinyl alcohol (PVA) ลงในน้ำทิ้งสังเคราะห์ อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 1.3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เติ

ระบบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ฟองอากาศที่ถูกพ่นเข้าสู่ระบบมีขนาดประมาณ 100-600 ไมโครเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดน้ำมันได้มากถึง 85% ซึ่งอัตราการไหลของอากาศขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของน้ำมัน พบว่าสำหรับน้ำมัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของอากาศสูงสุดคือ 5 ลิตรต่อนาที และน้ำมัน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของอากาศจะเพิ่มขึ้นเป็น 10 ลิตรต่อนาที และหากอัตราการไหลสูงเกิน หยดน้ำมันจะไม่เกาะติดกับฟองอากาศ และไม่สามารถขจัดคราบน้ำมันได้

วิริศา ยอดศรี และ สุภาวดี ท้วะบัตร์ (2556) ทำการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยวิธีการ IAF โดยเก็บตัวอย่าง POME จากบ่อพักรวมและกรองเบื้องต้นเพื่อกำจัดของแข็งที่มีขนาดใหญ่ออก นำ POME 456 ลิตรเข้าสู่ถังแยกน้ำมันที่ทำจากโพลีเอทิลีนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 57 เซนติเมตร สูง 182 เซนติเมตร บีบแรงเหวี่ยงขนาด 0.5 แรงม้า อัตราการไหล 10-90 ลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างทั้ง 4 ก๊อก โดยเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เริ่มต้นที่ชั่วโมงที่ 0 เก็บก๊อกละประมาณ 120 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดเก็บตัวอย่าง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณสมบัติ โดยการวัดค่าซีไอดี พีเอช สารแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด และปริมาณน้ำมัน ผลการทดลองพบว่า POME มีค่าซีไอดีลดลง เพราะเป็นการดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่ชุดการทดลอง จึงเป็นการเติมออกซิเจนลงในถังชุดการทดลอง ค่าพีเอชของ POME มีค่าใกล้เคียงเดิมคือประมาณ 7-8 ส่วนการวิเคราะห์สารแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด และปริมาณน้ำมัน พบว่า ค่าที่ได้มีความแปรปรวนสูง เนื่องจากภายในชุดการทดลองมีการหมุนวน ทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อเฉลี่ยแล้วพบว่าสามารถแยกน้ำมันออกจาก POME ได้ 25% ในเวลา 5 ชั่วโมง อีกทั้งการทดลองพบปัญหาคือ การเกิดโฟมจำนวนมากล้นออกจากปากถัง

Wang และคณะ (2013) ศึกษาผลของรูปทรงแผ่นบัพเฟิล การดูดซับและการแยกโปรตีนจากน้ำทิ้งของกระบวนการผลิตเวย์ถั่วเหลือง โดยใช้กระบวนการลอยตัวด้วยฟองอากาศที่มีการตัดแปลงกระบอกแยก โดยกระบอกแยกสารด้วยโฟมแบบที่ 1 ใช้การติดตั้งถาดตระแกรงแนวตั้ง (vertical sieve tray, VST) กระบอกแยกสารด้วยโฟมแบบที่ 2 ใช้การติดตั้งเกลียว (spiral internal component, SIC) และกระบอกแยกสารด้วยโฟมแบบที่ 3 ติดตั้งแผ่นบัพเฟิลรูปวงกลม (circular disk internal baffles, CIB) ไว้เป็นชั้นๆในกระบอกแยก ผลการทดลองพบว่า กระบอกแยกอย่างง่ายที่มีการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลรูปวงกลมมีประสิทธิภาพ 193% กระบอกแยกที่ติดตั้งถาดตระแกร

รงแนวตั้งมีประสิทธิภาพ 100.7% และกระบอกแยกที่มีองค์ประกอบภายในเป็นเกลียวมีประสิทธิภาพ 73.4% เมื่อเทียบกับกระบอกที่ไม่มีการปรับปรุง

เมธาวิ ทองนอก และ วันดี ทองมา (2557) ทำการออกแบบและสร้างถังระบบ IAF ขนาด 200 ลิตร เพื่อแยก POME ผ่านแผ่นบัพเฟิลในระบบถังเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเพิ่มแผ่นบัพเฟิลไปในท่อแนวตั้งตามการทดลองของ Wang และคณะ (2013) ที่ใช้แผ่นบัพเฟิลในการแยกโปรตีนจากน้ำทิ้งของกระบวนการผลิตเวย์ถั่วเหลือง เพื่อให้ฟองอากาศสัมผัสกับของเหลวมากขึ้น โดยเมธาวิ ทองนอก และ วันดี ทองมา (2557) ได้เปรียบเทียบการทดลองระหว่าง 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถังแยกที่ไม่มีท่อแนวตั้งตรงกลางถัง, กรณีที่ 2 ถังแยกที่มีท่อแนวตั้งตรงกลางถัง และ กรณีที่ 3 ถังแยกที่มีท่อแนวตั้งที่ติดตั้งแผ่นกั้นไว้ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งสามกรณีใช้อัตราการไหลของอากาศคงที่ที่ 5.1 ลิตรต่อนาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมงโดยใช้ POME ที่มีปริมาณน้ำมันเริ่มต้นเฉลี่ย 4,186 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังแยกกรณีที่ 3 ที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันได้สูงสุดและปริมาณน้ำมันในน้ำทิ้งเริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาทีโดยแยกได้ 71.86% รองลงมาคือถังแยกกรณีที่ 2 ที่มีท่อแนวตั้งตรงกลางถังซึ่งแยกได้ 59.96% และถังแยกกรณีที่ 1 ที่ไม่มีท่อแนวตั้งแยกได้เพียง 2.64% แสดงให้เห็นว่าแผ่นกั้นที่ติดตั้งไว้ภายในถังแยกช่วยให้มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเพิ่มขึ้นเนื่องจากแผ่นกั้นช่วยเพิ่มเวลาที่ฟองอากาศสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันได้นานขึ้น

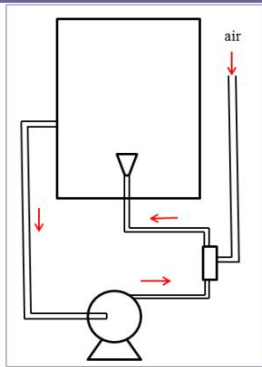
Saththasivam และคณะ (2016) ได้เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ DAF และ IAF ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆระหว่างการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำ (induced air flotation; IAF) และการลอยตัวด้วยฟองอากาศอิ่มตัว (dissolved air flotation; DAF)

Parameters	IAF	DAF
Bubble Size	100–1000 μm	10–100 μm
Generation Method	Velocity based; Entrainment and Dispersion	Pressure based, Saturation and depressurization
Bubble Generation Quantity	High	Low (limited by saturation)
Operating Conditions	Turbulent and less quiescent; multi cell configuration.	Quiescent; usually single cell configuration.
Bubble Generation Method	Entrainment and dispersion	Saturation and depressurization
Retention Time	<5 min (Wang <i>et al.</i> , 2010)	5–15 min (Al-Shamrani <i>et al.</i> , 2002)
Foot Prints	Compact (due to high residence time)	Large (due to high residence time)
Capital Cost	Low	High (large tank and saturator system)
Maintenance	Significant; due to wear and tear in Mechanical IAF and scaling in Hydraulic system	Low (non-moving parts)

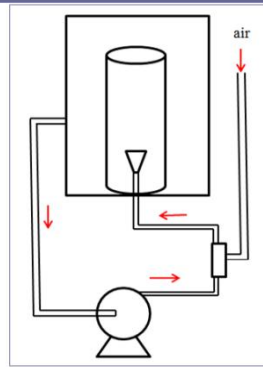
ที่มา: Saththasivam และคณะ (2016)

บรรจุน้ำเสียปริมาตร 196 ลิตร โดยกำหนดในแต่ละกรณีจะใช้ถังลักษณะดังนี้



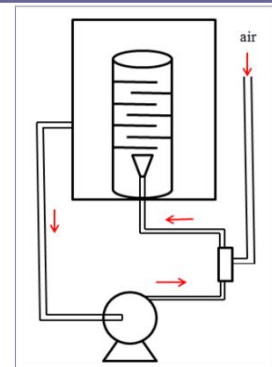
ถังแยก ไม่มีท่อแนวตั้ง (air lift tube)

ตรงกลางถัง



ถังแยกมีท่อแนวตั้ง (air lift tube) ตรง

กลางถัง



ถังแยกมีท่อแนวตั้ง (air lift tube)

ที่ติดตั้งแผ่นกั้น (baffles) ไว้ภายใน



รูปที่ 5 ชุดแยกน้ำมันจาก POME ขนาด 200 ลิตร

ที่มา: เมธาวิ ทองนอก และ วันดี ทองมา (2557)

Poh และคณะ (2014) ได้ทำการทดลองบำบัด POME ที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ 1 ลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาบำบัดด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศ โดยให้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน คือ 10.2, 19.8 และ 26.4 ลิตรต่อนาที และใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 2.5, 5, 10 และ 12.5 นาที ในการทดสอบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในแง่ของค่า BOD, COD, TSS และ O & G จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ฟองอากาศส่วนใหญ่จะมีขนาดระหว่าง 30 และ 60 ไมโครเมตร ซึ่งฟองอากาศที่ต้องการควรมีขนาดประมาณ 300 ไมโครเมตร และอัตราการให้อากาศที่ 10.2 ลิตรต่อนาที นั้นทำให้เกิดฟองอากาศอยู่ในช่วงขนาด 40-50 ไมโครเมตรเท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 12.9% ของฟองอากาศทั้งหมด และเนื่องจากการให้อากาศที่ 10.2 ลิตรต่อนาที นั้น มีอัตราการไหลของฟองอากาศที่ต่ำ และต้องใช้เวลาในการดำเนินการนาน จึงไม่ทำการทดลองและวัดผลในอัตราการให้อากาศที่ 10.2 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การให้อัตราการ

ไพลของอากาศที่ 19.8 ลิตรต่อนาที นั้น ทำให้ค่าน้ำมันและไขมันลดลงจาก 235 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 74.5% และเนื่องจากการดำเนินการภายใต้อัตราการไหลต่ำ (10.2 ลิตรต่อนาที) ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานเป็นเวลานาน จึงเริ่มทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศที่ 19.8 ลิตรต่อนาที และ 26.4 ลิตรต่อนาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า โดยทั่วไปค่า pH ของน้ำทิ้งได้รับการบำบัดหลังจากใช้วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นจาก 7.05 มาอยู่ในช่วงระหว่าง 7.33 และ 8.07 ซึ่งระดับ pH ของน้ำทิ้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น เนื่องจากเกิดการแยกตัวของโมเลกุลของน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ อีออนไฮโดรเจน [H⁺] และไฮดรอกไซด์ [OH⁻] ในสารละลายที่เป็นกลาง และมี CO₂ ละลายอยู่ปานกลาง เมื่อฟองอากาศที่มากขึ้นจะส่งผลให้ CO₂ ละลายได้น้อยลง และฟอร์มตัวเป็นไบคาร์บอเนต ทำให้มีค่า pH ที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ดีขึ้นตามลำดับ

Adlan และคณะ (2011) ทำการบำบัดน้ำทิ้งจากการชะล้างขยะต่างๆ เช่น เศษอาหาร เศษกระดาษ เศษไม้ พลาสติก สารเคมีต่างๆ แก้ว เป็นต้น ด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศ ร่วมกับการใช้สารตกตะกอน ออกแบบถังแยกซึ่งประกอบด้วย ตัวถัง คอมเพรสเซอร์ แท็งก์น้ำ ปัมป์ น้ำแรงดันสูง และหัวฉีดซึ่งออกแบบเอง จุดเก็บตัวอย่างสูงจากพื้นของถังขึ้นมา 7.5 เซนติเมตร และมีวาล์วระบายน้ำทั้งด้านล่างถึง ใช้เฟอริกคลอไรด์ FeCl₃ ในการช่วยตกตะกอน เริ่มต้นโดยการนำน้ำเสียปริมาณ 4 ลิตร ปรับค่าพีเอชและเติมเฟอริกคลอไรด์ลงไปผสมอย่างรวดเร็ว กวนด้วยความเร็ว 470 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ทำการอัดอากาศให้ภายในระบบอิมตัวเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นลดความดันเพื่อให้เกิดฟองอากาศลอยขึ้นภายในระบบเป็นเวลา 20 นาที และเก็บตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่าน้ำชะล้างขยะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงและมีอนุภาคแขวนลอยปนอยู่มาก โดยมีช่วงขนาดปกติ 0.01-1 ไมโครเมตร โดยทั่วไปอนุภาคจะมีประจุเป็นลบบนพื้นผิวของของเหลว ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5 ถึง 9 สารประกอบเฟอริกคลอไรด์จะแตกตัวเป็น Fe³⁺, Fe(OH)²⁺ และ FeOH²⁺ ทำให้อนุภาคประจุถูกทำให้เป็นกลาง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสะสมของตะกอนเป็นก้อน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้ค่าความดัน 600 กิโลปาสกาล, อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที, ปริมาณสารช่วยตกตะกอน FeCl₃ 547.66 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าพีเอช 4.88 และใช้เวลาในการอัดอากาศเข้าสู่ระบบ 98 วินาที และส่งผลให้ขจัดความขุ่น, ค่าซีโอดี, สี และแอมโมเนีย ลดลงเท่ากับ 53, 72, 94

และ 43% ตามลำดับ ซึ่งโดยรวมความดันและอัตราการไหลนั้นถือว่ามีความสำคัญน้อยในการกำจัดมลพิษ แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยทั้งสองนี้ยังเป็นพื้นฐานสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ DAF

2.4.2.3 การหมุนเหวี่ยง (centrifugation) ช่วยในการเร่งการตกจมให้เร็วขึ้นโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากการหมุน ทำให้เกิดการแยกชั้นของตะกอน (อนุภาคขนาดเล็ก) และของเหลวออกจากกันได้ดี แต่การปั่นแยกตะกอน จะต้องใช้เวลานานพอเพียงที่อนุภาคขนาดเล็กจะนอนกันหมด

พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533) พบว่าการนำน้ำทิ้งจากบ่อน้ำทิ้งรวมมาหมุนเหวี่ยง พบว่าสามารถแยกน้ำทิ้งออกเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นมีปริมาณน้ำทิ้งชั้นบนร้อยละ 3-13 ชั้นกลางร้อยละ 60-79 และชั้นล่างร้อยละ 18-28 โดยในแต่ละชั้นมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 1.67-2.64, 0.08-0.15 และ 3.41-4.97 ตามลำดับ การหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งได้ร้อยละ 5-30 ทำให้น้ำทิ้งสุดท้ายมีค่าซีโอดีลดลงร้อยละ 50 และน้ำมันลดลงร้อยละ 85 นอกจากนี้วิธีทางเคมีโดยการใช้สารช่วยตกตะกอน ยังสามารถลดความเข้มข้นได้ร้อยละ 84.5 และยังช่วยลดปริมาณของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ร้อยละ 86.5 แต่วิธีทางกายภาพเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา

2.4.3 วิธีทางเคมี

การใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้นมีหลายวิธี เช่น การใช้สารเคมีในการช่วยตกตะกอน วิธีการตกจมของของแข็งประเภทคอลลอยด์ (normal settling) โดยวิธีการตกจมธรรมดาจะใช้เวลานาน การเร่งการตกจมทำได้โดยเติมสารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ขึ้น จึงเกิดการตกจมที่เร็วขึ้น เช่น FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ประสิทธิภาพของการตกจมด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณสารเคมี สภาพความเป็นกรดด่างของระบบ (อรัญ หันพงษ์กิตติกุล และคณะ, 2536)

2.4.4 วิธีทางชีวภาพ

การแยกน้ำมันด้วยวิธีทางชีวภาพสามารถใช้จุลินทรีย์ที่ต้องการและไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโตเข้ามาย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำทิ้ง โดยมีการทดลองใช้เชื้อ *Aspergillus niger* ATCC 6275 ซึ่งผลิตเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการแยกหรือกำจัดน้ำมันและสารแขวนลอยได้แก่ เอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์เซลลูเลส และใช้เอนไซม์ไซลานเนสทางการค้าคือ Meicellase และ Sumzyme ในการแยกน้ำมันออกจาก POME พบว่าสามารถแยกน้ำมันออกได้ร้อยละ 99.04, 99.07 และ 96.00 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อทิ้งไว้ข้ามคืน (จารุวรรณ มณีศรี, 2538) ซึ่งการที่เอนไซม์สามารถแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำทิ้งได้ เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำทิ้งมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสหรือไซแกลนเป็นองค์ประกอบ โดยไซแกลนจะมีทั้งส่วนที่ละลายและไม่ละลาย เอนไซม์ไซลานเนสจะย่อยไซแกลนที่ละลายน้ำและไซแกลนที่เกาะอยู่ที่เส้นใย ส่วนเอนไซม์เซลลูเลสจะทำการย่อยโมเลกุลของเซลลูโลส ส่งผลให้สารแขวนลอยในน้ำทิ้งที่มีโมเลกุลของน้ำมันจับอยู่ถูกย่อยสลาย ส่วนของน้ำมันจึงถูกแยกออกจากสารแขวนลอย สารแขวนลอยที่เหลือจากการย่อยด้วยเอนไซม์และส่วนของน้ำมันจะลอยเป็นตะกอนอยู่ด้านบน

เสถียรพงษ์ อุดมศิลป์ และ พูนสุข ประเสริฐสรรพ (2552) ทำการทดลองโดยเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ 6 สายพันธุ์ ได้แก่ SU5, SU6, SU9, WD7, WD79 และ WD90 ในน้ำทิ้งดีแคนเตอร์ที่กรองผ่านผ้าขาวบาง 2 ชั้น (ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อ) จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องบนเครื่องเขย่า 200 รอบต่อนาทีและสุ่มเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 นาที เปรียบเทียบผลกับชุดควบคุมที่ไม่เติมเชื้อและเลือกแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์คือ SU5 และ SU9 ซึ่งแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งได้มากที่สุดเพื่อนำไปเลี้ยงในน้ำทิ้งดีแคนเตอร์ในห้องอุณหภูมิ 30 และ 45 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลกับชุดควบคุมที่ไม่เติมเชื้อ สังเกตการณ์มีน้ำมันลอยบนผิวน้ำหรือตะกอนลอยและการตกตะกอนเองของของแข็ง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เชื้อทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถแยกน้ำทิ้งได้ 44.4% และ 49.5% ตามลำดับ ปริมาณตะกอนลอยเท่ากับ 36.1 และ 30.2 ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุมนั้นไม่เกิดตะกอนลอย ส่วนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเชื้อทั้ง 2 สายพันธุ์ไม่เกิดตะกอนลอยบนผิวน้ำ และเมื่อนำเชื้อทั้ง 2 สายพันธุ์ไปวัดการเจริญเติบโตพบว่าเชื้อเจริญได้ดีที่สุดหลังเลี้ยงเชื้อ 72 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือสภาวะที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) จากนั้นทำการทดลองโดยการเตรียมสารละลายเอนไซม์

เซลลูเลสและเพคตินเอส 100 ยูนิตต่อมิลลิลิตร เติมนลงในน้ำทิ้งดีแคนเตอร์ที่ปลอดเชื้อปริมาตร 9 มิลลิลิตร บ่มในอ่างที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สังเกตตะกอนลอยที่เวลา 0, 30, 45, 60, 120, 150 และ 180 นาที เปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากนั้นคัดเลือกชนิดเอนไซม์ที่สามารถแยกน้ำมันและของแข็งได้ดีที่สุดนำมาปรับให้มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เริ่มต้นเป็น 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 ยูนิตต่อมิลลิลิตร สังเกตตะกอนลอยที่เวลา 0, 30, 45, 60, 120, 150 และ 180 นาที เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ผลการทดลองพบว่าเมื่อตั้งทิ้งไว้ 180 นาที น้ำทิ้งที่เติมเอนไซม์เซลลูเลสเกิดการแยกชั้นของตะกอนลอยได้อย่างชัดเจน แต่น้ำทิ้งที่เติมเอนไซม์เพคตินเอสนั้นไม่เกิดการแยกชั้น ส่วนเมื่อทดลองปรับค่ากิจกรรมเอนไซม์เริ่มต้นเป็น 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 ยูนิตต่อมิลลิลิตร พบว่าเอนไซม์ที่มีกิจกรรมเริ่มต้นในช่วง 10-100 ยูนิตต่อมิลลิลิตร สามารถแยกตะกอนลอยได้ในช่วง 32.3-85.3% และแยกน้ำมันได้ในช่วง 5.9-70.9% ตามลำดับ โดยการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่มีค่ากิจกรรมเริ่มต้น 100 ยูนิตต่อมิลลิลิตรนั้นให้ผลการแยกได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากเอนไซม์ทางการค้านั้นมีราคาแพง จึงทดลองใช้เชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ SU5 และ SU9 ซึ่งแยกน้ำมันและของแข็งออกจากน้ำทิ้งได้มากที่สุดนั้น มาทดลองเลี้ยงในน้ำทิ้ง 100 ลิตร 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตการณ์เกิดตะกอนลอยและการตกตะกอนของของแข็ง ผลการทดลองพบว่า เชื้อสายพันธุ์ SU9 สามารถแยกตะกอนและน้ำมันได้ดีที่สุด คือ 16.76% และ 58.1% ตามลำดับ

2.4.4.1 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์

การใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียนั้น มีรายงานการใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งการใช้จุลินทรีย์บำบัดอย่างเดี่ยวและการใช้จุลินทรีย์ร่วมกับการบำบัดทางกายภาพ

Bacillus subtilis เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปท่อน มีขนาดใหญ่กว่าเชื้อแบคทีเรียอื่นๆ ถึง 4 เท่า สามารถสร้างแคปซูลและเอนโดสปอร์ได้ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญได้ดี เช่น สภาพที่ปลอดความชื้น, ทนอุณหภูมิต่ำ (-60 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (280 องศาเซลเซียส), ทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดและด่าง และชอบออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีอัตราการแพร่พันธุ์ได้รวดเร็ว ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมงเพิ่มปริมาณจำนวนได้เป็นแสนเท่า มีขนาดใหญ่กว่าเชื้อแบคทีเรียอื่นๆ ถึง 4 เท่า ครอบคลุมพื้นที่ได้มั่นคงกว่า จึงเป็นตัวควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคอื่นๆ ได้โดยปริยาย มีรายงานการใช้เชื้อ *B. subtilis* ในการผลิตเอนไซม์และบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

อรัญ หันพงษ์กิตติกุล และคณะ (2553) รายงานผลการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส พบว่าเชื้อ *B. subtilis* A2 สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ดีที่สุดในอาหารที่มี 1 % CMC เป็นแหล่งคาร์บอน โดยผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสูงที่สุดที่เวลา 6 ชั่วโมง มีค่ากิจกรรมเท่ากับ 0.45 ยูนิตต่อมิลลิลิตร รองลงมาคืออาหารที่มี 1 % กลูโคสและโมลาสเป็นแหล่งคาร์บอน โดยผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสูงที่สุดที่เวลา 24 และ 36 ชั่วโมง มีค่ากิจกรรมเท่ากับ 0.15 และ 0.10 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเชื้อ *B. subtilis* A2 สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ดีในอาหารที่มีเซลลูโลสเป็นสับสเตรท และพบว่าเชื้อสามารถผลิตเอนไซม์ได้สูงสุดในอาหารพื้นฐานที่มียีสต์สกัด (แหล่งไนโตรเจนอินทรีย์) เป็นแหล่งไนโตรเจน เท่ากับ 0.14 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 12 ชั่วโมง โดยยีสต์สกัดจะช่วยส่งเสริมให้เชื้อเจริญได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีวิตามินและสารตั้งต้นที่จำเป็นต่อการเจริญและการผลิตเอนไซม์ และยังพบว่าการใช้ยีสต์สกัด (แหล่งไนโตรเจนอินทรีย์) ร่วมกับแหล่งไนโตรเจนอนินทรีย์ คือ NH_4NO_3 ร่วมกัน จะส่งผลให้เชื้อเจริญได้เร็วกว่าชุดควบคุม โดยมีการเจริญสูงสุดที่ 6 ชั่วโมง จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร คือ 2.10 และผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่มีค่ากิจกรรมสูงสุดเท่ากับ 0.07 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 24 ชั่วโมง

Keawchai และ Prasertsan (2002) เปรียบเทียบการใช้เชื้อ 3 สายพันธุ์ในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม คือ *B. subtilis* SM29, *B. subtilis* WD90 และ *Enterobacter agglomerans* SM38 พบว่าเชื้อ *B. subtilis* SM29 สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุด โดยลดค่าซีโอดีของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยได้ถึงร้อยละ 88.60, 79.88 และ 84.49 ตามลำดับ

สัจญ์ทัศน์ สันจรรุญศักดิ์ (2554) ทำการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกจากดินบริเวณบ่อ POME โดยเลี้ยงบนอาหารแข็งซีเอ็มซี พีเอช 7 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ไซลานเนสและเซลลูเลสจะเกิดวงใสบนอาหารแข็งซีเอ็มซี จากนั้นเลือกเชื้อที่มีวงใสกว้างที่สุดมาเลี้ยงในอาหารเหลวซีเอ็มซี พีเอช 7 บ่มบนเครื่องเขย่า 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าสายพันธุ์ AH14, AH64 และ AH73 มีกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลส 0.73, 0.71 และ 0.73 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และเอนไซม์ไซลานเนส 1.24, 1.18 และ 1.21 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดีที่สุดที่ 12 ชั่วโมงของการเลี้ยง เมื่อนำแบคทีเรียทั้ง 3 สายพันธุ์มาเลี้ยงเปรียบเทียบการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสในอาหารที่เตรียมจากสารละลายส่วนใสของ POME พีเอชเริ่มต้น 7.0 บ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 45 องศา

เซลเซียส พบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ AH73 มีกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส 0.55 หน่วยต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์ไซลานเนส 0.37 หน่วยต่อมิลลิลิตร ดีที่สุดที่ 12 ชั่วโมงของการเลี้ยง และเมื่อทำการเทียบเคียงสายพันธุ์ด้วยวิธี 16S rDNA พบว่าเป็น *B. subtilis* โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสของเชื้อ *B. subtilis* AH73 ในฟลาस्क 250 มิลลิลิตร คือการเลี้ยงในอาหารที่เตรียมจากสารละลายส่วนใสของ POME ที่ไม่ทำการเจือจางและไม่เติมแหล่งไนโตรเจน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้น 7.0 บ่มบนเครื่องเขย่า 200 รอบต่อนาทีที่ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าเชื้อ *B. subtilis* AH73 ให้กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดที่ 36 ชั่วโมง คือ 1.02 หน่วยต่อมิลลิลิตร และเอนไซม์ไซลานเนสสูงสุดที่ 12 ชั่วโมง คือ 0.99 หน่วยต่อมิลลิลิตร จากนั้นจึงทดลองใช้เชื้อ *B. subtilis* AH73 แยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งดีแคนเตอร์ โดยใช้อาหารที่มีการเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ส่วนใสจากการปั่นเหวี่ยงอาหารที่เลี้ยงเชื้อ 5 มิลลิลิตร เติมลงใน POME ปริมาตร 45 มิลลิลิตร พบว่าสามารถลดน้ำมันออกจากตะกอนได้ร้อยละ 43.33 และ 37.18 ตามลำดับ ลดน้ำหนักแห้งของตะกอนได้ร้อยละ 17.88 และ 18.70 ตามลำดับ และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำมันออกจาก POME โดยใช้อาหารที่มีการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* AH73 คือ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำทิ้งกับ 7.0 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 96 ชั่วโมง เชื้อ *B. subtilis* AH73 สามารถลดน้ำมันในตะกอนได้ร้อยละ 62.79 และลดน้ำหนักแห้งของตะกอนได้ร้อยละ 35.53

จิตรลดา กาญจนสาวิตรี และ ชญานุตม์ ศรีพิทักษ์ (2547) ศึกษาการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสที่ผลิตจากเชื้อ *B. subtilis* A2 ในการแยกน้ำมันออกจาก POME พบว่าน้ำมันในตะกอนและน้ำหนักตะกอนแห้งลดลงมากขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม คือร้อยละ 38.28 และ 40.67 ตามลำดับ และ ชีหิยะ จันทอง และฮาราตี รอนิง (2548) รายงานว่าเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสที่ได้จาก *B. subtilis* A2 สามารถลดน้ำมันในตะกอนและน้ำหนักแห้งได้สูงสุดร้อยละ 32.83 และ 69.09 ตามลำดับ

Shah และคณะ (1999) ใช้แหล่งคาร์บอนจาก wheat straw, wheat bran และ rice straw ในปริมาณร้อยละ 3 เพื่อผลิตเอนไซม์ไซลานเนสจากเชื้อ *Bacillus* sp. Sam-3 พบว่า เมื่อเลี้ยงเชื้อไปได้ 48 ชั่วโมง *Bacillus* sp. Sam-3 มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ไซลานเนสสูงสุดเท่ากับ 132 IU/ml (International units per milliliter) ในแหล่งคาร์บอนจาก wheat bran

Rahna และคณะ (2013) รายงานการแยก คัดเลือก และระบุสายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดยใช้เศษกระดาษเป็นแหล่งคาร์บอน โดยเริ่มคัดแยกเชื้อจากปุ๋ยหมัก เศษผลไม้เน่า เกลี่ยบนอาหารแข็ง CMC พบว่ามี 15 สายพันธุ์ที่สามารถเจริญบนอาหารแข็งได้ จากนั้นทดสอบวงใสบนอาหารแข็ง CMC โดยทดสอบละลาย congo red 0.1% ให้ท่วมเพลท 15 นาที พบว่า มีเพียง 3 สายพันธุ์ที่เกิดวงใสขึ้น ทำการทดสอบเทียบเคียงสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ โดยผลการวิเคราะห์พบว่าสายพันธุ์ที่มีความกว้างของวงใสมากที่สุด คือ *B. subtilis* โดยมีความกว้างเท่ากับ 25 มิลลิเมตร จากนั้นวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โดยใช้อาหาร CMC เป็นแหล่งคาร์บอนเปรียบเทียบกับการใช้เศษกระดาษเป็นแหล่งคาร์บอน วิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์เปรียบเทียบกัน 2 วิธี คือ วิธี Carboxymethyl cellulase activity (CMCase) และ Filter paper assay (FPase) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่ากิจกรรมเอนไซม์ที่ใช้วิธี CMCase โดยมีการใช้เศษกระดาษเป็นแหล่งคาร์บอนมีค่าสูงสุด คือ 0.541 U/ml จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อ *B. subtilis* พบว่าเวลาที่ใช้ในการบ่มที่ดีที่สุดคือ 60 ชั่วโมง ให้กิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดที่ 0.72 ยูนิตต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิและค่าพีเอชที่ดีที่สุดคือ 40 องศาเซลเซียสและพีเอช 7 โดยให้กิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดที่ 0.741 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ดีที่สุดคือ 2% ให้กิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดที่ 0.678 ยูนิตต่อมิลลิลิตร และแหล่งไนโตรเจนที่ดีที่สุดคือ malt extract ให้กิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดที่ 0.61 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า *B. subtilis* สามารถใช้เศษกระดาษซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงโม่แป้งเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ตามสภาวะที่เหมาะสมข้างต้น และเศษกระดาษเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดแทนเซลลูโลสทางการค้าที่มีราคาแพง การเปรียบเทียบการใช้ *B. subtilis* เพื่อผลิตเอนไซม์ แสดงไว้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการใช้ *B. subtilis* เพื่อผลิตเอนไซม์

Organism	Source	Enzyme	Reference
<i>Bacillus subtilis</i>	Hot spring	Xylanase	Sá-Pereira <i>et al.</i> , 2002
<i>Bacillus subtilis</i> A-53	Sea water	Cellulase	Kim <i>et al.</i> , 2009
<i>Bacillus subtilis</i> A2	Palm oil mill effluent	Cellulase	อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และ คณะ, 2553
<i>Bacillus subtilis</i>	Soil around the palm oil mill	Cellulase Xylanase	สัญญาพันธ์ สินจรรยาศักดิ์. 2554
<i>Bacillus subtilis</i>	Compost	Cellulase	Rahna <i>et al.</i> 2013
<i>Bacillus subtilis</i> A2	-	Cellulase Xylanase	ซีหะยะ จันทอง และฮาราตี รอนิง, 2548
<i>Bacillus subtilis</i> CY5	Fish guts	Cellulase	Ray <i>et al.</i> , 2007

2.4.4.2 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำ ทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์ม

เนื่องจาก POME มีปริมาณสารอินทรีย์สูงและประกอบด้วยสารอาหารหลายชนิด
ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ตะกอนในน้ำทิ้งเป็นสารพวกกลูโคส เซลลูโลส มี
องค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนั้นจึงมีการศึกษาการใช้
เอนไซม์ที่จุลินทรีย์ผลิตได้มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารอินทรีย์
ที่เป็นองค์ประกอบใน POME ได้แก่

(1) เซลลูเลส (Cellulase)

โครงสร้างของเซลลูโลส $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็น [สารประกอบอินทรีย์](#) ที่เกิดจาก [กลูโคส](#)
ประมาณ 50,000 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -glucosidic เป็นสายยาว แต่ละสายของสาย
ของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย การย่อย
สลายเซลลูโลสโดยเอนไซม์เซลลูเลส จะได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กลง เช่น กลูโคส เซลโล
ไบโอส

องค์ประกอบและการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส

1. เอนไซม์ C1 หรือ hydrogen bondase ทำหน้าที่กระตุ้นหรือแตกสลายเซลลูโลสให้มีสภาพที่เหมาะสม คือ ทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนลง เพื่อเป็นสับสเตรทของเซลลูเลส

2. เอนไซม์ Cx หรือ β -1,4 glucanase เป็นเซลลูเลสที่ย่อยสลายพันธะในเซลลูโลสหรืออนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ละลายน้ำได้ แต่ไม่สามารถย่อยสลายสับสเตรทที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ กลุ่มนี้มี 2 ชนิด

2.1 Endo- β -glucanase (β -glucane glucanohydrolase, EC.3.2.1.4) จะทำหน้าที่ย่อยสลาย β -glucosidic linkage แบบสุ่ม ได้ผลผลิตคือกลูโคส เซลโลไตรโอส ไม่ย่อยเซลโลไบโอส สามารถย่อยไซโลเดกซ์ตริน เซลลูโลสที่เกิดการพองตัว carboxymethyl cellulose (CMC), hydroxyl-ethyl cellulose (HEC)

2.2 Exo- β -D-glucanase (β -1,4 glucan cellobiohydrolase, EC.3.2.1.91) หรือ cellobiohydrolase ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลสด้าน non-reducing end สามารถย่อยเซลลูโลสในภาพผลึก (crystalline cellulose) หรือย่อยเซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble cellulose) เป็นไซโลเดกซ์ตรินและเซลโลไบโอส

2.3 β -glucosidase (β -D-glucosylhydrolase EC.3.2.1.21) ทำหน้าที่ย่อยเซลโลไบโอส และเซลโลโอลิโกแซคคาไรด์ (cello-oligosaccharide) ได้กลูโคส ไม่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสหรือเซลโลเดกซ์ตรินได้

กลไกการทำงานของเซลลูเลส จะมีการทำงานร่วมกันแบบ synergistic เริ่มจากเซลลูโลสจะเกิดการบวมตัว (swelling) พร้อมกับมีการสลายพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันของ endo- β -glucanase และ exo- β -glucanase โดย endo- β -glucanase จะย่อยสลายเซลลูโลสให้ปลายอิสระ ส่วน exo- β -glucanase จะตัดน้ำตาลกลูโคสที่ละ 2 โมเลกุล (cellobios) จะถูกย่อยสลายต่อไปโดย β -glucosidase จนได้น้ำตาลกลูโคส

(2) ไซลานเนส (Xylanase)

ไซแลนเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่พบในผนังเซลล์ของพืช โดยมีโครงสร้างหลักเป็นน้ำตาลไซโลส และมีส่วนกิ่งก้านเป็นน้ำตาลหรืออนุพันธ์ของน้ำตาล เช่น acetyl, glucuronosyl และ arabinosyl residues ดังนั้นเพื่อให้การย่อยสลายสารประกอบไซแลนสมบูรณ์ จึงต้องใช้เอนไซม์ในกลุ่ม xylanolytic enzymes หลากชนิดทำงานร่วมกัน

การย่อยสลายไซแลนจะสมบูรณ์นั้น จะต้องประกอบด้วยเอนไซม์ต่างๆทำงานร่วมกันได้ ได้แก่

1. Endoxylanase หรือ (1,4- β -D-xylan xylohydrolase, EC.3.2.1.8) เอนไซม์จะสลายพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) ในเฮทเทอโรไซแลน ทำให้ได้ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (xylooligosaccharide) ที่จะถูกย่อยสลายต่อไปเป็นไซโลไตรออส (xylotriose) ไซโลไบออส (xylobiose) และไซโลส (xylose) ตามลำดับ

2. Exoxylanase หรือ 1,4- β -D- xylohydrolase ย่อยสายไซแลนและไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ให้เป็นหน่วยย่อยจากด้านที่เป็น non-reducing end แล้วให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำตาลไซโลส

3. β -D- xyloside xylohydrolase, EC.3.2.1.37 หรือ β -xylosidase มีหน้าที่ย่อยไคแซคคาร์ไรด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ Endoxylanase และ Exoxylanase ให้น้ำตาลไซโลส (จาวรธรรม มณีศรี, 2538)

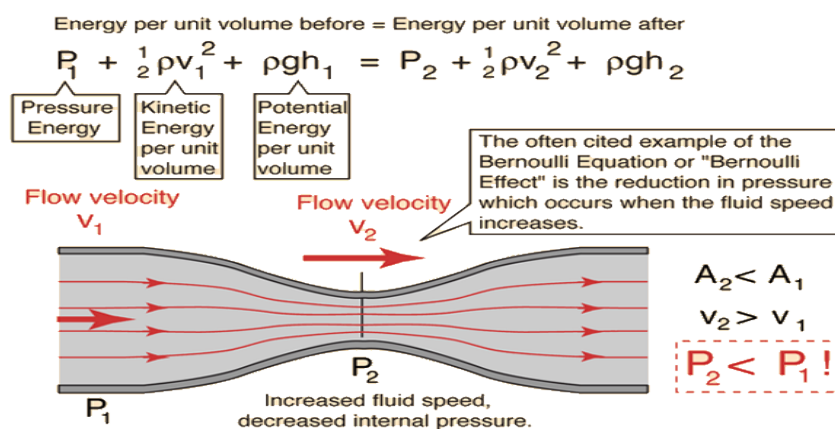
พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ อรัญ หันพงศกิตติกุล (2554) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เอนไซม์ทางการค้าในการเก็บเกี่ยวน้ำมันจาก POME โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส ไซลานเนส และเพคตินเนส พบว่า ปริมาณการใช้เอนไซม์ทางการค้าทั้ง 3 ชนิดที่ 50 ยูนิตต่อมิลลิลิตร สามารถแยกน้ำมันในน้ำทิ้งดีแคนเตอร์ได้ 92, 91 และ 47% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง จากการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากชุดควบคุม (66%) ประมาณ 1.4 เท่า ยกเว้นเอนไซม์เพคตินเนสที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมของเอนไซม์ในการแยกน้ำมันคือ ที่พีเอช 5.0 สำหรับเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนส และพีเอช 3.0 สำหรับเอนไซม์เพคตินเนส ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสม เอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสสามารถแยกน้ำมันได้ดีที่สุดที่เวลา 30 นาที โดยสามารถแยกน้ำมันได้ 85

และ 98% ตามลำดับ ส่วนเอนไซม์เพคตินเอสจะเกิดแยกชั้นหลังการบ่ม 180 นาที จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าว เอนไซม์ไซลานเนสมีประสิทธิภาพดีที่สุดในรองลงไปคือเซลลูเลส ส่วนเอนไซม์เพคตินเอสมีประสิทธิภาพต่ำ

Laohaprapanon และคณะ (2007) ศึกษาการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ร้อนที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสเพื่อใช้ในการแยกน้ำมันจาก POME พบว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์ SO1 และ SO2 ที่คัดแยกจากดินบริเวณใกล้เคียงบ่อบำบัด POME นั้นให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสสูงสุด 12.11 และ 50.98 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และเมื่อผ่านการบ่มไป 4 วัน จุลินทรีย์สายพันธุ์ SO1 และ SO2 นั้นให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสที่ 7.2 และ 20.42 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และเมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 2 สายพันธุ์มาเลี้ยงในน้ำทิ้งที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 7 วัน พบว่า จุลินทรีย์สายพันธุ์ SO1 สามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมันในชั้นล่างมากที่สุด คือ น้ำหนักแห้งลดลง 64.66% และปริมาณน้ำมันและไขมันในชั้นล่างลดลงมากที่สุด 85.32%

2.5 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) สำหรับการออกแบบหัวฉีดเหนียวนำอากาศ

ตามปกติหัวฉีดจะมีคอขวด ขณะที่พื้นที่หน้าตัดด้านของเหลวขาเข้าของหัวฉีดนั้นจะมีขนาดโตกว่าคอขวด หัวฉีดลักษณะนี้เรียกว่านอซเซิล (nozzle) และหากด้านขาออกจากคอขวดของหัวฉีดมีขนาดโตขึ้นอีกครั้งหนึ่ง จะเรียกหัวฉีดลักษณะนี้ว่าเวนจูรี (venturi) แต่ทั้ง 2 แบบใช้สมการเดียวกันในการหาความดันที่คอขวด คือสมการเบอร์นูลลี ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปประกอบการอธิบายสมการเบอร์นูลลี

ที่มา: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pber.html>

จากรูปที่ 6 สมการเบอร์นูลลี เขียนได้ดังนี้ (White, 1986)

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ย้ายข้างสมการ เพื่อหาค่าความดัน P_2 ที่คอคอดของหัวฉีดได้ดังนี้

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho gh_1 - \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \rho gh_2$$

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2)$$

แต่เนื่องจาก $V_1 = V_2$

$$\text{ดังนั้น } V_2 = V_1 (d_1 / d_2)^2 \quad \text{แทนในสมการที่ (1) จะได้}$$

$$P_2 = P_1 + (1/2) (\rho_0) (V_1)^2 [(d_2/d_1)^4 - 1] \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ P_1 คือ ความดันของของเหลวที่ไหลเข้า

P_2 คือ ความดันของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอด

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อทางเข้า

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอคอด

V คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรภายในท่อ

V_1 คือ ความเร็วของของเหลวในท่อก่อนเข้าคอคอด

V_2 คือ ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอดของท่อ

ρ_0 คือ ความหนาแน่นของของเหลว

การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการไหลของของเหลว (V_2) ในคอคอดส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศเหนียวน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเราสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเหนียวน้ำโดยการปรับวาล์วของเหลวให้ไหลได้เร็วขึ้น อากาศจากภายนอกก็ถูกดูดเข้าสู่ระบบได้มากขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการไหลของของเหลวยังส่งผลต่อความดันของของเหลวที่ไหลเข้า (P_1) โดยเมื่อของเหลวไหลจากพื้นที่ที่มีหน้าตัดกว้างมาสู่พื้นที่ที่เป็นคอคอด ทำให้ความดันของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอด (P_2) ลดลง เนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านคอคอดนั้นมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความดันของของเหลวลดลง ความดันอากาศจากภายนอกซึ่งสูงกว่าความดันของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอดนั้นจึงถูกดูดเข้าสู่ระบบบริเวณที่เจาะรูไว้ที่คอคอด อากาศที่เข้ามาผสมกับน้ำเมื่อ

ผ่านหัวฉีดจึงเกิดเป็นฟองอากาศเข้าสู่ระบบ นอกจากนั้นอุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำมันก็มีผลต่อความหนาแน่นของน้ำ (ρ_0) โดยเมื่ออุณหภูมิและ/หรือความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของน้ำจะลดลง ส่งผลให้ความดันที่คอคอดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดฟองอากาศภายในระบบ (Janpromsri *et al.*, 2016)

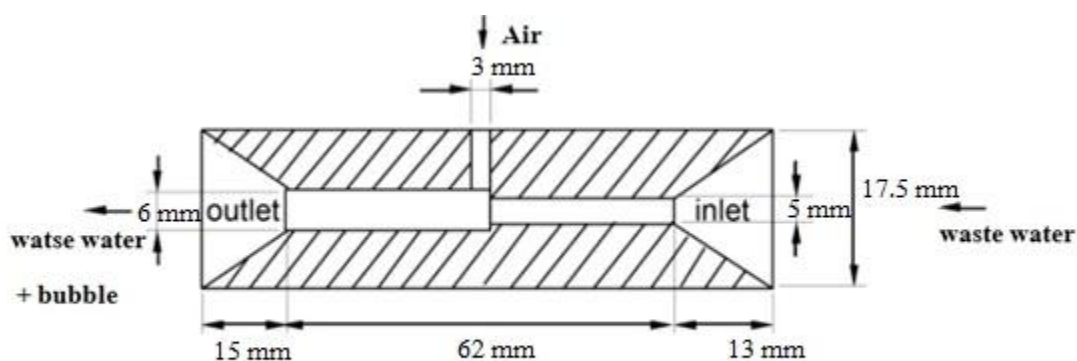
บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่ใช้ในการทดลอง

หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่ใช้ในการทดลอง เลือกใช้ตามแบบและขนาดที่แนะนำไว้ใน Duangsuwan และคณะ (2014) ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำจากพลาสติกแข็งทนสารเคมี คือซูเปอร์ลีน (superlene plastic)



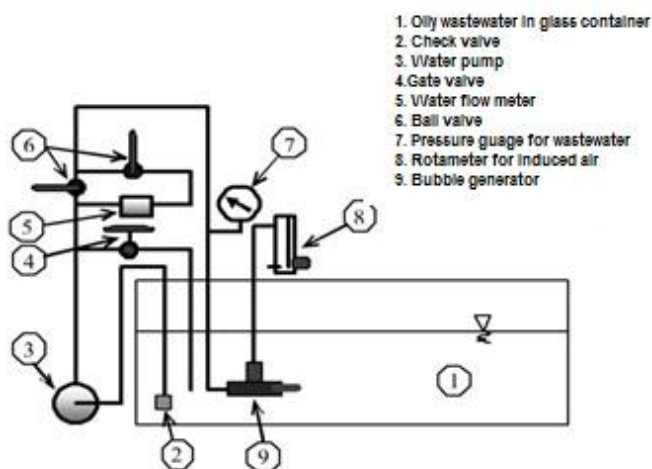
(หน่วย:มิลลิเมตร)

รูปที่ 7 ลักษณะของหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ

ที่มา: Duangsuwan และคณะ (2014)

3.1.2 ชุดทดสอบหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์

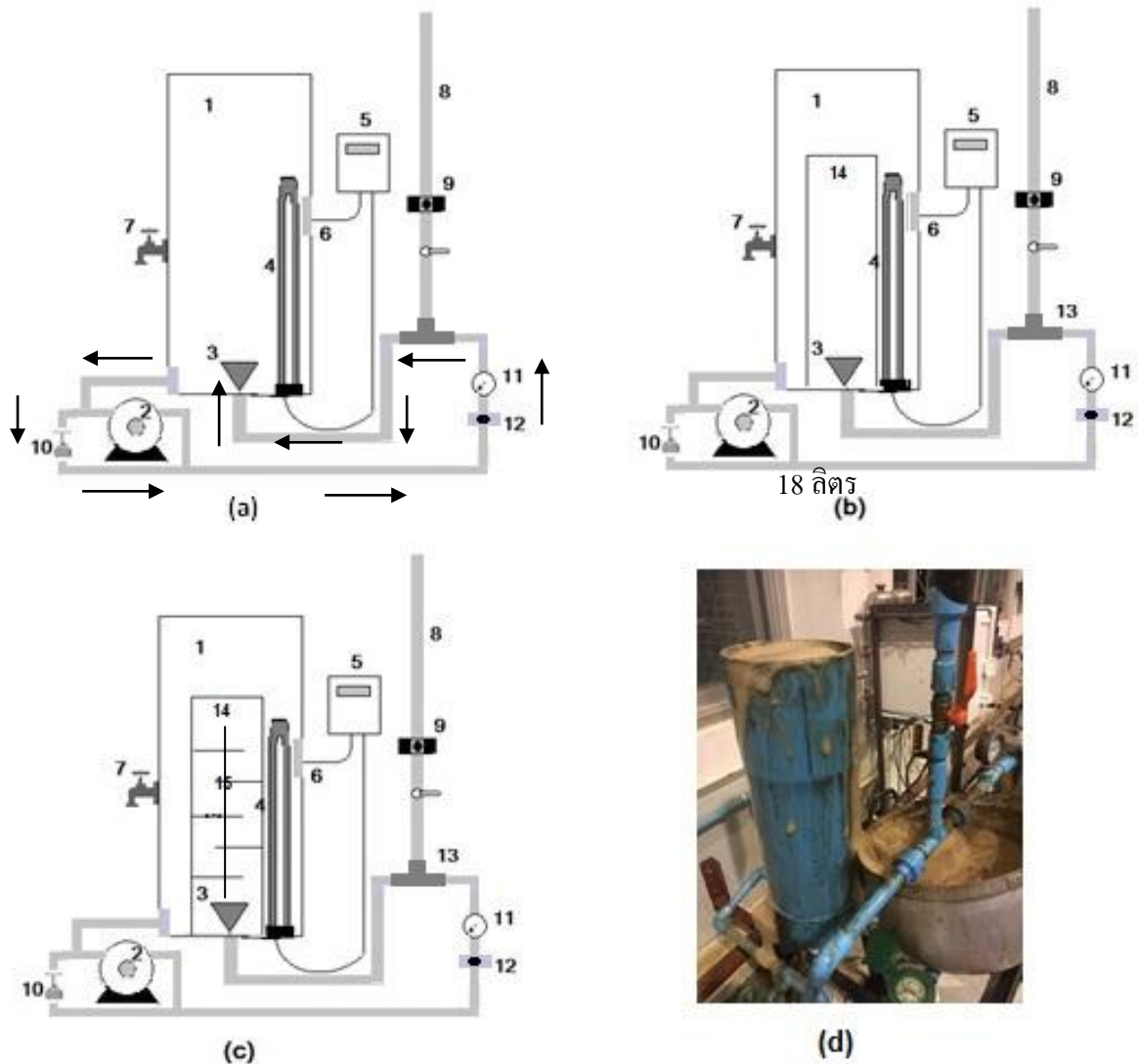
หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศจากข้อ 3.1.1 จะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำหรือการดูดอากาศเข้าสู่หัวฉีด โดยใช้ชุดเครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย ตู้กระจก (ตู้ปลา) ปริมาตร 200 ลิตร มีความกว้าง 48.26 เซนติเมตร ยาว 91.44 เซนติเมตร และสูง 45.72 เซนติเมตร, วาล์วทางเดียว, ปั๊ม, วาล์วปรับอัตราการไหลของน้ำเสีย, เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ, เกจวัดความดันน้ำ และโรตารีมิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศเหนี่ยวนำ



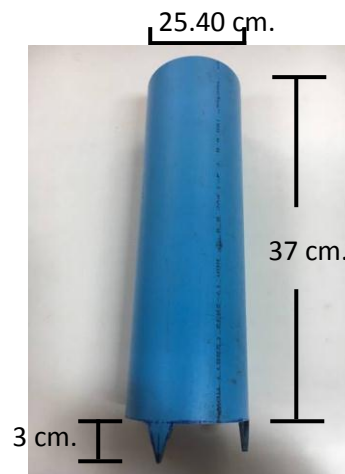
รูปที่ 8 ชุดเครื่องมือทดสอบอัตราการดูดอากาศของหัวฉีด
ที่มา Duangsuwan และคณะ (2014)

3.1.3 ชุดถังทดสอบการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME

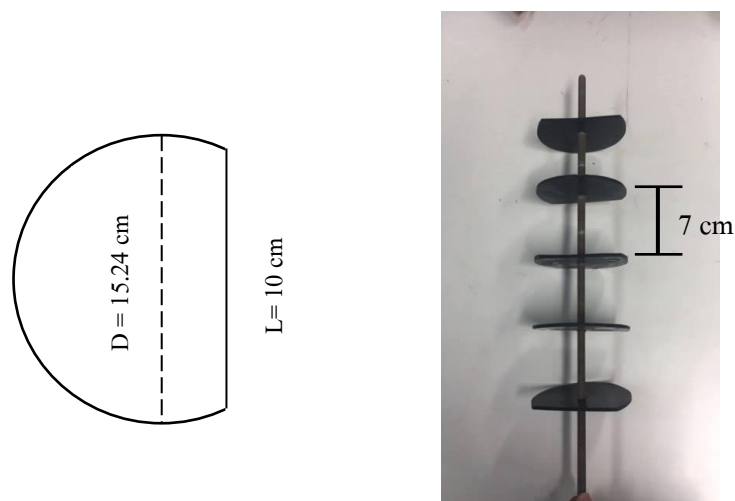
ได้สร้างถังแยกน้ำมันจาก POME ขึ้นมา 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 9(d) และมีการออกแบบให้มีอุปกรณ์เสริมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน ดำเนินการทดลอง 3 รูปแบบ แบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 9(a) ถังหมายเลข 1 ทำด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.32 เซนติเมตร สูง 66.04 เซนติเมตร ปริมาตร 20 ลิตร แบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 9(b) คือการเสริมท่อแบบแอร์ลิฟต์ หมายเลข 14 ลงในถังหมายเลข 1 เพื่อช่วยในการไหลวนของน้ำเสีย และแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 9(c) คือการนำแบบที่ 1 มาเสริมด้วยท่อแอร์ลิฟต์และแผ่นบัพเฟิล (baffles) เพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียของฟองอากาศ ขนาดของท่อแอร์ลิฟต์แสดงในรูปที่ 10 ส่วนขนาด, รูปร่าง และจำนวนของแผ่นบัพเฟิลที่ใส่ในท่อแอร์ลิฟต์ แสดงในรูปที่ 11 สำหรับแผ่นกั้นหรือแผ่นบัพเฟิล (baffles) นี้ ทำจากแผ่นพีวีซีหนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 เซนติเมตร ปาดคอร์คทุกแผ่น นำมาวางเรียงตามแนวแกนของเกลียวเหล็ก ดังรูปที่ 11



รูปที่ 9 ชุดเครื่องมือทดลองการลอยตัวด้วยฟองอากาศเหนี่ยวนำแบบกะ ขนาด 20 ลิตร จำนวน 3 แบบ สำหรับแยก CPO ออกจาก POME (a) ถังเดี่ยว, (b) ถังเดี่ยว+ท่อแอร์ลิฟต์, (c) ถังเดี่ยว+ท่อแอร์ลิฟต์+แผ่นกั้นบัพเฟิล, (d) รูปถ่ายจริง 1 = ถังแยก, 2 = ปัม, 3 = หัวกระจายอากาศ, 4 = ฮีตเตอร์, 5 = ตัวควบคุมอุณหภูมิ, 6 = หัววัดอุณหภูมิ, 7 = ก๊อกสุ่มตัวอย่าง, 8 = ท่ออากาศขาเข้า, 9 = เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ, 10 = วาล์ว, 11 = เกจวัดความดัน, 12 = เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ, 13 = หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ, 14 = ท่อแอร์ลิฟต์ (air-lift), 15 = บัพเฟิล



รูปที่ 10 ขนาดของท่อแอร์ลิฟต์ที่ใส่ลงในถังแยกในรูปที่ 9(b) และ 9(c) เพื่อให้ POME ไหลวนในแนวตั้งในถังแยก



รูปที่ 11 แผ่นกั้นบัพเฟิลที่ใช้ในถังแยกในรูปที่ 9(c) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 เซนติเมตร และตัดขอบออกให้มีความยาวด้านขอบยาว 10 เซนติเมตร จำนวน 5 แผ่น เรียงสลับตามแนวแกนของเกลียวเหล็ก มีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 7 เซนติเมตร

โดยหลักการของท่อแอร์ลิฟต์ คือการดันอากาศให้ไหลขึ้นและเวียนกลับเรื่อยๆเป็นวงจร โดยมีท่อเป็นตัวกลางในการหมุนเวียนของอากาศ โดยในมิน่าไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการช่วยทำให้เกิดการผสมระหว่างแก๊ส ของแข็ง และของเหลวได้ง่ายมากขึ้น (Mahmood *et al.*, 2015) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ออกแบบท่อแอร์ลิฟต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

10 เซนติเมตร สูง 37 เซนติเมตร และยกตัวจากพื้น 3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 10 เพื่อให้อากาศภายในระบบและอากาศที่ถูกพ่นเข้าสู่ระบบพร้อมกับ POME เกิดการหมุนเวียนและสัมผัสกับอนุภาคสารอินทรีย์ใน POME ได้มากขึ้น ส่วนการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลนั้นจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศและอนุภาคของของเหลว นำไปสู่การดูดซับหรือยึดติดกันระหว่างอนุภาคที่มากขึ้น (Wang *et al.*, 2013) ซึ่งถือเป็นอีกหนึ่งวิธีที่คาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าสู่สัมผัสระหว่างฟองอากาศและอนุภาคสารอินทรีย์ใน POME และแยกอนุภาคเหล่านั้นออกจาก POME ได้มากขึ้น

3.1.4 การวัดขนาดฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ

ได้ทำการดัดแปลงถังแยกน้ำมันในรูปที่ 9(d) โดยติดกระจกใส 2 แผ่นตรงข้ามกัน เพื่อให้มองเห็นของเหลวและฟองอากาศในถัง อุปกรณ์ที่ดัดแปลงเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 12



- 1 = ถังแยก
- 2 = บีม
- 3 = หัวกระจายอากาศ
- 4 = ฮีตเตอร์
- 5 = ตัวควบคุมอุณหภูมิ
- 6 = หัววัดอุณหภูมิ
- 7 = ก๊อกสุ่มตัวอย่าง
- 8 = ท่ออากาศขาเข้า

รูปที่ 12 รูปถ่ายแสดงการดัดแปลงถังแยกเพื่อให้สามารถถ่ายภาพฟองอากาศได้

3.1.5 วัตถุดิบ

3.1.5.1 น้ำทิ้งสังเคราะห์

Pendashteh และคณะ (2011) รายงานวิธีการทำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่มีเกลือและน้ำมันเป็นส่วนผสม โดยใช้เครื่องไฮโมจิโนเซอร์ มีส่วนผสมคือ NaCl 32, 000 มิลลิกรัมต่อลิตร; $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร; KCl 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร; NaHCO_3 800 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำมัน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการผสมโดยเครื่องไฮโมจิโนเซอร์ ด้วยความเร็วรอบ 2,400 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ตัวอย่างน้ำทิ้งที่มีเกลือสูงและมีน้ำมันปนอยู่ในรูปอิมัลชัน สำหรับตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเตรียมโดยวิธีของ Pendashteh และคณะ (2011) แต่ไม่มีเกลือเป็นส่วนผสม จะมีเฉพาะน้ำและน้ำมันเท่านั้นมาผสมกัน โดยปรับความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้นในน้ำทิ้งสังเคราะห์จำนวน 4 ค่า คือ 4,000, 8000, 12,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ปริมาณ 60 ลิตรต่อหนึ่งความเข้มข้นเริ่มต้น ดังนั้นแต่ละค่าความเข้มข้น ต้องใช้น้ำมันเท่ากับ 240, 480, 720 และ 960 กรัม ตามลำดับ นำน้ำและน้ำมันตามสัดส่วนดังกล่าวมาผสมกันแล้วทำเป็นอิมัลชันโดยการอัดผ่านเครื่องไฮโมจิโนเซอร์ ที่ความดัน 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำทิ้งสังเคราะห์ที่เตรียมได้จะไม่มีปริมาณของแข็ง เพราะต้องการจำกัดปริมาณของตัวแปรควบคุม น้ำทิ้งสังเคราะห์ใช้สำหรับทดลองเบื้องต้น เพื่อหาความสามารถในการดูดอากาศของหัวฉีด

3.1.5.2 น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME)

POME จากโรงงานลาภทวีอินดัสทรี จังหวัดสตูล เป็น POME จากเครื่องตีแคนเตอร์ มีลักษณะที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าคือ เป็นของเหลว มีสีน้ำตาลขุ่นหนา มีกลิ่นเหม็น และอุณหภูมิสูง เก็บตัวอย่าง POME ที่นำมาจากโรงงานไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำออกมาทำละลายโดยวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนนำตัวอย่างมาวิเคราะห์องค์ประกอบเริ่มต้น โดยแบ่งตัวอย่างของแข็งทั้งหมดปริมาณ 10 กรัม เพื่อวัดองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินภายในของแข็ง องค์ประกอบน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 องค์ประกอบของ POME ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Composition	Range	
	POME lot1	POME lot2
Total solids (TS) (mg/L)	43,250-48,833	22,220
Cellulose (%)	-	5.45
Hemicellulose (%)	-	6.41
Lignin (%)	-	22.54
suspended solids (SS) (mg/L)	20,536-23,130	16,810
Oil and grease (O&G) (mg/L)	7,500-8,200	10,800
Chemical oxygen demand (COD) (mg/L)	31,403-39,600	32,400
pH	4.65-4.78	4.79
Temperature (°C)	60-70	60-70

3.1.6 อาหารเลี้ยงเชื้อ

ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Carboxymethyl cellulose (CMC) พีเอช 6.0 ดังนี้ (อรัญ และคณะ, 2553) CaCl₂ 0.3 กรัม, MgSO₄·7H₂O 0.3 กรัม, KH₂PO₄ 1.0 กรัม, K₂HPO₄ 1.0 กรัม, Polypeptone 2.0 กรัม, Yeast extract 1.0 กรัม, NH₄NO₃ 4.4 กรัม, CMC 10.0 กรัม ละลายส่วนผสมในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 6.0 ด้วยสารละลาย 1 นอร์มอลโซเดียมไฮดรอกไซด์ ฆ่าเชื้อที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

3.1.7 อุปกรณ์อื่นๆ

ชื่อเครื่องมือ	รุ่น	บริษัท
ตู้ปลอดเชื้อ	527044	Hotpack, China
ตู้อบความร้อนแห้ง	UM 200-800	Memmert, Germany
เครื่องวัดพีเอช	420A	Orion Research, Inc., Japan
เครื่องโฮโมจิไนเซอร์		
อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	W350	Memmert, Germany
เครื่องให้ความร้อน	HS115	Ika Labotechnic, Germany
เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง	BP 210-s	Sartorius, Germany
เครื่องวัดความเร็วลม	405-V1	Testo

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์

ใช้หัวฉีดตามรูปที่ 7 มาใส่ในอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 8 และใช้น้ำทิ้งสังเคราะห์จากหัวข้อที่ 3.1.5.1 น้ำทิ้งสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันเท่ากับ 4,000, 8,000, 12,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำทิ้งแต่ละความเข้มข้นจะถูกนำมาทดลองคราวละ 20 ลิตร ที่ 3 อุณหภูมิ คือ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ทำการปรับอุณหภูมิ น้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยความร้อนจากแก๊สหุงต้มให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการก่อนเทใส่ตู้กระจกหมายเลข 1 ในรูปที่ 8 จากนั้นเปิดปั๊ม หมายเลข 3 และปรับความดันน้ำทิ้งสังเคราะห์ก่อนเข้าหัวฉีดด้วยวาล์วหมายเลข 4 จำนวน 6 ค่าคือ 2.5, 3.75, 5, 6, 8 และ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่ละค่าความดันทำการวัดความเร็วของอากาศภายนอกที่ถูกเหนี่ยวนำ (ถูกดูด) เข้ามาในหัวฉีด จากนั้นนำค่าความเร็วที่ได้มาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศ จะได้อัตราการดูดอากาศ (ปริมาตรต่อเวลา) ที่ความดันนั้นๆ ขณะเดียวกันสามารถอ่านค่าอัตราการไหลของน้ำทิ้งผ่านหัวฉีดที่ความดันต่างๆ ได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลหมายเลข 5

3.2.2 การหาขนาดของฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดที่ใช้ เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองในขั้นต่อไป และเนื่องจากการใช้งานหัวฉีดกับถังแยกน้ำมันปาล์มดิบเป็นถังทึบ (ทำจากท่อ PVC) ไม่สามารถมองเห็นขนาดและรูปร่างของฟองอากาศได้โดยตรง อีกทั้งแม้ว่าจะเป็นถังโปร่งแสง เช่นถังอะคริลิกหรือถังกระจกก็สังเกตขนาดและรูปร่างของฟองอากาศได้ยาก เพราะ POME มีสีเข้มมาก ในที่นี้จึงแก้ปัญหาโดยทำการทดลองแยกต่างหากเพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง โดยตัดแปลงถังแยกให้มีกระจก 2 ด้านตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 12 และใช้น้ำประปาธรรมดาแทน POME ทำให้สามารถถ่ายภาพฟองอากาศได้ชัดเจน และศึกษาขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิต่างกัน คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

3.2.3 การหาสถานะที่เหมาะสมของถังแยกน้ำมันระบบ IAF ในการแยกน้ำมันออกจาก POME

1. นำ POME ปริมาตร 18 ลิตร มาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมลงในถังแยก หมายเลข 1 ในรูป 9(a) ทำการปรับอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ หมายเลข 5 ทำการสุ่มเก็บตัวอย่าง POME จากก๊อกเก็บตัวอย่าง หมายเลข 7 ปริมาณ 120 มิลลิลิตร จากถังแยก ($t=0$)

2. เปิดสวิทช์ปั๊ม หมายเลข 2 เพื่อเริ่มต้นการทำงานของชุดถังแยกน้ำมัน หมุนวาล์ว หมายเลข 10 เพื่อทำการปรับความดันของ POME (โดยใช้ค่าความดันที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อ 3.2.1) ฟองอากาศจะถูกผลิตออกมาจากหัวฉีด หมายเลข 3 อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านทางหัวฉีด

3. เดินเครื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการสุ่มเก็บตัวอย่าง POME ในถังแยก ครั้งละ 120 มิลลิลิตร จากก๊อกเก็บตัวอย่างหมายเลข 7 โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300 และ 360 นาที ขวดตัวอย่างเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C

4. เมื่อครบ 6 ชั่วโมง ปิดสวิทช์ปั๊ม ทำการเก็บน้ำมัน (ในรูปของฟองอากาศ) ที่ลอยอยู่บริเวณผิวหน้าในถังแยก ชั่งน้ำหนักของฟองทั้งหมด แบ่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน, ของแข็งทั้งหมด, ค่าพีเอช, ค่าซีไอดี ที่เปลี่ยนไป โดยทุกๆตัวอย่างจะวิเคราะห์ค่าละ 3 ซ้ำ

5. ระบาย POME ที่เหลือภายในถังออก และชั่งน้ำหนักของ POME ที่เหลือ

6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส

7. ดัดแปลงรูปแบบถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b) และ 9(c) และทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-6

8. บันทึกผลและเขียนกราฟแสดงผลการทดลองทั้งหมด

3.2.4 การใช้จุลินทรีย์ในการช่วยแยกน้ำมันออกจาก POME (ดัดแปลงจาก วรรณิการ์ สิริสิงห์, 2522)

งานวิจัยนี้ใช้เชื้อ *Bacillus subtilis* ในอาหารแข็งจากห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

3.2.4.1 การศึกษาการเจริญและการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดย *B. subtilis*

นำเชื้อ *B. subtilis* ถ่ายลงอาหารเหลว ซีเอ็มซี 45 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 2 มิลลิลิตร ที่เวลา 0, 12, 24, และ 36 ชั่วโมง วัดการเจริญโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร และนำตัวอย่างปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส

3.2.4.2 การแยกน้ำมันออกจาก POME ร่วมกับการใช้เชื้อ *B. subtilis*

นำ POME ที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อปริมาณ 45 มิลลิลิตรในพลาสติก 250 มิลลิลิตร เติมด้วยเชื้อ *B. subtilis* 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ (OD_{660} เริ่มต้น เท่ากับ 0.5) ภายใต้การเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวซีเอ็มซี (culture broth) โดยใช้ระยะเวลาการเลี้ยงตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.4.1 ซึ่งได้กิจกรรมเอนไซม์

เซลลูเลสสูงที่สุด เปรียบเทียบกับการเติมด้วยส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซีจากการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* (supernatant) และชุดควบคุมที่ปราศจากเอนไซม์ (เติมอาหารเหลวซีเอ็มซีปริมาตร ปริมาตร 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร) ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปบ่มเขย่าที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 12, 24, และ 36 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างวิเคราะห์น้ำหนักตะกอนแห้ง, น้ำมันในตะกอนและน้ำมันในส่วนใส โดยดูดตัวอย่างครั้งละ 2 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนออก ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อบแห้งและชั่งน้ำหนักตะกอน จากนั้นนำมาวิเคราะห์ประมาณน้ำมันที่ปนอยู่ในตะกอนและส่วนใส และทำชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ

3.2.4.3 การแยกน้ำมันออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ร่วมกับการประยุกต์ใช้เชื้อ

B. subtilis

เลือกอัตราส่วนการใช้เชื้อพร้อมอาหารเหลว (culture broth) ต่อ POME ที่แยกน้ำมันออกจาก POME ได้ดีที่สุดจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.4.2 มาใช้กับถังแยกน้ำมันระบบ IAF แบบเดียวกันกับที่แยกน้ำมันได้ดีที่สุด จากหัวข้อ 3.2.3 การทดลองนี้ใช้ POME 16 ลิตรและมีการเดินเครื่องระบบ IAF 2 รูปแบบ คือ (1) แบบเติมเชื้อตามอัตราส่วนที่เลือกใช้พร้อมอาหารเหลวลงถังแยกและเดินเครื่องระบบ IAF ทันทีและ (2) แบบเติมเชื้อตามอัตราส่วนที่เลือกใช้พร้อมอาหารเหลวลงถังแยก กวนผสมแล้วทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงแล้วจึงทำการเดินเครื่องระบบ IAF จากนั้นเก็บตัวอย่างและวัดค่ากิจกรรมเอนไซม์ทุกๆ 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300 และ 360 นาที และนำตัวอย่างมาวิเคราะห์น้ำหนักตะกอนแห้ง, น้ำมันในส่วนใส และน้ำมันในตะกอนของ POME เปรียบเทียบกับวิธีการใช้ IAF เพียงอย่างเดียว ในหัวข้อ 3.2.3

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพหัวฉีดด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และอัตราการดูดอากาศของหัวฉีดที่อุณหภูมิต่างๆของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส) โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันในน้ำทิ้งสังเคราะห์เท่ากับ 4,000, 8,000, 12,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันในคอคอดของหัวฉีดต่ำลง ทำให้ดูดอากาศได้มากขึ้น จึงเป็นไปตามสมการเบอร์นูลลีที่ความดันในคอคอดของหัวฉีดแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำทิ้งผ่านหัวฉีด จึงสรุปได้ว่าอัตราการดูดอากาศจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลผ่านหัวฉีดของน้ำทิ้งสังเคราะห์

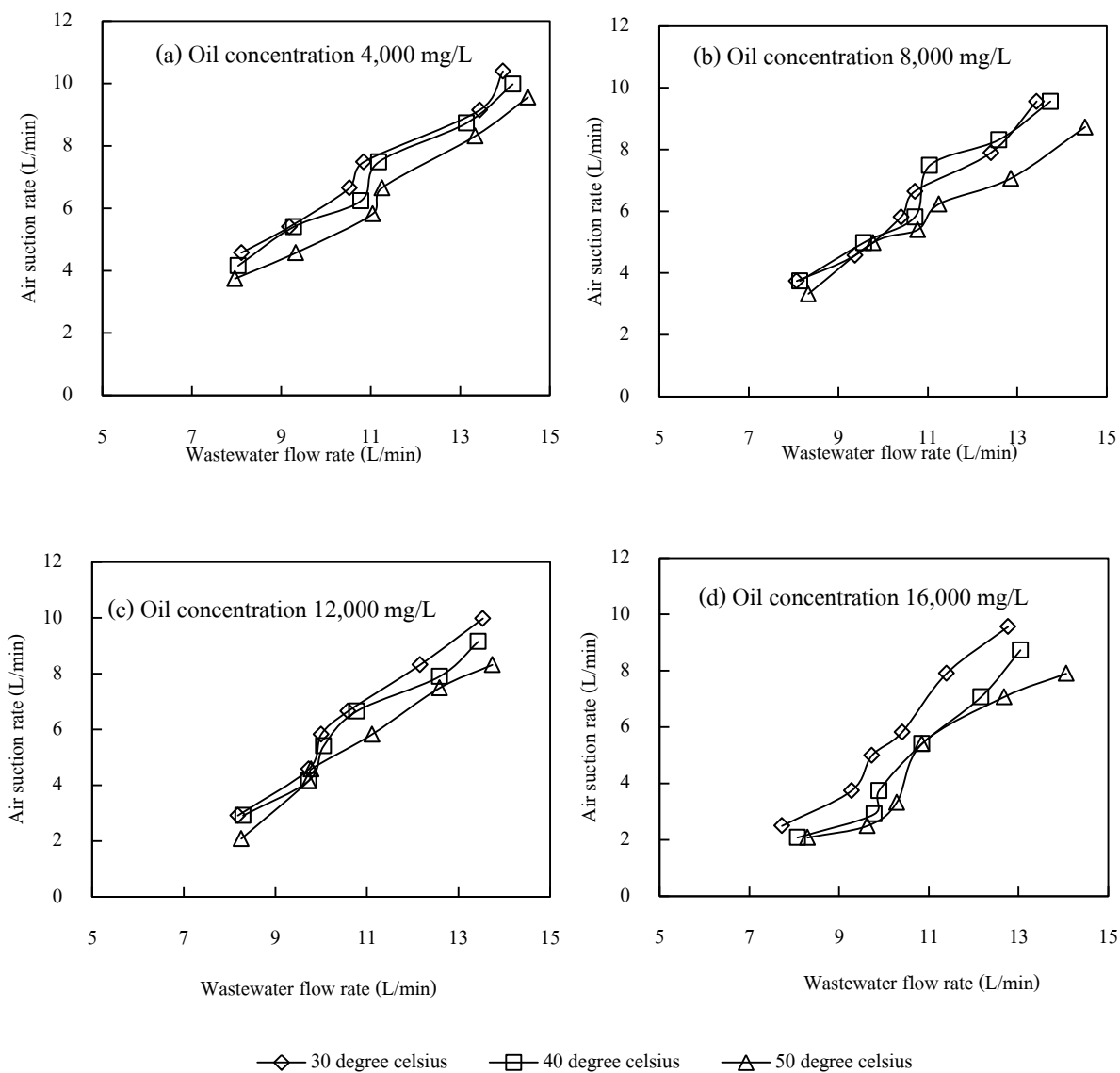
อุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งมีผลต่อค่าความหนาแน่นของน้ำทิ้ง โดยหากค่าอุณหภูมิ และหรือความเข้มข้นของน้ำมันมีค่าสูงขึ้น ความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ของน้ำทิ้งจะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอดลดลง (V_2) ส่งผลให้ค่าความดันของของเหลวที่ไหลผ่านคอคอด (P_2) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงดูดอากาศได้น้อยลง

ความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำทิ้งสังเคราะห์ส่งผลต่ออัตราการดูดหรือเหนี่ยวนำอากาศของหัวฉีดได้ด้วย กล่าวคือน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการดูดอากาศของหัวฉีดมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 14 ในเรื่องผลของอุณหภูมิของน้ำทิ้งสังเคราะห์พบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน คือ อัตราการดูดอากาศมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำทิ้งสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำทิ้งมีค่าลดลง และเมื่อมองในภาพรวมพบว่าหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศตัวนี้สามารถดูดอากาศได้ 2-10 ลิตรต่อนาที ในช่วงอัตราการไหลของน้ำทิ้งผ่านหัวฉีดในอัตรา 8-14 ลิตรต่อนาที และอัตราการดูดอากาศผ่านหัวฉีดตัวนี้สามารถมีค่าสูงกว่านี้ได้หากเพิ่มอัตราการไหลของน้ำทิ้งให้สูงกว่าเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ

ผลการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเบอร์นูลลี (สมการที่ 1) หรือ (2) การปรับวาล์วหรือการเปลี่ยนขนาดของปั๊มส่งผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว นั่นคือส่งผลต่อค่าความดัน P_1 การลดลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (หรือ

เชิงมวล) ทำให้ความเร็ว V_2 ลดลง (ดูรูปที่ 6 ประกอบ) ทำให้ความดัน P_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดสูญญากาศเพียงเล็กน้อยในคอคอดของหัวฉีด ส่งผลให้อากาศภายนอกถูกดูดเข้าไปน้อยนั่นเอง


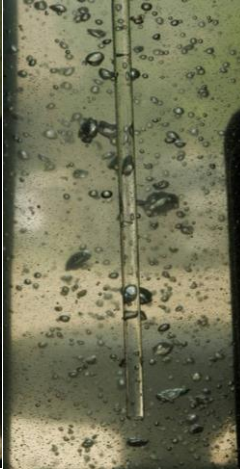


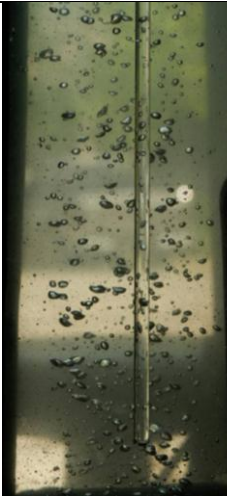



จากข้อมูลในตารางที่ 7 ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มดิบใน POME ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อยู่ในช่วง 7,500-12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับน้ำทิ้งสังเคราะห์แล้วพบว่าผลการทดลองในรูปที่ 13(b) และ 13(c) มีความเป็นไปได้ในการนำมาพิจารณาเลือกค่าความดันหรือค่าอัตราการไหลขาเข้าหัวฉีดมาใช้กับ POME ได้ ในที่นี้จึงเลือกใช้ความดันขาเข้าหัวฉีด (ความดัน P_1) เท่ากับ 7.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าอัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์ประมาณ 12.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งหัวฉีดจะดูดอากาศได้ประมาณ 7-7.5 ลิตรต่อนาที ไปใช้กับถังแยกน้ำมันจาก POME ด้วยระบบ IAF



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศกับอัตราการดูดอากาศของหัวฉีดดังกล่าว

4.2 การวัดขนาดของฟองอากาศในถังแยกน้ำมันที่อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน

ได้ศึกษาขนาดและรูปร่างของฟองอากาศที่ผลิตได้จากหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ถังแยกน้ำมันระบบ IAF ตามรูปที่ 9 ที่มีการดัดแปลงถึงหมายเลข 1 ให้มีผนังโปร่งใส โดยการติดกระจกทั้ง 2 ด้าน ตามรูปที่ 12 และใช้น้ำธรรมดาแทน POME เพื่อให้สามารถมองเห็นฟองอากาศ และสามารถถ่ายภาพได้ ทำการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งกำหนดความดันของอากาศที่เข้าสู่ระบบคงที่ คือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และทดลองในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส), 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยเทียบกับวัตถุที่มีขนาดแน่นอน (แท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 มิลลิเมตร) และใช้โปรแกรม ImageJ ในการวัดขนาดของฟองอากาศ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 14 และ 15

Temperature pressure	2.5 psi	5 psi	7.5 psi	10 psi
Room temperature				
	Pw= 2.5 psi Qw= 17.48 L/min Qair= 8.59 L/min	Pw= 5 psi Qw= 17.82 L/min Qair= 12.33 L/min	Pw= 7.5 psi Qw= 17.82 L/min Qair= 14.96 L/min	Pw= 10 psi Qw= 18.37 L/min Qair= 16.49 L/min
50°C				
	Pw= 2.5 psi Qw= 18.18 L/min Qair= 10.67 L/min	Pw= 5 psi Qw= 18.75 L/min Qair= 13.86 L/min	Pw= 7.5 psi Qw= 19.57 L/min Qair= 16.21 L/min	Pw= 10 psi Qw= 20.22 L/min Qair= 17.46 L/min

60°C				
	Pw= 2.5 psi	Pw= 5 psi	Pw= 7.5 psi	Pw= 10 psi
	Qw= 21.69 L/min	Qw= 22.22 L/min	Qw= 22.78 L/min	Qw= 23.08 L/min
	Qair= 12.61 L/min	Qair= 15.38 L/min	Qair= 17.46 L/min	Qair= 18.84 L/min
70°C				
	Pw= 2.5 psi	Pw= 5 psi	Pw= 7.5 psi	Pw= 10 psi
	Qw= 23.68 L/min	Qw= 24.66 L/min	Qw= 26.87 L/min	Qw= 27.27 L/min
	Qair= 13.16 L/min	Qair= 15.38 L/min	Qair= 17.18 L/min	Qair= 19.12 L/min

26 pixels: 5 mm.

Pw คือ ความดันของน้ำที่ไหลเข้า

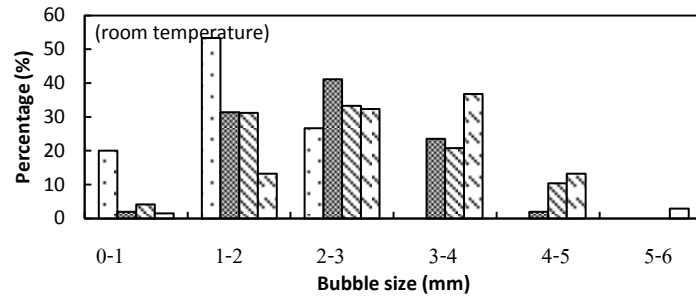
Qw คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีด

Qair คือ อัตราการดูดอากาศของหัวฉีด

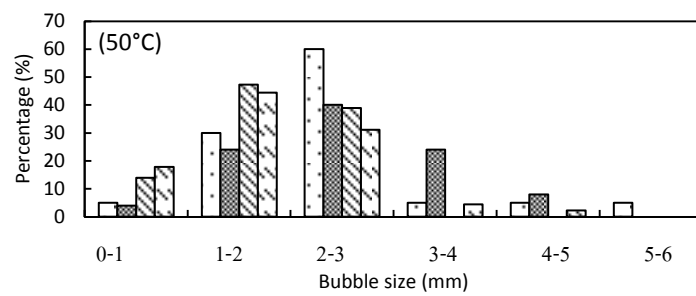
รูปที่ 14 รูปถ่ายฟองอากาศที่ผลิตจากหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศของถังแยกน้ำมัน ตามรูปที่ 12

จากรูปที่ 14 พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีดมีค่าต่ำ จะเกิดฟองอากาศในระบบน้อยกว่า เนื่องจากอากาศถูกดูดเข้ามาน้อยกว่านั่นเอง ดังนั้นถ้าหากต้องการฟองอากาศจำนวนมาก จำเป็นจะต้องเพิ่มอัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีดให้มากขึ้น เมื่อดูที่ความดันของน้ำขาเข้าหัวฉีด 7.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าได้อัตราการไหลของน้ำผ่านหัวฉีดเท่ากับ 17.82, 19.57, 22.78 และ 26.87 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ และได้อัตราการดูดอากาศของหัวฉีดเท่ากับ 14.96, 16.21, 17.46 และ 17.18 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ จะเห็นว่ากรณีของเหลวเป็นน้ำหัวฉีดจะดูดอากาศได้มากกว่ากรณีของเหลวเป็นน้ำที่สังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกันนั่นเอง

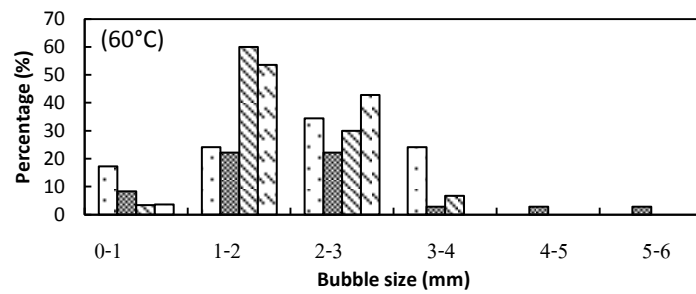
จากรูปที่ 15 พบว่าในน้ำทั้ง 4 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้อง, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสนั้น ฟองอากาศส่วนมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-4 มิลลิเมตร โดยที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) มีฟองอากาศขนาด 1-3 มิลลิเมตร รวมกันประมาณ 60% ของทั้งหมด, ที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีฟองอากาศขนาด 1-3 มิลลิเมตร รวมกันประมาณ 70% ของทั้งหมด โดย Gu และคณะ (2004) รายงานเพิ่มเติมว่าในน้ำที่อุณหภูมิต่ำ การเคลื่อนที่ของฟองอากาศจะช้ากว่าในน้ำที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากน้ำที่อุณหภูมิสูงนั้นมีความหนาแน่นต่ำกว่า ฟองอากาศจึงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว และจากรูปที่ 14 ฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในระบบที่น้ำมีอุณหภูมิสูงนั้น ฟองอากาศจะมีการรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ได้มากกว่าในระบบที่น้ำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงในระบบ IAF นั้น มีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องอีกในการทำให้ฟองอากาศรวมตัวกัน เช่น ความดันไอและอัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น



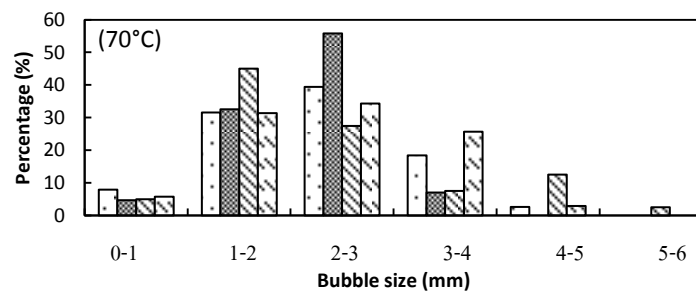
□ Q=8.59 L/min ■ Q=12.33 L/min ▨ Q=14.96 L/min ▩ Q=16.48 L/min



□ Q=10.66 L/min ■ Q=13.85 L/min ▨ Q=16.21 L/min ▩ Q=17.45 L/min

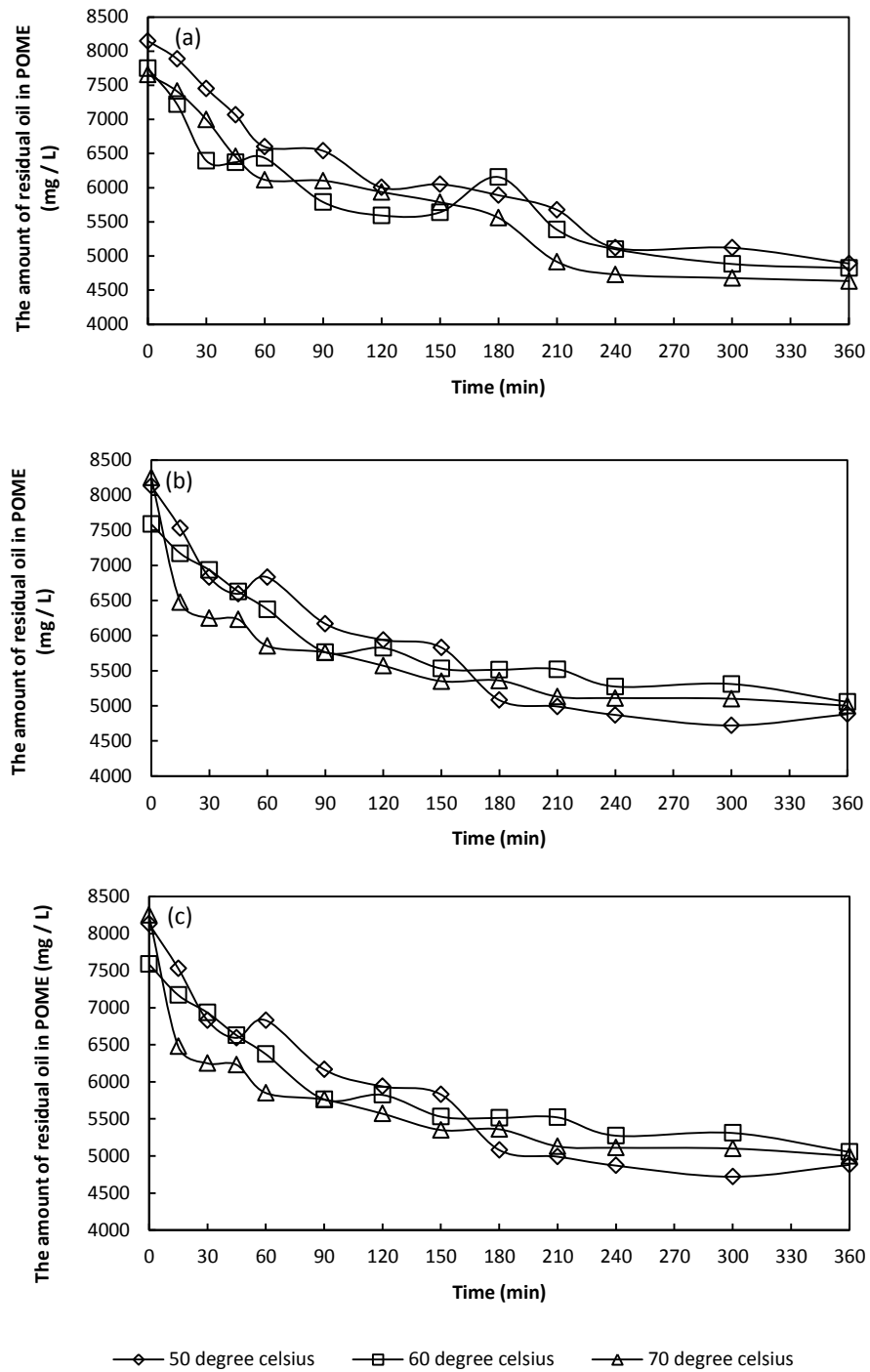


□ Q=12.60 L/min ■ Q=15.38 L/min ▨ Q=17.45 L/min ▩ Q=18.84 L/min



□ Q=13.16 L/min ■ Q=15.38 L/min ▨ Q=17.18 L/min ▩ Q=19.12 L/min

รูปที่ 15 ขนาดของฟองอากาศในน้ำที่ผลิตจากหัวฉีดเหนือขนำอากาศที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 16 การลดลงของปริมาณน้ำมันใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70

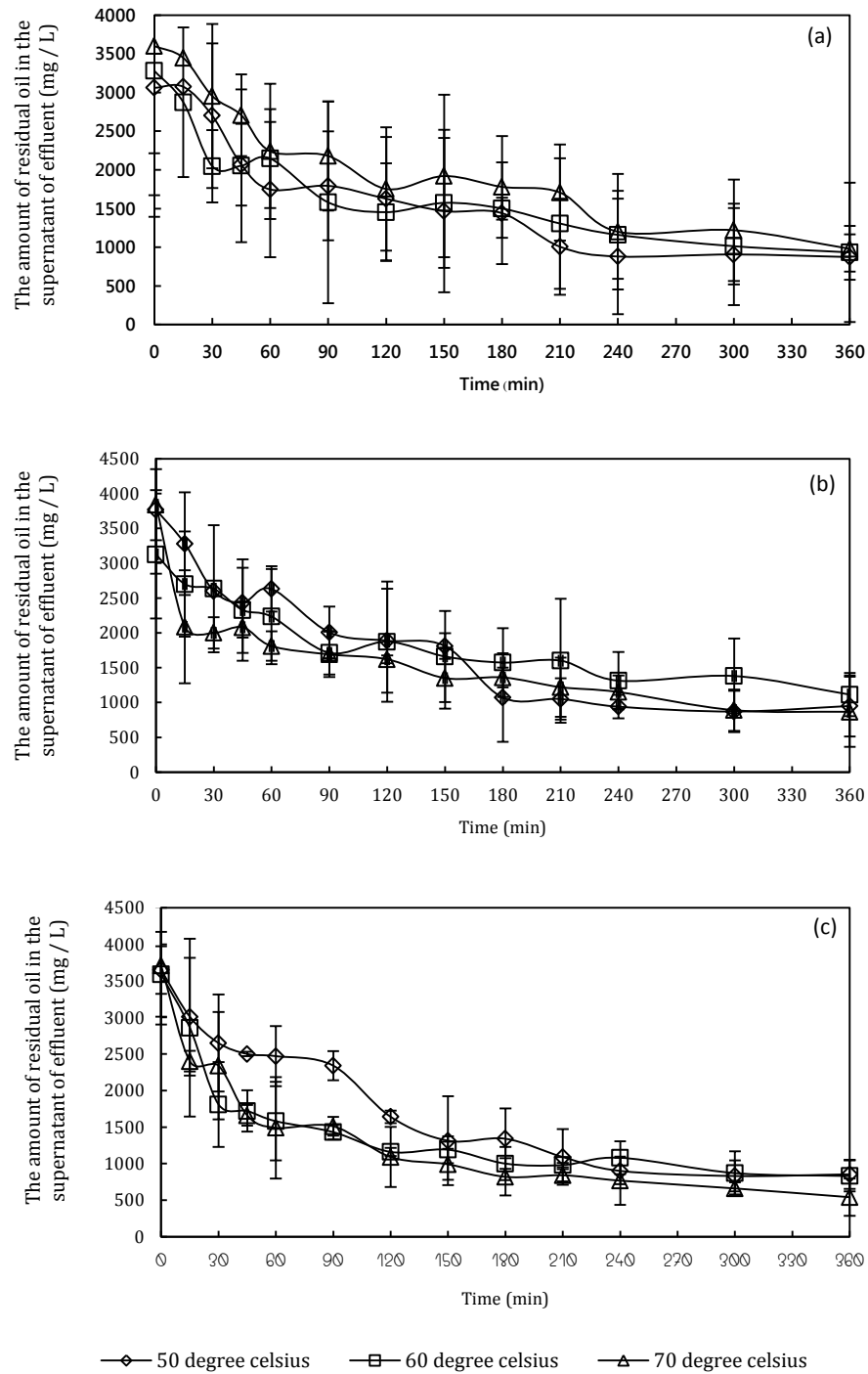
4.3 การใช้ระบบ IAF แยกน้ำมันออกจาก POME

4.3.1 การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ

จากการทดลองแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยระบบ IAF โดยใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(a) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 360 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 16 (a) พบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิ มีการลดลงของน้ำมันอย่างรวดเร็วในช่วง 0-120 นาทีแรก และหลังจากนั้นจึงค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งค่อนข้างคงที่ โดยน้ำมันที่เจือปนในน้ำที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสนั้นลดลงจาก 8,150, 7,223 และ 7,660 เหลือ 4,890, 4,823 และ 4,633 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 40, 37.76 และ 39% ตามลำดับ ส่วนการทดลองแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยระบบ IAF โดยใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(b) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 360 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 16 (b) พบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิ มีการลดลงของน้ำมันอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90 นาทีแรก และหลังจากนั้นจึงค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งค่อนข้างคงที่ โดยน้ำมันที่เจือปนในน้ำที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียสนั้นลดลงจาก 8,130, 7,585 และ 8,250 เหลือ 4,880, 5,053 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 39.97, 33.39 และ 39.39% ตามลำดับ และจากการทดลองแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ด้วยระบบ IAF โดยใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(c) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 360 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 16 (c) พบว่ามีการลดลงของน้ำมันในน้ำที่อย่างต่อเนื่องในช่วง 0-60 นาทีแรก และหลังจากนั้นแนวโน้มการลดลงจะค่อนข้างคงที่ โดยจากภาพรวม ทั้ง 3 อุณหภูมิค่อนข้างมีการลดลงของน้ำมันที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการลดลงของน้ำมันมากกว่าอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ ลดลงจาก 8,130 ถึง 4,330 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าการลดลงจาก 8,070 และ 8,050 ถึง 4,723 และ 4,590 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 46.74, 41.74 และ 42.98% ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้ง 3 กรณี พบว่าในกรณีที่ใช้ถังแยกรูปแบบเดียวกัน อุณหภูมิของ POME ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียสไม่ค่อยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำมันด้วยระบบ IAF ใดๆก็ตามรูปแบบของถังแยกน้ำมันมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำมัน โดยถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c) สามารถแยกน้ำมันได้ดีที่สุด (41.74-46.74%) เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานที่ผ่านมา พบว่า Santander และคณะ (2011) ได้ทำการแยกน้ำมันปิโตรเลียมที่ปะปนอยู่ในน้ำประมาณ 100-400

มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เครื่องแยกน้ำมันระบบ IAF ที่ออกแบบเอง ฟองอากาศที่ถูกพ่นเข้าสู่ระบบ มีขนาดประมาณ 100-600 ไมโครเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดน้ำมันได้มากถึง 85% ส่วน Sato และคณะ (1980) รายงานการทำการทดลองแยกน้ำมันปิโตรเลียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การลอยตัวด้วยฟองก๊าซไนโตรเจนแทนอากาศทั่วไป ในไนโตรเจนจะถูกทำให้เป็นฟองโดยผ่านรูพรุนที่มีขนาดแตกต่างกันไปในช่วง 0.1-0.5 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที พบว่าความเข้มข้นของน้ำมันลดลง 80% ของค่าเริ่มต้น Poh และคณะ (2014) รายงานการบำบัด POME ด้วยการใช้การลอยตัวด้วยฟองอากาศ และเปรียบเทียบอัตราการให้อากาศคือ 19.8 และ 26.4 ลิตรต่อนาที พบว่าสามารถลดปริมาณน้ำมันได้สูงสุด 74.46 และ 48.93% ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองรายงานว่าความสามารถในการกำจัดน้ำมันนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยให้อัตราการให้อากาศ 26.4 ลิตรต่อนาที ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดเล็กกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าให้อัตราการไหล 19.8 ลิตรต่อนาที ดังนั้นอัตราการให้อากาศ 26.4 ลิตรต่อนาทีจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันได้มากกว่าอัตราการไหล 19.8 ลิตรต่อนาที และ Muhammad และคณะ (2016) รายงานการบำบัด POME ด้วยวิธีลอยตัวด้วยฟองอากาศร่วมกับเมมเบรน คือใช้คลอรีนโพลีเอทิลีน (PE) ร่วมกับการลอยตัวของอากาศ โดยใช้ถังที่ทำจากแก้ว มีการกั้นแยกออกเป็นหลายห้อง ของเหลวจะตกตะกอนในห้องที่ 3, 4 และ 5 ด้วยแรงโน้มถ่วง ใช้ระยะเวลาในการเก็บ 3, 4 และ 5 วัน โดยไม่มีการเติมอากาศเพิ่ม อัตราการไหลของอากาศที่ลอยอยู่ที่ 11, 8 และ 5 ลิตรต่อนาที จากนั้นจึงส่งเข้าสู่การกรองด้วยแผ่นเมมเบรนคลอรีนโพลีเอทิลีนที่มีขนาดรูพรุน 0.4 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าค่าน้ำมันและไขมันลดลงมากที่สุดที่วันที่ 5 ด้วยอัตราการให้อากาศ 11 ลิตรต่อนาที คือลดลง 52.6% และเมื่อทดลองนำน้ำทั้งวันที่ 5 ที่ได้รับอัตราการไหลของอากาศ 5 และ 11 ลิตรต่อนาทีมากรองผ่านเมมเบรน พบว่าค่าน้ำมันและไขมันลดลงได้มากที่สุด 99.5 และ 99.9% ตามลำดับ

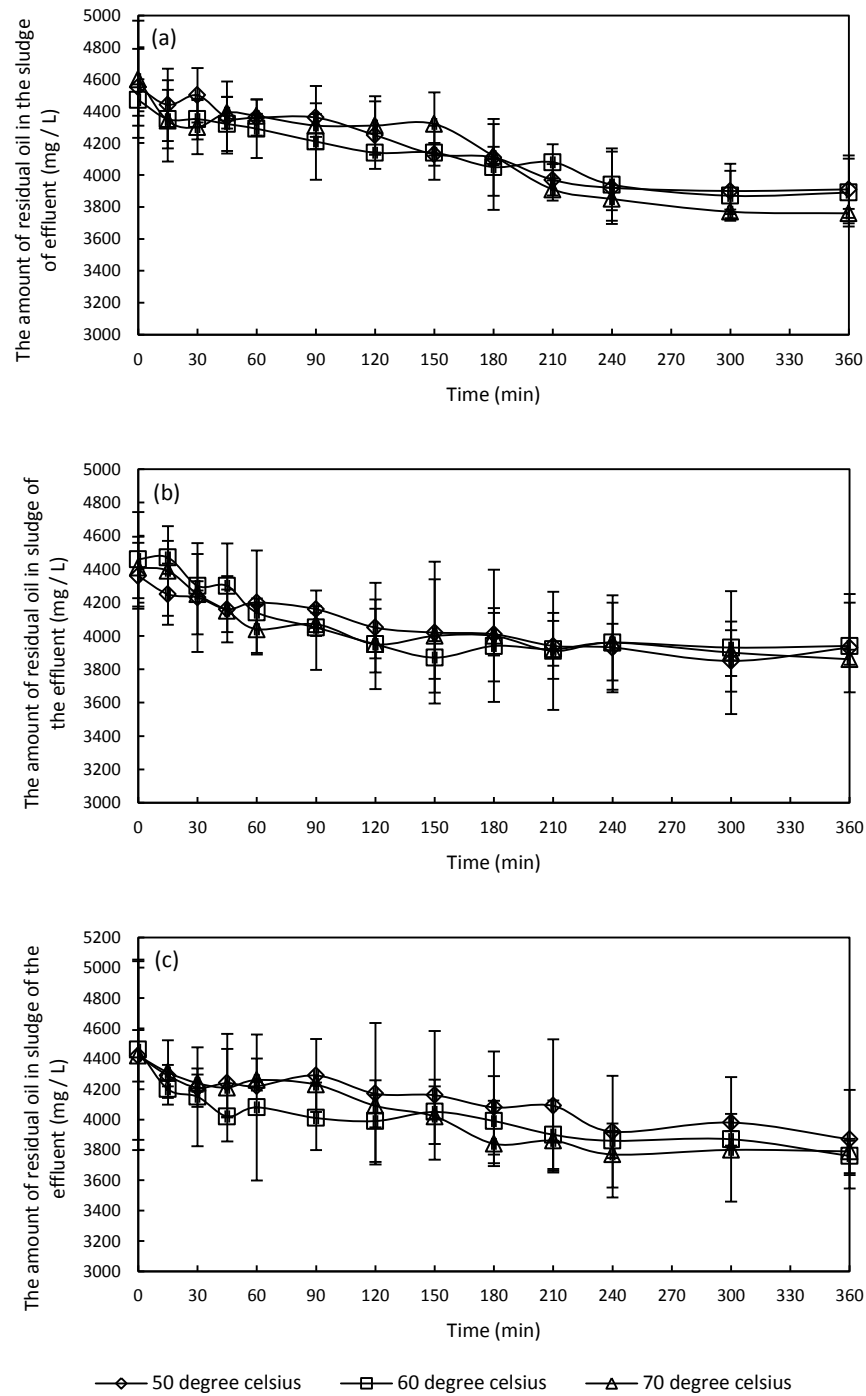


รูปที่ 17 การลดลงของปริมาณน้ำมันในส่วนใสของ POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C

4.3.2 การแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากส่วนใสของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ

จากหัวข้อ 4.3.1 แบ่งตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร นำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกส่วนใส และกากตะกอนออกจากกัน และทำการวัดปริมาณน้ำมันในส่วนใส ได้ผลดังนี้ จากรูปที่ 17(a) ปริมาณน้ำมันในส่วนใสของ POME ที่อุณหภูมิการทดลอง 50, 60, 70 องศาเซลเซียส ลดลง 3,600, 3,280 และ 3,060 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 980, 933 และ 873 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำมันในส่วนใสเท่ากับ 72.77, 71.54 และ 71.45% ตามลำดับ ถือว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ส่วนจากรูปที่ 17(b) ปริมาณน้ำมันในส่วนใสของ POME ที่อุณหภูมิการทดลอง 50, 60, 70 องศาเซลเซียส ลดลง 3,280, 3,126 และ 2,713 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 1,120, 1,113 และ 866 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำมันในส่วนใสเท่ากับ 65.85, 64.39 และ 68.05% ตามลำดับ ถือว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิและจากรูปที่ 17(c) ปริมาณน้ำมันในส่วนใสของ POME ที่อุณหภูมิการทดลอง 50, 60, 70 องศาเซลเซียส ลดลงจาก 3,650, 3,590 และ 3,710 เป็น 853.33, 830 และ 540 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 76.62 76.88 และ 85.44% ตามลำดับ

จากการทดลองเปรียบเทียบถังแยกทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่า การแยกน้ำมันออกจากส่วนใสของ POME นั้นสามารถแยกได้ในช่วง 65-85% โดยการแยกน้ำมันโดยถังแยกตามรูปที่ 9(c) สามารถแยกน้ำมันจากส่วนใสได้ดีที่สุด (76.62-85.44%) เนื่องจากการติดตั้งบัฟเฟิลในถังแยกช่วยเพิ่มระยะทางและเวลาการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศที่ฉีดเข้าสู่ระบบกับหยดน้ำมันใน POME ทำให้อากาศจับกับหยดน้ำมันที่ปะปนอยู่ในระบบได้มากยิ่งขึ้นและจับกลุ่มกันลอยขึ้นสู่ชั้นผิวหน้าของระบบ



รูปที่ 18 การลดลงของปริมาณน้ำมันในตะกอนของ POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C

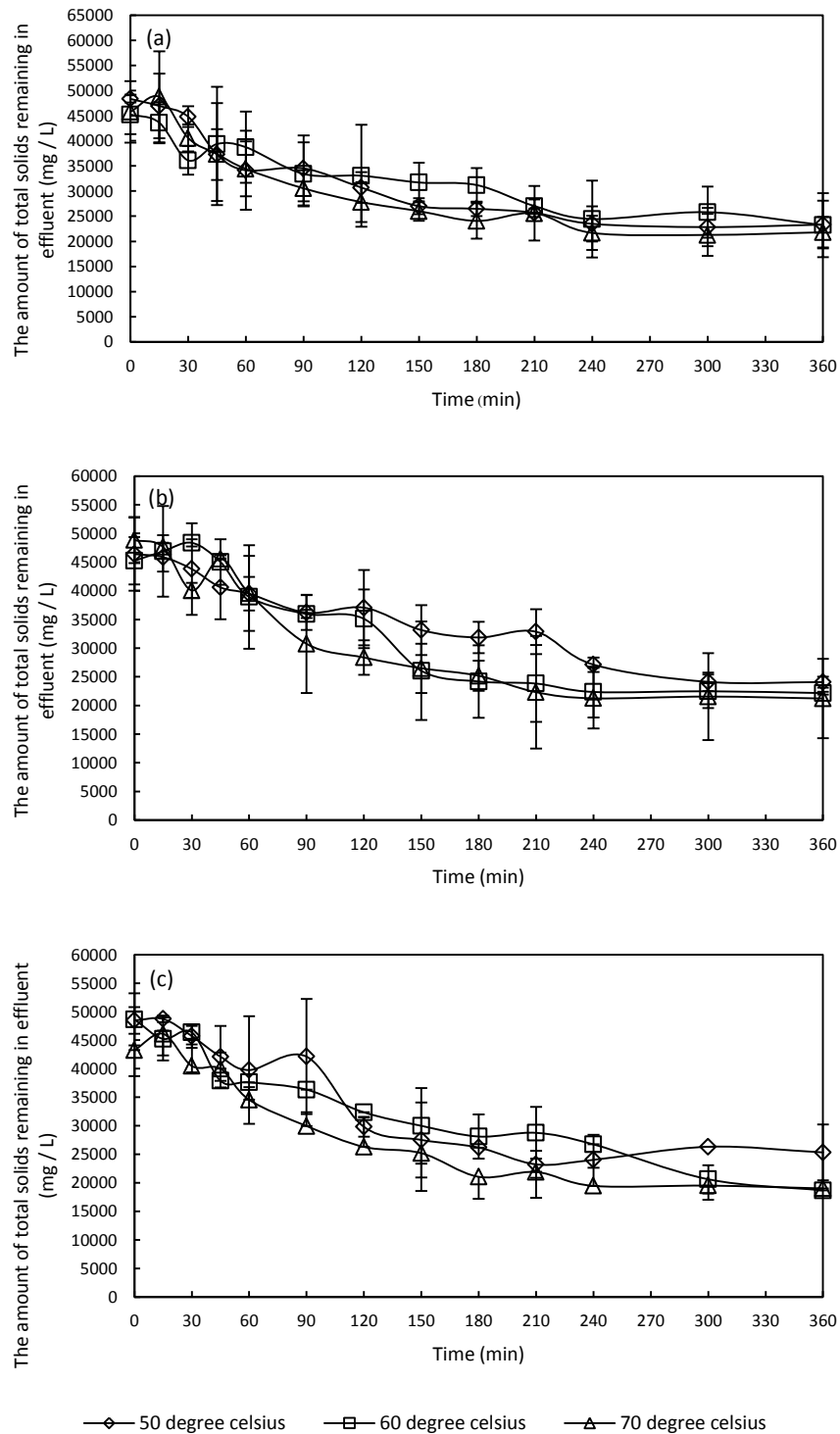
4.3.3 การวิเคราะห์การแยกน้ำมันออกจากตะกอนของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3

รูปแบบ

จากการปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใสและกากตะกอนออกจากกัน ตะกอนที่แยกได้จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม เป็นเศษเส้นใยของผลปาล์มที่ถูกบีบอัด มีขนาดเล็ก เป็นผงที่จับตัวเป็นก้อนเล็กน้อย จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันในตะกอน ได้ผลดังรูปที่ 18

จากการทดลองใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(a) พบว่าน้ำมันในตะกอนจาก POME ทั้ง 3 อุณหภูมิ ลดลงเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,550 ถึง 3,910 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,470 ถึง 3,890 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,600 ถึง 3,760 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 14.06, 12.97 และ 18.26% ตามลำดับ ดังรูปที่ 18(a) ส่วนการทดลองใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(b) พบว่าน้ำมันในตะกอนจาก POME ทั้ง 3 อุณหภูมิ ลดลงเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,360 ถึง 3,930 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,460 ถึง 3,940 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,410 ถึง 3,860 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 9.86, 11.66 และ 12.47% ตามลำดับ ดังรูปที่ 18(b) และการทดลองใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(c) พบว่าน้ำมันในตะกอนจาก POME ทั้ง 3 อุณหภูมิ ลดลงเรื่อยๆตามระยะ โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,420 ถึง 3,870 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,460 ถึง 3,760 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 4,420 ถึง 3,790 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 12.44, 15.70 และ 14.25% ตามลำดับ ดังรูปที่ 18(c)

จากการทดลองพบว่าน้ำทิ้งทั้ง 3 อุณหภูมิ มีการลดลงของน้ำมันในตะกอนของน้ำทิ้งค่อนข้างเร็วในช่วง 0-60 นาทีแรก จากนั้นจึงค่อยๆลดลงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง โดยรวมสามารถแยกน้ำมันในตะกอนได้อยู่ในช่วง 9-18%

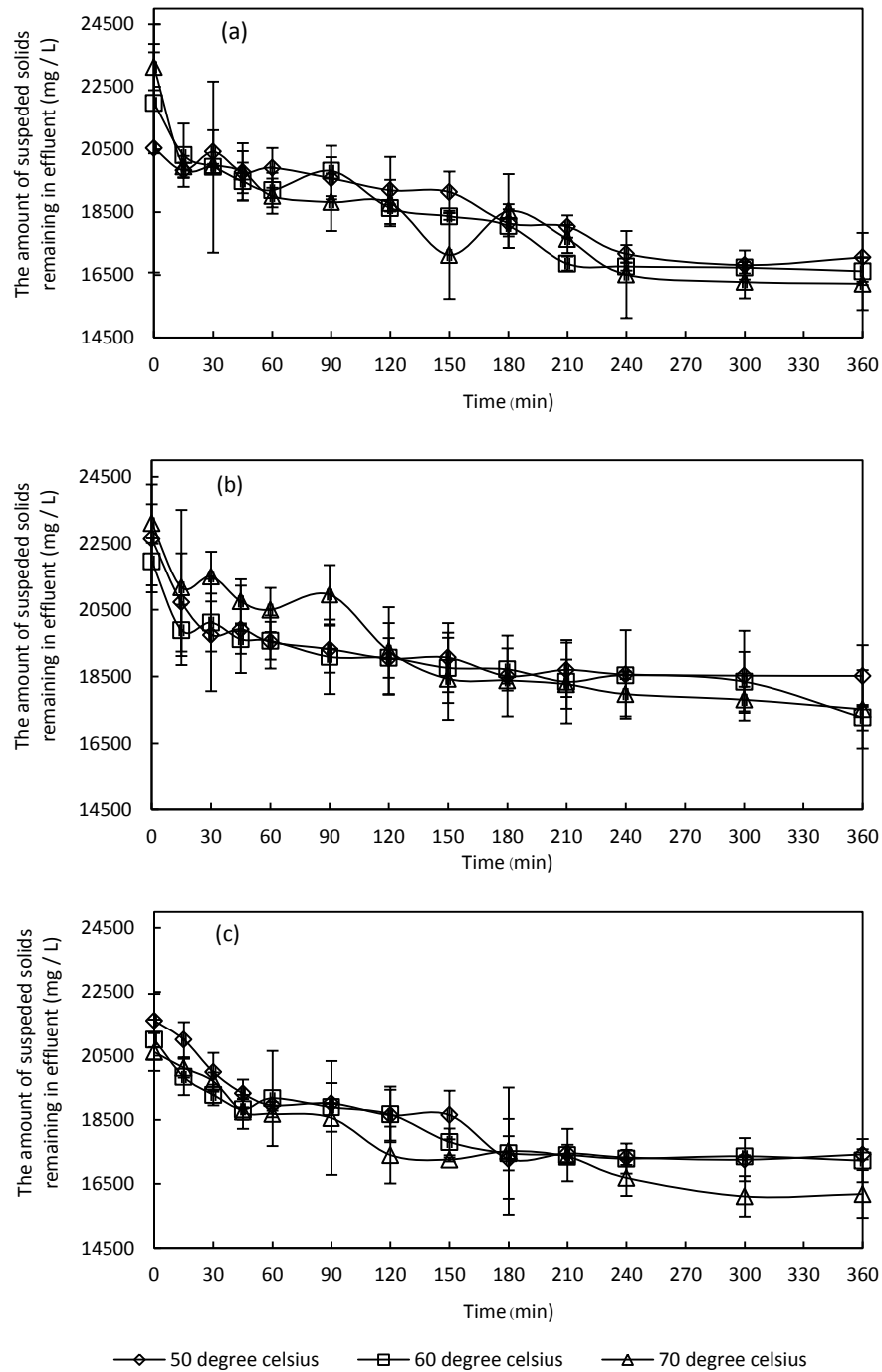


รูปที่ 19 การลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมดใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C

4.3.4 การวิเคราะห์การแยกของแข็งทั้งหมดออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ

จากรูปที่ 19(a) ผลการทดลองพบว่าการใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(a) ปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 0-210 นาที และหลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ โดยการปรับอุณหภูมิน้ำทั้ง 3 อุณหภูมิ ไม่ได้ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณของแข็งที่แตกต่างกัน โดยทั้ง 3 อุณหภูมิมีการลดลงของของแข็งจากช่วง 45,000-48,000 จนถึง 21,000-23,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของของแข็งจาก 48,333.33 เหลือ 23,330, 45,240 เหลือ 23,226.67 และ 45,766.67 เหลือ 21,806.67 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 51.73, 48.65 และ 52.35% ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 19(b) ผลการทดลองพบว่าการใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(b) นั้น ในช่วงแรกของ การทดลองนั้นปริมาณของแข็งไม่ค่อยลดลง ซึ่งเกิดจากการที่น้ำที่ทำการหมุนเวียนสูงจากรูปแบบของ ถังที่มีท่อแอร์ลิฟต์ตรงกลางทำให้ POME เกิดการหมุนเวียน หลังจากนั้นของแข็งทั้งหมดจึงค่อยๆ ลดลงใน 2-3 ชั่วโมงถัดมา และเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 4-6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียสมีการลดลงของของแข็งทั้งหมดจาก 46,293.33 เหลือ 24,085, จาก 45,235 เหลือ 22,160 และ จาก 48,833.33 เหลือ 21,215 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 47.97, 51.01 และ 56.55% ตามลำดับ และจากรูปที่ 19(c) ผลการทดลองพบว่าการใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(c) นั้น POME ทั้ง 3 อุณหภูมิ มีการลดลงของของแข็งทั้งหมดอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 4 ของการทดลอง ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าคงที่ โดยที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งทั้งหมด มีการลดลงจาก 48,460 เหลือ 25,333.33, จาก 48,645 เหลือ 18,670 และจาก 43,250 เหลือ 19,020 ตามลำดับ คิดเป็น 47.72, 61.61 และ 56.02% ตามลำดับ

จากการทดลองเปรียบเทียบถังแยกทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่า ถังแยกตามรูปที่ 9(c) มีการแยกของแข็งทั้งหมดได้มากที่สุด คือน้ำที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของของแข็งคิดเป็น 47.72, 61.61 และ 56.02% ตามลำดับ เนื่องจากรูปแบบของถังที่ประกอบด้วย แผ่นบัพเฟิลภายในที่กอลง ทำให้เพิ่มระยะทางและระยะเวลาในการเกาะติดระหว่างฟองอากาศ และอนุภาคของแข็งในระบบ ทำให้ฟองอากาศสามารถจับกับอนุภาคของแข็งและพาลอย ขึ้นสู่ชั้นผิวน้ำได้มากขึ้น



รูปที่ 20 การลดลงของปริมาณของแข็งแขวนลอยใน POME เทียบกับเวลาโดยใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a), 9(b) และ 9(c) ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C

4.3.5 การวิเคราะห์การแยกของแข็งแขวนลอยออกจาก POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก

3 รูปแบบ

จากรูปที่ 20(a) คือการใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(a) พบว่าน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการลดลงของของแข็งแขวนลอยมากกว่าน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียสเล็กน้อย คือ ลดลงจาก 23,130 เหลือ 16,220 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 29.87% ส่วนน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีการลดลงของของแข็งแขวนลอยจาก 20,536 เหลือ 17,060 และจาก 21,985 เหลือ 16,615 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 16.92 และ 24.42% ตามลำดับ ส่วนจากรูปที่ 20(b) พบว่ากรณีใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(b) นั้น การแยกของแข็งแขวนลอยจาก POME ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยจาก 22,645 เหลือ 18,520, จาก 21,955 เหลือ 17,270 และจาก 23,105 เหลือ 17,520 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 18.21, 21.33 และ 24.17% ตามลำดับ และจากรูปที่ 20(c) พบว่า การแยกของแข็งแขวนลอยด้วยการใช้ถังแยกตามรูปที่ 9(c) จาก POME ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีการลดลงของของแข็งแขวนลอยจาก 21,600 เหลือ 17,420, จาก 21,003 เหลือ 17,225 และจาก 20,610 เหลือ 16,185 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 19.35, 17.98 และ 21.47% ตามลำดับ

จากการทดลองเปรียบเทียบถังแยกทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่าถังแยกตามรูปที่ 9(a) ได้ดีที่สุด รองลงมาคือถังแยกตามรูปที่ 9(b) และ 9(c) ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าการลดลงของของแข็งแขวนลอยมีปริมาณใกล้เคียงกันในถังทั้ง 3 รูปแบบ ทั้งนี้เนื่องจากว่าของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา แขนงลอยอยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งอาจมีขนาดเล็กเกินกว่าที่ฟองอากาศจะเข้าจับติดและพาลอยตัวขึ้นได้ โดยจากรายงานของ Sarhan และคณะ (2016) ได้รายงานว่า การเข้าจับอนุภาคของฟองอากาศที่มีประสิทธิภาพนั้น ฟองอากาศควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ในขณะที่ขนาดของอนุภาคของแข็งควรมีขนาดประมาณ 50 ถึง 600 ไมครอน ซึ่งวิธีการแยกของแข็งแขวนลอยที่เหมาะสมและง่ายสมควรใช้วิธีการตกตะกอนหรือการกรองด้วยกระดาษกรองมากกว่า

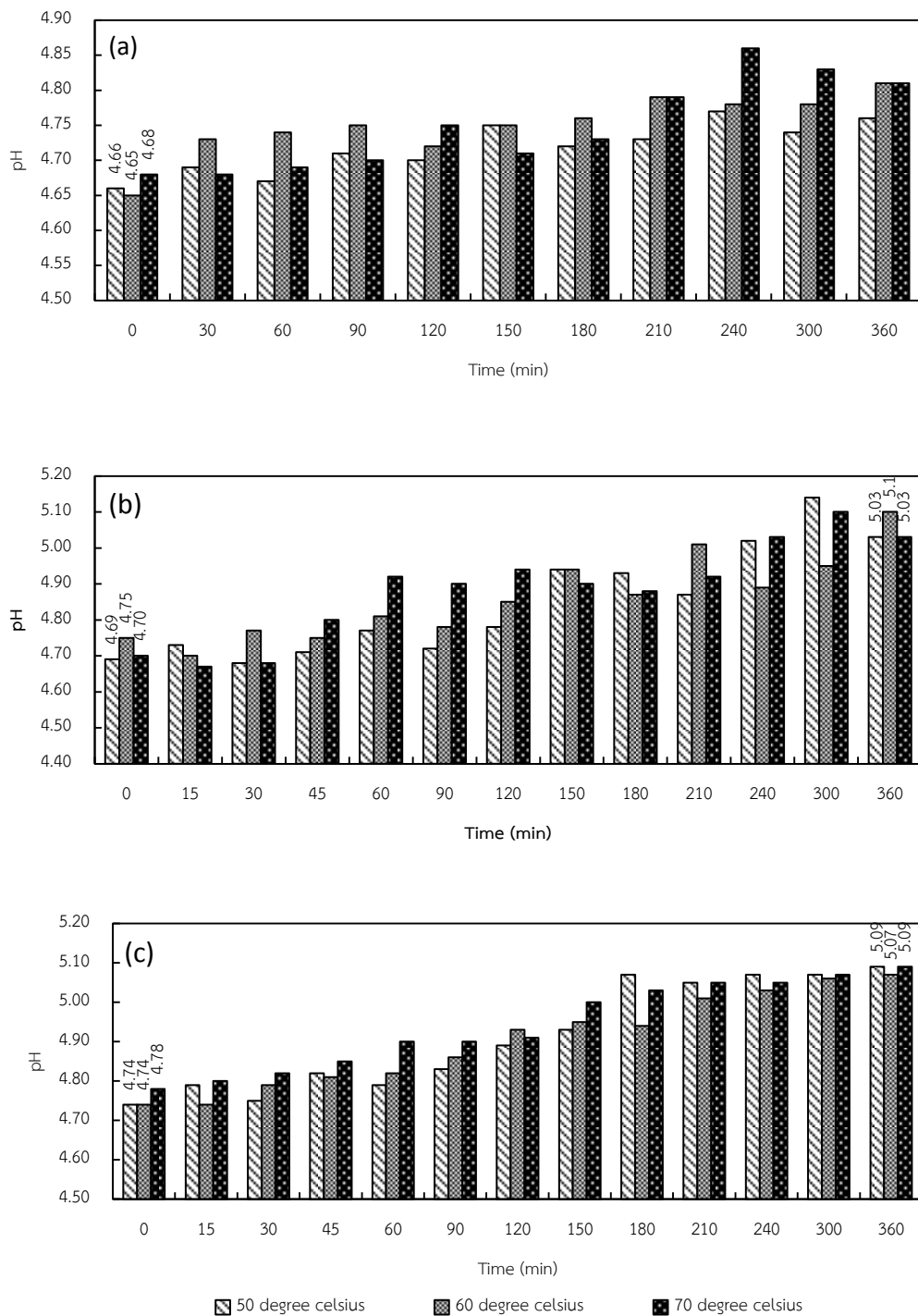
4.3.6 การวิเคราะห์ค่าพีเอชของ POME ด้วยระบบ IAF ที่มีถังแยก 3 รูปแบบ

จากรูปที่ 21 พบว่า ค่าพีเอชของ POME ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 ที่ผ่านการให้อากาศด้วยระบบ IAF มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลา โดยการใช้ถังแยกแบบ 9(a) ส่งผลให้น้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.66, 4.65 และ 4.68 ไปจนถึง 4.76, 4.81 และ 4.81 ตามลำดับ ถังแยกแบบ 9(b) ส่งผลให้น้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.69, 4.75 และ 4.70 ไปถึง 5.03, 5.1 และ 5.03 ตามลำดับ ส่วนการใช้ถังแยกแบบ 9(c) ส่งผลให้น้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.74, 4.74 และ 4.78 ไปจนถึง 5.09, 5.07 และ 5.09 ตามลำดับ

โดยค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลมาจากการที่ฟองอากาศเข้าสู่ระบบเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลของน้ำออกเป็น 2 ส่วนคือไฮดรอกซิลไอออน [H⁺] และไฮดรอกไซด์ไอออน [OH⁻] ในสารละลายที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในอากาศเข้ามาละลายในน้ำอยู่เล็กน้อย ฟองอากาศที่เข้ามานี้จะส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้น้อยลง และเกิดการฟอร์มตัวเป็นไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) ซึ่งความเป็นด่างของน้ำประกอบด้วย คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ตามสมการ (Poh *et al.*, 2014)



สอดคล้องกับรายงานของ Poh และคณะ (2014) รายงานการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการลอยตัวด้วยฟองอากาศ โดยใช้ POME ที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาแล้ว พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.05 หลังจากผ่านการให้อากาศด้วยอัตราการไหลของอากาศ 19.8 และ 24.6 ลิตรต่อนาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 8.06 และ 8.07 ตามลำดับ

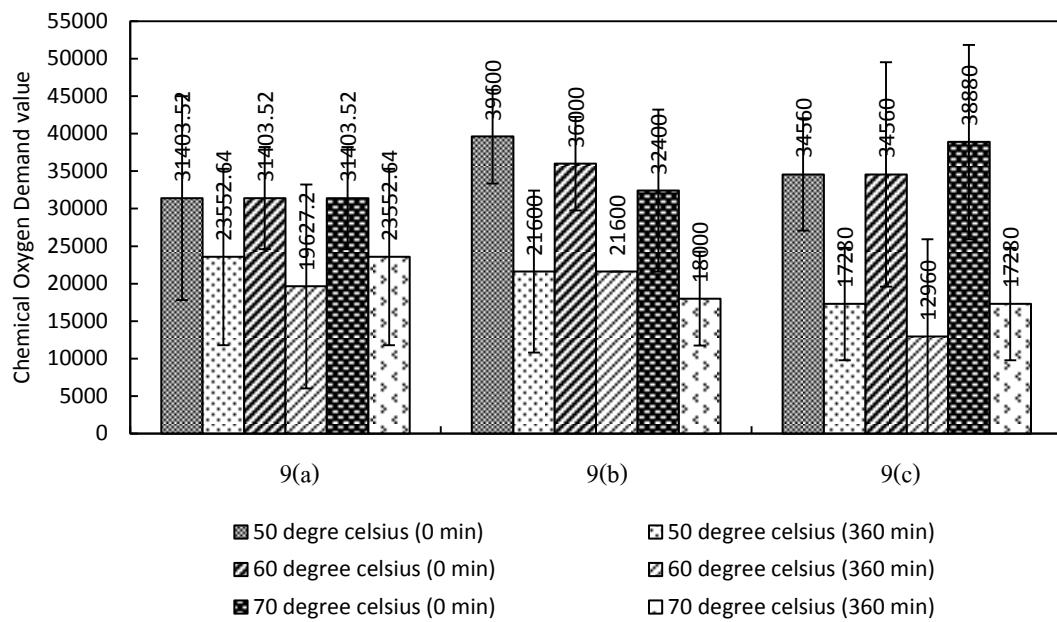


รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงของ pH ใน POME ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C เทียบกับเวลา : (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)

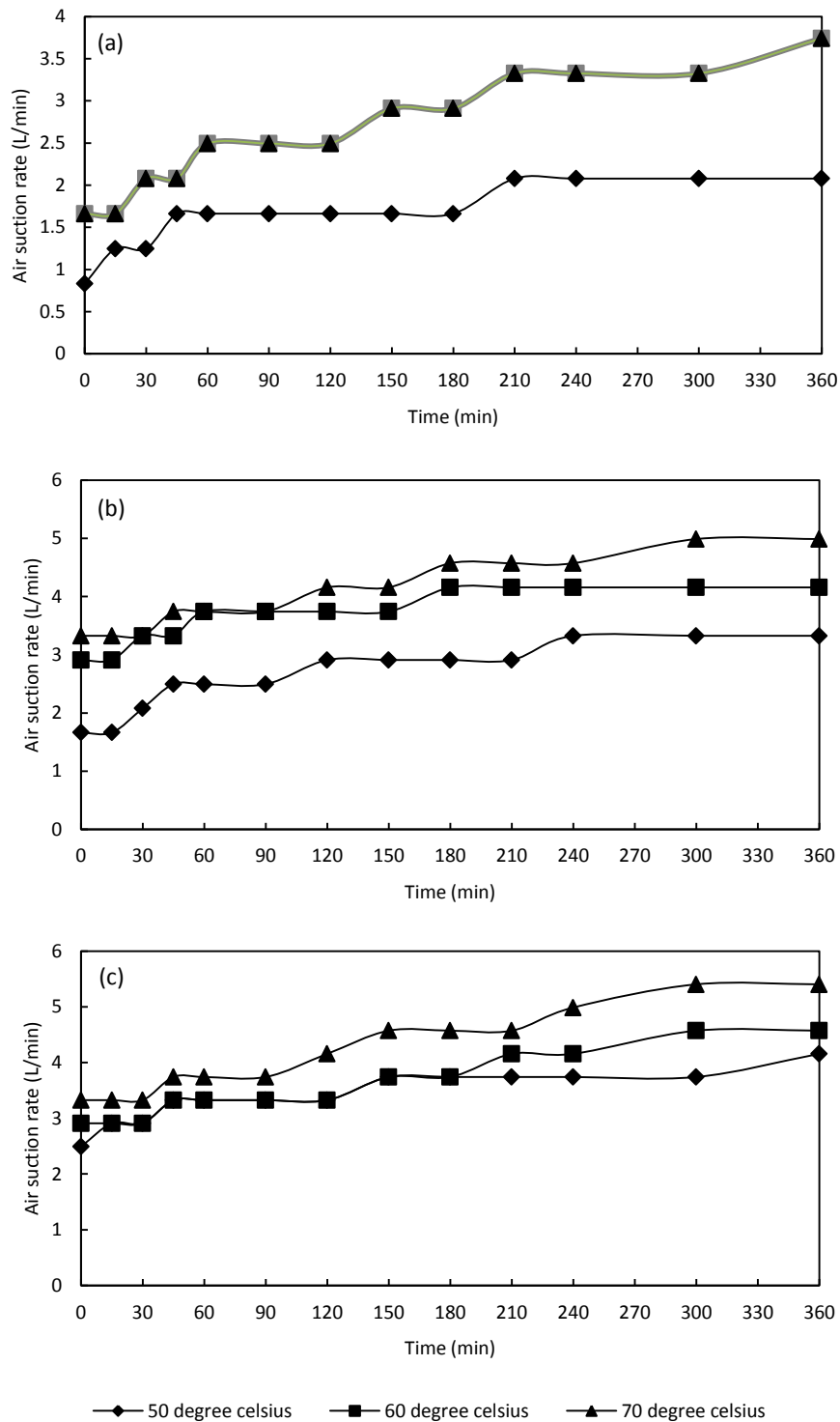
4.3.7 การวิเคราะห์ค่าซีไอดีของ POME ที่ผ่านการให้อากาศโดยใช้ถังแยกทั้ง 3 แบบ

จากรูปที่ 22 พบว่าการใช้ถังแยกแบบ 9(a), 9(b) และ 9(c) มีค่าซีไอดีจากนาที่ที่ 0 จนถึงนาที่ที่ 360 ลดลง โดยการใช้ถังแยกแบบ 9(a) และปรับอุณหภูมิน้ำทิ้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสนั้น พบว่าจากนาที่ที่ 0 ถึงนาที่ที่ 360 น้ำทิ้งอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าซีไอดีลดลงจาก 31,403 ถึง 23,552 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีค่าซีไอดีลดลงจาก 31,403 ถึง 19,627 มิลลิกรัมต่อลิตร และ น้ำทิ้งอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีค่าซีไอดีลดลงจาก 31,403 ถึง 23,552 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการใช้ถังแยกแบบ 9(b) นั้นพบว่าจากนาที่ที่ 0 ถึงนาที่ที่ 360 น้ำทิ้งอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าซีไอดีลดลงจาก 39,600 ถึง 21,600 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีค่าซีไอดีลดลงจาก 36,000 ถึง 21,600 มิลลิกรัมต่อลิตร และ น้ำทิ้งอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีค่าซีไอดีลดลงจาก 32,400 ถึง 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถังและอุณหภูมิน้ำที่มีค่าซีไอดีลดลงมากที่สุดคือ ถังแยกแบบ 9(c) โดยน้ำทิ้งที่ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าซีไอดีจากนาที่ที่ 0 ถึง นาที่ที่ 360 ลดลงจาก 34,560 ถึง 17,280, 34,560 ถึง 12,960 และ 38,880 ถึง 17,280 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 50.00, 62.50 และ 55.55 % ตามลำดับ เนื่องจากรูปแบบของถังมีการเพิ่มท่อตรงกลางและแผ่นกั้นน้ำไฟภายใน ทำให้ระยะเวลาในการที่น้ำทิ้งจะสัมผัสกับฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น ฟองอากาศจึงจับกับสารอินทรีย์ต่างๆ ได้มากขึ้น และพาสารอินทรีย์เหล่านั้นลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ค่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งลดน้อยลง ค่าซีไอดีจึงลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับการทดลองของ Poh และคณะ (2014) ที่ทำการบำบัด POME โดยพ่นอากาศเข้าสู่ระบบปริมาณ 19.8 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าสามารถลดค่าซีไอดีได้สูงสุด 53.7% แต่เมื่อเพิ่มอัตราการพ่นอากาศเป็น 26.4 ลิตรต่อนาที ค่าซีไอดีจะลดลงได้สูงสุด 45.9% Karhu และคณะ (2014) รายงานการแยกน้ำมันออกจากน้ำด้วยการใช้สารเร่งการตกตะกอน CTAB (cetyltrimethylammonium bromide), PolyDADMAC (polydiallyldimethylammonium chloride) และ Epi-DMA (epichlorohydrin-dimethylamine copolymer) ร่วมกับการลอยตัวด้วยฟองอากาศซึ่งมีขนาดของฟองอากาศประมาณ 40-80 ไมครอน จากผลการทดลองพบว่า การลดลงของค่าซีไอดีของการใช้วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศร่วมกับ CTAB น้อยกว่าการใช้วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศร่วมกับ PolyDADMAC และ Epi-DMA โดยการใช้ PolyDADMAC ขนาด 334 ppm สามารถลดซีไอดีได้สูงสุด 100% ส่วนการใช้ Epi-DMA ขนาด 596 ppm นั้น สามารถลดซีไอ

ได้สูงสุด 93% ตามลำดับ ซึ่งจากการเปรียบเทียบแล้ว แสดงให้เห็นว่า การใช้สารเร่งการตกตะกอนร่วมกับการลอยตัวด้วยฟองอากาศนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 22 ค่าซีโอดี (COD) ของ POME ก่อนและหลัง 6 ชั่วโมงของการทดลอง : (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)



รูปที่ 23 อัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผ่านหัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ ที่อุณหภูมิ POME 50, 60 และ 70 °C: (a) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(a); (b) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(b); (c) การใช้ถังแยกน้ำมันตามรูปที่ 9(c)

4.3.8 การวัดอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านท่อ

วัดความเร็วของการไหลของอากาศที่ถูกดูดผ่านท่อของถัง 3 รูปแบบ และน้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ด้วยเครื่องโรตารีมิเตอร์ จากนั้นนำมาคำนวณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูปที่ 23 เพื่อทราบอัตราการไหลของอากาศทั้งหมด จากผลการทดลองพบว่าความเร็วในการไหลของอากาศและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศนั้นแปรผันตรงซึ่งกันและกัน คือเมื่อความเร็วในการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น อัตราการไหลเชิงปริมาตรก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยการใช้น้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงนั้นส่งผลให้อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้าสู่ท่อได้เร็วกว่าการใช้น้ำทิ้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ และน้ำทิ้งที่อุณหภูมิเดียวกัน

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกน้ำมัน, ของแข็งทั้งหมด, ของแข็งแขวนลอย, ค่าซีไอดี และค่าพีเอชหลังการลอยตัวด้วยฟองอากาศ

The removal of Oil&grease (%)	The removal of total solids (%)	The removal of total suspended solids (%)	The removal of Chemical oxygen demand (%)	pH	References
60-80	-	-	-	-	Painmanakul., 2001
25	-	-	-	7-8	วิริศา ยอดศรี และ สุภาวดี ท้วยะบัตร (2556)
72.28	-	-	-	3.5-5	ชาญชล นานันต์และ นภัสสร วงศ์เขื่อนแก้ว (2557)
71.86	-	-	-	-	เมธาวิ ทองนอก (2557)
74.46	-	57.29	53.74	7.05	Poh <i>et al.</i> , 2014
52.6	-	86.4	36.1	-	Muhammad <i>et al.</i> ,2016
41.47	52.27	80.64	50.00	5.09	This work Refer to Figure 9(c), 50°C, P ₁ =7.5 psi
42.98	38.38	82.01	37.50	5.07	This work Refer to Figure 9(c), 60°C, P ₁ =7.5 psi
41.48	43.97	78.52	44.44	5.09	This work Refer to Figure 9(c), 70°C, P ₁ =7.5 psi

บทสรุป การทดลองที่ 4.3

ตามทฤษฎีแล้วการแยกอนุภาคต่างๆออกจาก POME นั้นเป็นไปได้หลายประเด็น ประเด็นแรกรายงานว่า POME ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคเป็นประจุลบ เนื่องจากมีองค์ประกอบของโปรตีนและของแข็งจำนวนมาก (Lawrence *et al.*, 2006, Tuan *et al.*, 2012, Gamage *et al.*, 2007 and Ariffin *et al.*, 2007) ซึ่ง Jia และคณะ (2013) รายงานว่าอนุภาคของฟองอากาศนั้นมีทั้งประจุลบและประจุบวก แต่บริเวณพื้นผิวรอบฟองอากาศนั้นมีประจุลบ ดังนั้นจึงเกิดการผลักกันของประจุลบระหว่างฟองอากาศและอนุภาคของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องกำจัดอนุภาคสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเพื่อลดอนุภาคของประจุลบ โดยจากรายงานพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำทิ้งนั้นส่งผลทำให้พื้นผิวฟองอากาศมีความเป็นประจุลบน้อยลง แรงดันไฟฟ้าสถิตระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคสารอินทรีย์จึงอ่อนลง ส่งผลให้ค่าประจุลบระหว่างอนุภาคของฟองอากาศและสารอินทรีย์อ่อนลงเช่นกัน ทำให้การจับกันระหว่างฟองอากาศและอนุภาคสารอินทรีย์เกิดได้ดีขึ้น ดังนั้น เมื่อฟองอากาศจับกับอนุภาคสารอินทรีย์และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้น การแยกน้ำมัน, ของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย จึงเกิดได้มากขึ้นเช่นกัน เพราะฉะนั้นสาเหตุนี้จึงสอดคล้องกับการที่น้ำมัน, ของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยลดลงตามระยะเวลาการให้อากาศนั่นเอง ประกอบกับการพ่นอากาศเข้าสู่ระบบ ในระยะเวลาที่นานขึ้นนั้นทำให้ความหนาแน่นของฟองอากาศในระบบสูงขึ้น จึงเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างผิวของฟองอากาศและอนุภาคได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Laohaprapanon และคณะ (2005) ซึ่งรายงานเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีส่วนในการช่วยแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้งและเส้นใยที่อยู่ใน POME ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองข้างต้น อีกทั้ง Poh และคณะ (2014) ได้รายงานว่าค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้อากาศนั้น เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลน้ำเป็นไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และไฮดรอกซิลไอออน $[OH^-]$ ในตัวกลางที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ละลายอยู่ ดังนั้นการพ่นฟองอากาศเข้าสู่ระบบมากขึ้นจะส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายและเกิดเป็นสารไบคาร์บอเนตมากขึ้น ตามสมการที่ (1) ค่าพีเอชจึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้การลดลงของค่าประจุลบยังส่งผลต่อค่าซีโอดีอีกด้วย เนื่องจากการลดลงของประจุลบนั้นส่งผลให้ผิวของฟองอากาศจับกับของแข็งหรือสารแขวนลอยต่างๆได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าซีโอดีลดลง

ประเด็นที่สอง Lisa Smith (2017) กล่าวว่าในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงนั้นยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอีกหลายข้อ เช่น ความดันไอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันภายในระบบจึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัว ฟองอากาศจึงลอยเคลื่อนที่ภายในระบบได้ช้าลงและเคลื่อนที่แบบซิกแซกมากขึ้นเนื่องจากเกิดการชนกันเอง จากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ผลของการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่นิ่ง พบว่าน้ำมันในน้ำที่ลดลงตามระยะเวลาการพ่นอากาศ วิเคราะห์โดยการใช้เฮกเซน (C_6H_{14}) ซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดหนึ่งจัดเป็นสารในกลุ่ม non-polar หรือไม่มีขั้ว ใช้ในการสกัดสารที่ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และนิยมใช้ในการสกัดน้ำมันพืช เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ ง่ายต่อการแยกออกจากตัวถูกละลาย เนื่องจากสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 69 องศาเซลเซียส) ทำให้ช่วยลดต้นทุนการดำเนินงาน

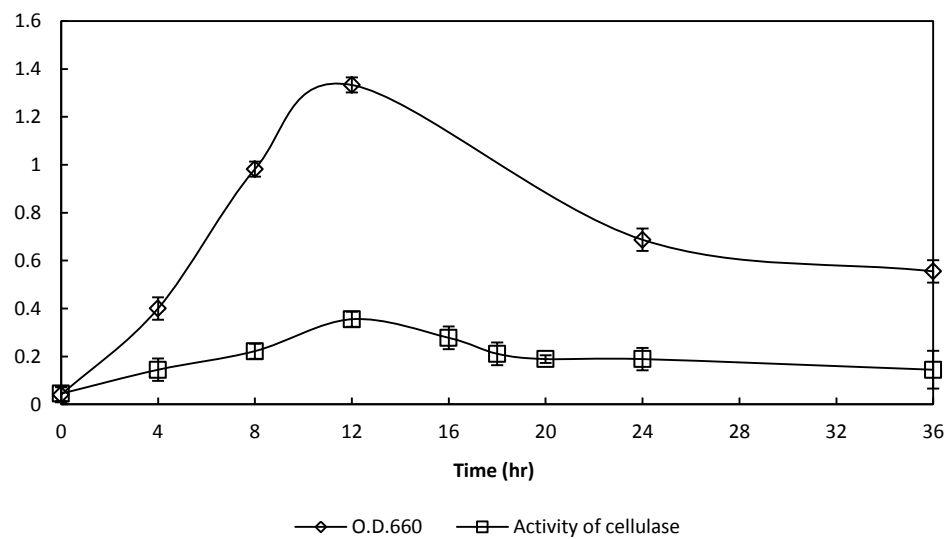
4.4 การใช้จุลินทรีย์ในการแยกน้ำมันออกจาก POME

เชื้อ *B. subtilis* ซึ่ง streak บนอาหารแข็ง NA จากห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดย POME ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น POME ชุดที่ 2 มีคุณลักษณะทั่วไปคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด 22,220 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอย 16,810 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าน้ำมันและไขมัน 10,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอดี 32,400 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเท่ากับ 4.79

4.4.1 การศึกษาการเจริญและการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดย *B. subtilis*

เนื่องจากเชื้อ *B. subtilis* สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่ตัดพันธะ β -1,4 glucosidase ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสในองค์ประกอบของเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของของแข็งส่วนใหญ่ใน POME ได้ และมีอัตราการเจริญสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี จึงเลือกใช้เชื้อ *B. subtilis* เพื่อช่วยแยกน้ำมันที่แทรกอยู่ตามเส้นใยเซลลูโลสให้หลุดออกมา เริ่มโดยเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* 1 หลูป ถ่ายลงอาหารเหลว NB (Nutrient broth) 45 มิลลิลิตร ใน ฟลasks ปริมาตร 150 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อเริ่มต้น จากนั้นถ่ายหัวเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 10 ลงในอาหารเหลวซีเอ็มซีปริมาตร 45 มิลลิลิตร ในฟลasks ปริมาตร 150 มิลลิลิตร นำไปบ่มเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่ 0, 4, 8, 12, 24 และ 36 ชั่วโมง เพื่อวัดการเจริญ

โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร และปั่นเหวี่ยงแยกเซลล์ ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำส่วนใสจากการเลี้ยงเชื้อไปวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส (ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดกิจกรรมของเอนไซม์ไซลานเนส เนื่องจากมีรายงานว่าเชื้อผลิตเอนไซม์ชนิดนี้น้อยมาก (อ้างจาก สัตยทัตต์ สินจรรยาศักดิ์, 2554) และจะยึดถือสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์ของ *B. subtilis* ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสเป็นหลัก ผลการวิเคราะห์สรุปว่าเชื้อจุลินทรีย์มีการเจริญสูงสุดที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง โดยมีค่าการเจริญเท่ากับ 1.333 ซึ่งสอดคล้องกับค่ากิจกรรมเอนไซม์ โดยเชื้อมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดที่ 12 ชั่วโมง คือ 0.35 หน่วยต่อมิลลิลิตร จากนั้นค่ากิจกรรมจึงค่อยๆลดลงตามระยะเวลาการเลี้ยง ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 การเจริญเติบโตและค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อ *B. subtilis*

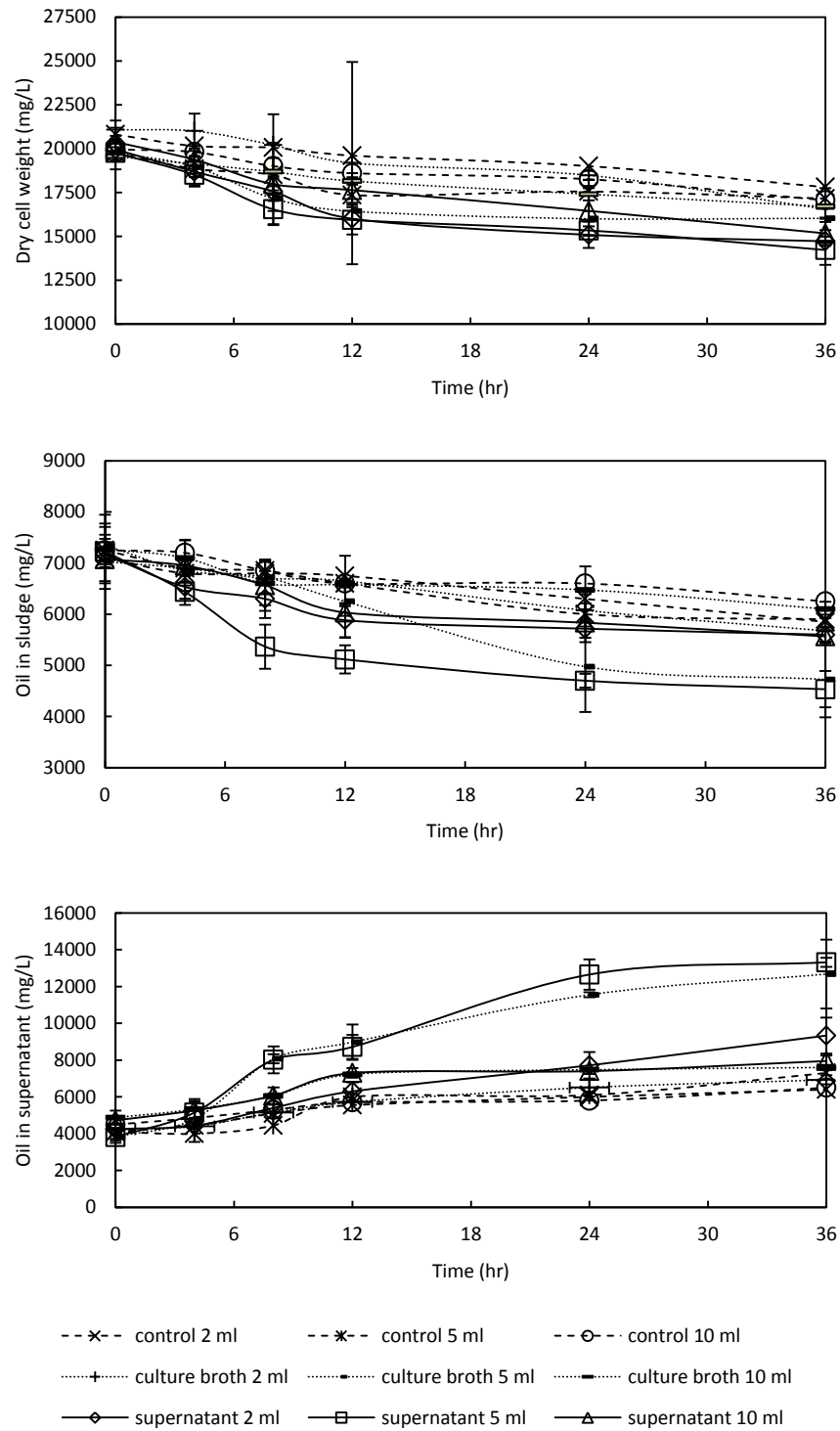
4.4.2 การแยกน้ำมันจาก POME โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเหลวซีเอ็มซี เปรียบเทียบระหว่างการเติมเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารซีเอ็มซี (Culture broth) และ ส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร

เติมเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเหลวซีเอ็มซี (Culture broth) และส่วนใสของอาหารเหลวซีเอ็มซีโดยหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ลงใน POME ปริมาตร 45 มิลลิลิตร (ปรับปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้นของหัวเชื้อแบคทีเรียให้มีค่า OD₆₆₀ เท่ากับ 0.5 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อควบคุมปริมาณเชื้อเริ่มต้นให้เท่ากันในทุกๆการทดลอง)

จากรูปที่ 24 จะเห็นได้ว่าเชื้อมีกิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดที่ 12 ชั่วโมง คือ 0.35 ยูนิต์ต่อมิลลิลิตร ดังนั้นวิธีการทดลองจึงเริ่มจากการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเหลวซีเอ็มซีเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และถ่ายเชื้อลงใน POME ปริมาตร 45 มิลลิลิตร แบ่งชุดการทดลองเป็น 3 ชุด ชุดที่ 1 คือชุดควบคุม โดยเติมเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซี; (A) ชุดที่ 2 คือชุดที่เติมเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเหลวซีเอ็มซีลงไปทั้งเซลล์ Culture broth; (B) และชุดที่ 3 คือชุดที่ทำการหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออกจากอาหารเหลว เพื่อเติมเพียงส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อ Supernatant; (C) ตัวอย่างละ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ทำชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ และ บ่มบนเครื่องเขย่าความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุกๆ 0, 4, 8, 12, 24 และ 36 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักตะกอนแห้ง, น้ำมันในตะกอน และน้ำมันในส่วนใส (อรัญ หันพงศักรัตติกุล และคณะ, 2553) โดยผลการศึกษาพบว่า ชุด (A), (B) และ (C) ซึ่งได้แก่ ชุดควบคุม, ชุดที่เติมเชื้อที่อยู่ในอาหารเหลวซีเอ็มซี (Culture broth) และชุดที่เติมส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมุนเหวี่ยงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 2 มิลลิลิตรนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของตะกอนและน้ำมันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ส่วนชุดควบคุม (A) ซึ่งเติมเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซี 5 มิลลิลิตร พบว่าน้ำหนักตะกอนแห้งลดลงจาก 19,750 เหลือ 17,150 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 36 ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 13.16% น้ำมันในตะกอนเซลล์ลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาคือ ลดลงจาก 7,250 เหลือ 5,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 18.62% ส่วนน้ำมันในน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 4,100 เป็น 7,300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 78.04% ชุดที่เติมเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเหลวซีเอ็มซีลงไปทั้งเซลล์ Culture broth; (B) 5 มิลลิลิตร พบว่าน้ำหนักตะกอนแห้งลดลงจาก 19,775 เหลือ 16,025 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 18.96%

น้ำมันในตะกอนเซลล์ลดลงตามระยะเวลาคือ ลดลงจาก 7,350 เหลือ 4725 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 35.71% ส่วนน้ำมันในน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 3,825 เป็น 12,675 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 13.16% และชุดที่ 3 คือชุดที่ทำการหมუნเหวียงแยกเซลล์ออกเพื่อเติมเพียงส่วนใสของเชื้อ (C; supernatant) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร พบว่าน้ำหนักตะกอนแห้งลดลงจาก 19,750 เหลือ 14,216 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันในตะกอนเซลล์ลดลงตามระยะเวลาคือ ลดลงจาก 7,225 เหลือ 4,533 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจาก 3,825 เป็น 13,316 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนผลการศึกษา ชุด (A), (B) และ (C) ซึ่งได้แก่ ชุดควบคุม, ชุดที่เติมเชื้อที่อยู่ในอาหารซีเอ็มซี (Culture broth) และชุดที่เติมส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมუნเหวียงแยกเชื้อออก (Supernatant) อย่างละ 10 มิลลิลิตร พบว่าชุด (A) มีปริมาณน้ำหนักตะกอนลดลงจาก 19,950 เหลือ 17,050 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันในตะกอนลดลงจาก 7,250 เหลือ 6,250 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันในน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 4,500 เป็น 6,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนชุดที่เติมเชื้อที่อยู่ในอาหารซีเอ็มซี (B) มีปริมาณน้ำหนักตะกอนลดลงจาก 19,550 เหลือ 16,700 น้ำมันในตะกอนลดลงจาก 7,275 เหลือ 6,100 และปริมาณน้ำมันในน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 4,875 เป็น 7,600 ตามระยะเวลาการบ่มเขย่า 36 ชั่วโมง ส่วนชุดที่เติมส่วนใสของอาหารซีเอ็มซีโดยหมუნเหวียงแยกเชื้อออก (C) นั้น มีปริมาณน้ำหนักตะกอนลดลงจาก 20,375 เหลือ 15,166 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามระยะเวลาการบ่มเขย่า 36 ชั่วโมง น้ำมันในตะกอนลดลงจาก 7,075 เหลือ 6,100 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันในน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 4,725 เป็น 7,950 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 25 และ ตาราง 9



รูปที่ 25 ปริมาณน้ำมันในกากตะกอนและส่วนใสของ POME หลังจากการเติมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ
 อย่างเดียว, อาหารเลี้ยงเชื้อที่มี *B. subtilis* และส่วนใสจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี *B. subtilis* ที่ระยะเวลา
 ต่างๆ

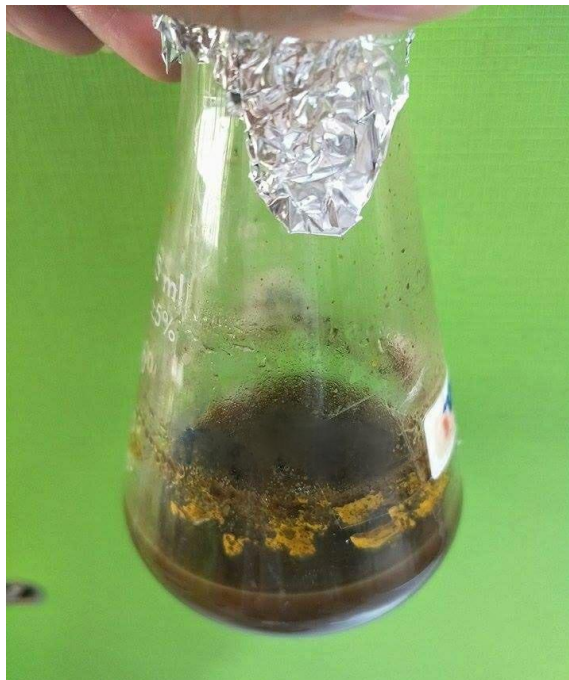
ตารางที่ 9 สรุปผลการแยกปริมาณน้ำมันในกากตะกอนและส่วนใสของ POME หลังจากการเติมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างเดี่ยว, อาหารเลี้ยงเชื้อที่มี *B. subtilis* และส่วนใสจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี *B. subtilis* 5 มิลลิลิตร

Conditions	Incubation time (hr.)	Dry cell weight Of sludge (mg/l)	Oil in sludge of POME (mg/l)	Oil in supernatant of POME (mg/l)
Control	0	19,750	7,250	4,100
(POME+CMC media)	4	18,850	6,900	4,000
	8	18,500	6,850	4,450
	12	17,350	6,600	6,000
	24	17,550	6,000	6,100
	36	17,150	5,900	7,300
POME+Culture broth of <i>B. subtilis</i> in CMC medium	0	19,775	7,350	3,825
	4	18,975	6,850	4,800
	8	17,150	6,725	8,075
	12	16,425	6,250	8,975
	24	16,000	4,975	11,550
36	16,025	4,725	12,675	
POME+Supernatant of culture broth of <i>B.</i> <i>subtilis</i> in CMC medium	0	19,750	7,225	3,825
	4	18,500	6,433	5,150
	8	16,533	5,366	8,016
	12	15,933	5,116	8,716
	24	15,333	4,700	12,650
36	14,216	4,533	13,316	

บทสรุป การทดลองที่ 4.4

จากการทดลองที่ 4.3 ทำให้ทราบว่ารูปแบบของถังแยกส่งผลต่อการแยกของแข็งทั้งหมด, ของแข็งแขวนลอย, น้ำมันปาล์มดิบ, การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชและการลดลงของค่าซีไอดี โดยการใช้ระบบ IAF นั้น ทำให้ฟองอากาศและอนุภาคสารอินทรีย์เข้าชนและลอยขึ้นสู่ชั้นผิวน้ำได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคสารอินทรีย์ดังกล่าวยังมีองค์ประกอบของน้ำมันแทรกอยู่ภายใน ซึ่งแยกออกยากด้วยวิธีทางกายภาพ จึงใช้วิธีทางชีวภาพโดยใช้เชื้อ *B. subtilis* ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสเพื่อตัดพันธะ β -1,4 glucosidase ที่เชื่อมต่อน้ำตาลกลูโคสเข้าด้วยกันในองค์ประกอบของเซลลูโลส จากงานวิจัยของ สัญทัศน์ สันจรรย์ศักดิ์ (2554) ได้ทำการคัดเลือกเชื้อที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซทานเนสโดยทดสอบด้วยวิธีคองโกเรด (Congo red method) และเมื่อทำการเทียบเคียงสายพันธุ์ด้วยวิธี 16s rDNA พบว่าเป็น *B. subtilis* ร้อยละ 100 ซึ่งผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซทานเนสได้สูงสุดที่ 12 ชั่วโมง และพบว่าเชื้อสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ในน้ำทิ้งดีแคเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้สูงสุด 0.69 ยูนิตต่อมิลลิลิตร จึงเป็นการยืนยันได้ว่า เชื้อ *B. subtilis* สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ดี และจากการทดลองของอรัญ และคณะ (2553) ได้รายงานถึงสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตเอนไซม์เซลลูเลสของเชื้อ *B. subtilis* โดยแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการผลิตเอนไซม์คือ อาหารพื้นฐานที่มี CMC เป็นแหล่งคาร์บอน และพบว่าเชื้อสามารถเจริญและสามารถผลิตเอนไซม์ได้ในอาหารที่มียีสต์สกัดและ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ เป็นแหล่งไนโตรเจน และในอาหารที่ปรับพีเอช 6.0 มีการเจริญของเชื้อสูงสุด ผลิตเอนไซม์ได้มากที่สุด 0.15 ยูนิต ที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 45 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้จึงใช้ผลการทดลองของอรัญ และคณะ (2553) เป็นต้นแบบในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *B. subtilis* เพื่อให้ได้ค่ากิจกรรมเอนไซม์ที่สูงที่สุด โดยทดลองร่วมกับระบบ IAF (การทดลองที่ 4.3) ข้างต้น ดังนั้นจึงใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ทดลองมาแล้วนี้ในการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* เพื่อผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและประยุกต์ใช้กับถังแยกแบบ 9(c) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME โดยเริ่มจากการทดลองในฟลาสก์ขนาด 150 มิลลิลิตร แบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด คือ ชุดควบคุม คือใช้อาหาร CMC อย่างเดียว; (A) ชุดที่ใช้เชื้อ *B. subtilis* ในอาหาร CMC (culture broth; (B)), ชุดที่ใช้เชื้อ *B. subtilis* และหมูนเหียงแยกอาหารออก; (C) และแต่ละชุดทำการเปรียบเทียบการใช้ปริมาณ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร ปรับความเข้มข้นหัวเชื้อเริ่มต้น O.D เท่ากับ 0.5 เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 36

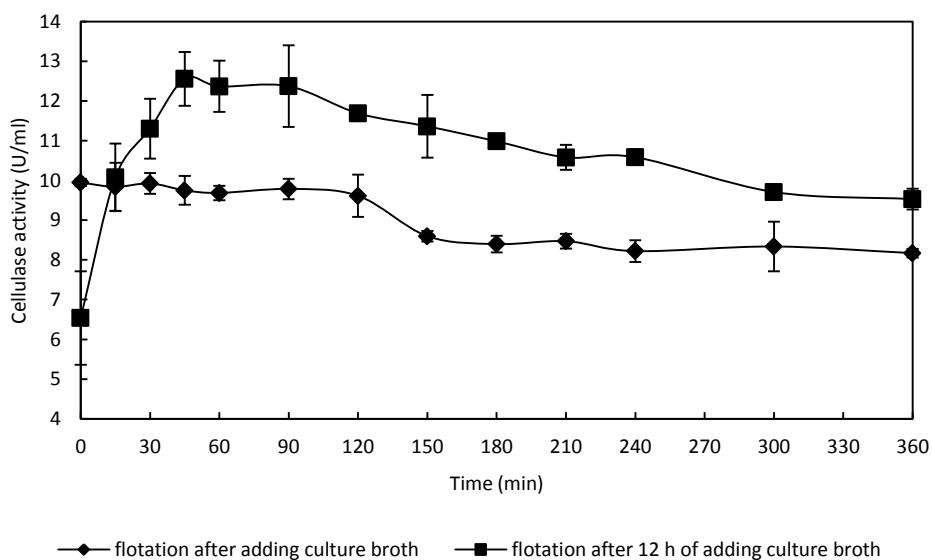
ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการใช้เชื้อ *B. subtilis* ในอาหาร CMC (culture broth) ปริมาณ 5 มิลลิลิตรให้ประสิทธิภาพในการลดของปริมาณตะกอนในน้ำทิ้ง และแยกน้ำมันในตะกอนของแข็งและส่วนใสออกได้ดีที่สุด โดยตะกอนมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อน ลอยอยู่บริเวณผิวน้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 การใช้ *B. subtilis* ขนาด 5 มิลลิลิตรและเขย่าที่ 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสส่งผลให้เกิดตะกอนตกตะกอนและลอยตัวอยู่บนพื้นผิว

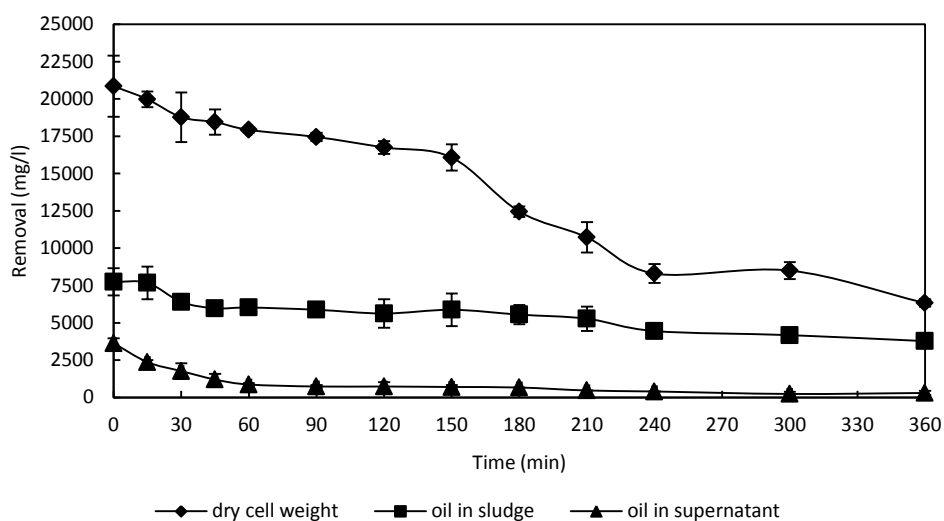
4.5 การแยกน้ำมันออกจาก POME โดยใช้โดยเชื้อ *B. subtilis* ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ ร่วมกับ ถังแยกน้ำมันด้วยระบบ IAF (ขยายขนาดการทดลอง)

จากการเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซี โดยเปรียบเทียบระหว่างการใส่เชื้อที่อยู่ในอาหารซีเอ็มซี (culture broth) ส่วนใสของอาหารที่หมუნเหวี่ยงแยกเชื้อออก (supernatant) และ ชุดควบคุม (อาหารเลี้ยงเชื้อ CMC) ปริมาณ 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร เติมลงใน POME 45 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกันนั้น ผลการทดลองพบว่าการใส่เชื้อที่อยู่ในอาหารซีเอ็มซี (culture broth) ปริมาณ 5 มิลลิลิตรนั้นเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปทดลองต่อร่วมกับวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศ (ซึ่งคิดเป็น อัตราส่วนระหว่างเชื้อ:POME เท่ากับ 1:9) ทำการทดลองโดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ (1) เติมเชื้อ *B. subtilis* ปริมาตร 1.77 ลิตร ลงในถังแยกที่มี POME 16 ลิตร และให้อากาศทันที (2) เติมเชื้อ *B. subtilis* ปริมาตร 1.77 ลิตร ลงในถังแยกที่มี POME 16 ลิตร ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง แล้วจึงให้อากาศด้วย ระบบ IAF

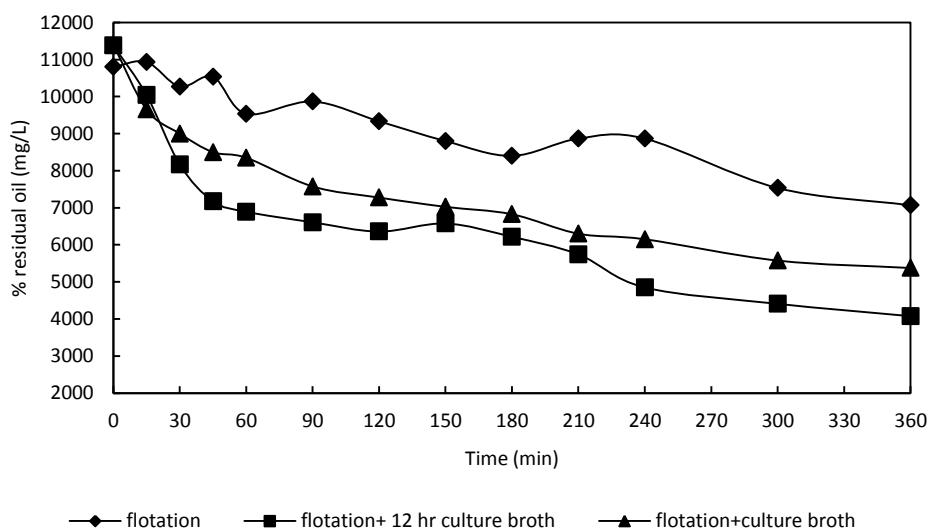


รูปที่ 27 กิจกรรมของเซลลูเลสในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวซีเอ็มซีเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม *B. subtilis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อลงในถังแยกและให้อากาศด้วยระบบ IAF และการเติม *B. subtilis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อลงในถังแยกเป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วให้อากาศด้วยระบบ IAF

ผลการทดลองพบว่าการเติมเชื้อที่ไว้ 12 ชั่วโมงนั้น มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่ากิจกรรมเอนไซม์มากที่สุดตอนที่ 45 คือ 12.55 ยูนิตต่อมิลลิลิตร จากนั้นจึงลดลงเรื่อยๆ และมีการลดลงของน้ำมันในตะกอนจาก 7,750 เหลือ 3,775 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 48.70% ส่วนน้ำมันในส่วนใสของน้ำที่ลดลงจาก 3,633 เหลือ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 91.75% ตามลำดับ จากนั้นเปรียบเทียบกับผลการแยกน้ำมันด้วยระบบ IAF เพียงอย่างเดียว เพื่อทราบประสิทธิภาพของการใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 ปริมาณของแข็ง และการแยกน้ำมันในตะกอนและน้ำมันในส่วนใสออก โดยการเติมเชื้อ *B. subtilis* ลงในถังแยกทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง แล้วจึงให้อากาศด้วยระบบ IAF



รูปที่ 29 เปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยวิธีและระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 29 ทดลองแยกน้ำมันออกจาก POME โดยใช้ POME ลีดที่ 2 ซึ่งมีค่าน้ำมันและไขมันเริ่มต้นเท่ากับ 10,800 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการแยกน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศอย่างเดียวนั้น มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันจาก 10,800-7,066.66 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 34.56% ส่วนการแยกน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศรวมกับการเติมเอนไซม์และการเติมเอนไซม์ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงนั้น สามารถแยกน้ำมันได้จาก 11,400-5,375 และ 11,383-4,075 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 52.86 และ 65.09% ตามลำดับ

บทสรุป การทดลองที่ 4.5

จากการทดลองโดยการเติม *B. subtilis* ลงในถังแยกที่มี POME อยู่แล้วเริ่มให้อากาศทันที นั้น พบว่าค่ากิจกรรมเอนไซม์ในช่วงแรกจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งมีค่าประมาณ 9.94-9.96 ยูนิตต่อมิลลิลิตร จนกระทั่งลดลงเล็กน้อยในช่วงนาที่ที่ 180 คือเหลือ 8.59 ยูนิตต่อมิลลิลิตร และค่อนข้างคงที่จนจบการทดลอง ส่วนการเติมเชื้อทิ้งไว้ในถังแยกที่มี POME อยู่ภายใน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นั้น พบว่าที่นาที่ที่ 0 ของการแยกน้ำมันนั้นมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เท่ากับ 6.53 ยูนิตต่อมิลลิลิตร จากนั้นเมื่อทำการให้อากาศ พบว่าค่ากิจกรรมเอนไซม์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งสูงสุดที่นาที่ที่ 45 และค่อยๆลดลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารตั้งต้นในอาหารลดลงจึงทำให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์ลดลงตามลำดับ และสาเหตุที่ค่ากิจกรรมเอนไซม์ของการทดลองที่เติมเชื้อทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง สูงกว่านั้น เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนถ่ายเชื้อจากอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซีมายัง POME นั้นเชื้อจะมีการปรับตัวใหม่ โดยใช้ POME เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต จึงมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลล์สูงชันอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ส่วนการเติม *B. subtilis* ลงในถังแยกที่มี POME อยู่แล้วเริ่มให้อากาศทันทีนั้น ในช่วงแรกอาจเกิดความปั่นป่วนจากการให้ฟองอากาศอย่างรวดเร็ว ค่ากิจกรรมเอนไซม์ที่นาที่ที่ 0 จึงสูงกว่าการเติมเชื้อทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง แต่เนื่องจากเกิดการปั่นป่วนอย่างรวดเร็ว เชื้อจึงมีค่ากิจกรรมเอนไซม์ที่ค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งนาที่ที่ 150 จึงลดลงเล็กน้อย โดยพบว่าพบว่าการแยกน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศอย่างเดียวนั้น แยกน้ำมันได้ 41.48% ส่วนการแยกน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศรวมกับการเติมเอนไซม์และการเติมเอนไซม์ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงนั้น สามารถแยกน้ำมันได้ 52.86 และ 65.09% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการแยกน้ำมันด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศอย่างเดียวถึง 18.30-30.53%

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

5.1.1 หัวฉีดที่ออกแบบโดย Duangsuwan และคณะ (2014) (รูปที่ 7) ซึ่งทดสอบกับน้ำที่สังเคราะห์ ที่มีปริมาณน้ำมันเริ่มต้นเท่ากับ 4,000, 8,000, 12,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น สามารถดูดอากาศเข้าสู่ระบบได้ในอัตรา 4.16-9.98, 3.60-9.28, 2.69-9.14 และ 2.21-8.72 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งในภาพรวมคือ 2-10 ลิตรต่อนาที โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันในน้ำที่สังเคราะห์นั้นส่งผลต่ออัตราการดูดอากาศ คืออัตราการดูดอากาศจะลดลงเมื่อน้ำที่สังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันมากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิของน้ำที่สังเคราะห์จะสังเกตได้ว่าอัตราการดูดของอากาศจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มมากขึ้น

5.1.2 องค์ประกอบของ POME จากโรงงานลาภทวีอินคัสทรี จังหวัดสตูล ประกอบด้วยของแข็งทั้งหมด 43,250-48,833 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอย 20,536-23,130 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำมันและไขมัน ประมาณ 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดี 31,403-39,600 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 4.65-4.78 และอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากระบบอยู่ในช่วง 60-70 องศาเซลเซียส

5.1.3 การใช้วิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศในการแยกอนุภาคต่างๆจาก POME โดยใช้ถังแยกที่มีท่อแวนดิงตรงกลางถึงและมีชั้นของแผ่นกั้น (baffles) อยู่ภายในท่อแวนดิง(รูปแบบ 9(c)) นั้น สามารถแยกอนุภาคต่างๆออกได้ดีที่สุด แต่อุณหภูมิของ POME ที่แตกต่างกัน (50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส) นั้นไม่ส่งผลต่อการแยกอนุภาค โดยวิธีการนี้สามารถแยกของแข็งทั้งหมดได้ 47-61%, ของแข็งแขวนลอย 16-29%, น้ำมันในตะกอน 9-18%, น้ำมันจากส่วนใส 65-85%, ค่าซีไอดี 50-62% และค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 4.65-5.07 โดยแรงดันของฟองอากาศที่ผลิตจากหัวพ่นกระจายนั้นส่งผลให้เกิดฟองสั้นจากปากถัง ซึ่งฟองที่สั้นออกมานี้ประกอบไปด้วยปริมาณของแข็งและปริมาณน้ำมันที่ติดและถูกดันให้ลอยขึ้นสู่ชั้นผิวน้ำมากับฟองอากาศจนสั้นออกจากปากถัง จึงชั่งน้ำหนักปริมาณของฟองสั้น และสามารถคำนวณปริมาณน้ำมันที่หายไปได้ โดยนำปริมาณฟองสั้นมาคูณกับปริมาณน้ำมันที่แยกได้จาก POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สมดุลมวลของ POME

Tank type	Temperature of POME (°C)	The amount of oil in foam (mg/L)	The volume of inlet POME (kg)	The volume of outlet POME (kg)	The volume of the bubbles overflow (kg)
(a)	50	5,430	24	15	7.5
	60	6,270	24	14	8.5
	70	7,220	23	13	8
(b)	50	8,500	23.5	12	9
	60	9,436	22	12	9
	70	8,050	25	13	8.5
(c)	50	8,696	22	13	8
	60	9,693	24	12	9
	70	9,133	24	13	9

5.1.4 เชื้อ *B. subtilis* มีค่ากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 12 คือเท่ากับ 0.35 ยูนิต์ต่อมิลลิลิตร และการนำเชื้อ *B. subtilis* ที่เลี้ยงในอาหารเหลวซีเอ็มซี (culture broth) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ IAF นั้นเหมาะสมที่สุด โดยนำ culture broth 1.77 ลิตร เติมลงใน POME 16 ลิตร ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงเพื่อให้เชื้อปรับตัว จากนั้นเปิดระบบ IAF พบว่าให้ผลการแยกน้ำมันในตะกอนลดลง 48.70% และน้ำมันจากส่วนใสของน้ำทิ้งลดลง 91.75%

5.1.5 จากผลการทดลองทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการระบบ IAF ร่วมกับการใช้เชื้อ *B. subtilis* ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ให้ผลการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก POME ได้ดีกว่าการใช้ระบบ IAF เพียงวิธีเดียว โดยมีประสิทธิภาพการแยกมากกว่าประมาณ 30%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรปรับปรุงหัวฉีดเหนียวนำอากาศให้สามารถผลิตฟองอากาศขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน

5.1.2 เนื่องจากอาหารเลี้ยงเชื้อซีเอ็มซีมีราคาแพง จึงควรทดลองเลี้ยงเชื้อใน POME โดยตรง

5.1.3 ควรมีระบบเก็บเกี่ยวน้ำมันจากโพลีที่ล้นออกจากระบบ และศึกษาองค์ประกอบของโพลีต่อไป

5.1.4 การนำถังแยกไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ไม่จำเป็นต้องติดตั้งฮีตเตอร์ภายในถัง เนื่องจาก POME ที่ออกจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มนั้นมีอุณหภูมิที่สูงถึง 60-70 องศาเซลเซียสอยู่แล้ว

เอกสารอ้างอิง

- กรรมิการ์ สิริสิงห์. 2522. น้ำมันและกรีสน้ำมันของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. คณะ
 สาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- จิตรลดา กาญจนสาวิตร และ ชญานุตม์ ศรีพิทักษ์. 2547. การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์เซลลู
 เลสและเอนไซม์ไซลานเนสเพื่อแยกน้ำมันออกจาก น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. โครงการงาน
 นักศึกษา คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จารุวรรณ มณีศรี. 2538. การผลิตและประยุกต์ใช้ไซลานเนสและเซลลูเลสจากกากปาล์มและกาก
 สลัดจ์โดยเชื้อ *Aspergillus niger* ATCC6275. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา
 เทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชาญชล นานันต์ และนภัสสร วงศ์เขื่อนแก้ว. 2557. การพัฒนาถังแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำ
 ทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีลอยตัวด้วยฟองอากาศระบบถังคู่. โครงการงานนักศึกษา
 คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
- ชีหะยะ จันทอง และฮาราดิ รอนิง. 2548. การบำบัดเบื้องต้นของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดย
Bacillus sp. A2. โครงการงานนักศึกษา คณะอุตสาหกรรมเกษตร
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปรีชา มุณีศรี. 2539. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้จุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์
 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงษ์กิตติกุล. 2533. กระบวนการ
 ผลิตการใช้ประโยชน์วัสดุเศษเหลือและคุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม, วารสาร
 สงขลานครินทร์. 12: 169-176.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ, อรัญ หันพงษ์กิตติกุล และโสภา จันทภาโส. 2544. ปัจจัยที่มีผลต่อการ
 บำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้เอนไซม์จาก *Aspergillus niger* ATCC 6275 ที่
 เลี้ยงบน กากปาล์ม, วารสารสงขลานครินทร์ 23: 797-806

พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ อรัญหันทพงศ์กิตติกุล. 2554. การประยุกต์ใช้เอนไซม์ทางการค้าและ จุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้ในการเก็บเกี่ยวน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมัน. รายงาน โครงการวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พรเทพ ถนนแก้ว. 2538. สภาวะเหมาะสมของการผลิตเซลลูเลสจากเชื้อราที่คัดแยกจากบริเวณปลูก ป่าศรณารายณ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิม และคณะ, **Enzyme/เอนไซม์** [Online], Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0680/enzyme> [25 มกราคม 2558].

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิม และคณะ, **อิมัลชัน** [Online], Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0674/emulsion-อิมัลชัน> [20 มกราคม 2558].

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, **เซลลูโลส (Cellulose)** [Online], Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/bio10352sk_ch2.pdf [27 พฤษภาคม 2558]

เมธาวิ ทองนोक. 2557. การเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการการแยกสารด้วยโพลีเมอร์โดยการตัดแปลง กระบอกแยก. รายงานวิชาสัมมนาคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เมธาวิ ทองนोक และ วันดี ทองมา. 2557. การศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจาก น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศที่ผลิตจากหัวฉีดแบบเจต ผ่านแผ่นบัพเฟิลในระบบถังเดี่ยว. โครงการงานนักศึกษาคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

หัสลินดา บินมะแอ. 2548. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเชื้อราที่ผลิต พอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วีริสา ยอดศรี และ สุภาวดี ท้วะบัตร์. 2556. การศึกษาการแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากน้ำทิ้ง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการลอยตัวด้วยฟองอากาศที่ผลิตจากหัวฉีดแบบเจต. โครงการงานนักศึกษาคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- สัตย์ทัศน์ สันจรรณศักดิ์. 2554. การผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสโดยเชื้อ *Bacillus subtilis* และการใช้ประโยชน์ในการแยกน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เสถียรพงษ์ อุดมศิลป์ และ พูนสุข ประเสริฐสรรพ. 2552. การแยกน้ำมันและของแข็งออกจากน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์และเอนไซม์. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 1(2), 125-134.
- อรัญ หันพงษ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสริฐสรรพ, กัลยา ศรีสุวรรณ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และวีระศักดิ์ ทองลิ้มปี. 2537. การศึกษาการแยกน้ำมันในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม: เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาการลดสูญเสียน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 7 เมษายน 2537 ณ โรงแรมสยามธานี สุราษฎร์ธานี. 96 น.
- อรัญ หันพงษ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสริฐสรรพ และฉวี มลิวัลย์. 2553. การใช้ *Bacillus subtilis* A2 ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลานเนสในการแยกน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. รายงานโครงการวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรัญ ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำทิ้ง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร.
- Adlan, M. N., Palaniandy, P., and Aziz, H. A. 2011. Optimization of coagulation and dissolved air flotation (DAF) treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology (RSM). *Desalination*, 277(1-3), 74-82.
- Ahmad, A.L., Ibrahim, N., Tsmail, S. and Bhatia, S. 2002. Coagulation-sedimentation-extraction pretreatment methods for the removal of suspended solids and residual oil from palm oil mill effluent (Pome). *Eng. J.* 3: 25-33.
- Ahmad, A.L., Sumathi, S. and Hameed, B.H. 2005. Adsorption of residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: Equilibrium and kinetic studies. *Water. Res.* 12: 2483-2494.

- Ahmad, A.L., Sumathi, S. and Hameed, B.H. 2005. Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study. [Chem. Eng. J.](#) 108: 179-185.
- Ahmad, A.L., Sumathi, S. and Hameed, B.H. 2006. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. [Chem. Eng. J.](#) 118:99-105.
- Ahmed, Y., Yakob, Z., Akhtar, P. and Sopian, K. 2015. Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). [Renew. Sust. Energ. Rev.](#) 42: 1260-1278.
- Alrawi, R., Ahmad, A., Ismail, N. and Kadir, M. 2011. Anaerobic co-digestion of palm oil mill effluent with rumen fluid as a co-substrate. [Desalination.](#) 269:50-57.
- Alrawi, R., Ahmad, A., Ismail, N. and Omar, AK. 2014. The Empirical Settling Velocity of Palm Oil Mill Effluent (POME) Particles at Different Concentrations, Sizes and Densities. First International Engineering Conference. 118-127.
- American Public Health Association (APHA). 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater 17th ed. Port City Press, Baltimore, Maryland. USA.
- Ang, S.K., Shaza, E.M., Adibah, Y., Suraini, A.A. and Madihah, M.S. 2013. Production of cellulases and xylanase by *Aspergillus fumigatus SK1* using untreated oil palm trunk through solid state fermentation. [Process Biochem.](#) 48: 1293-1302.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. N. Y.: American Public Health Association.
- Baker, S. N. H. A., Hasan, H. A., Mohammad, A. W., Abdullah, S. R. S., Haan, T. Y., Ngteni, R., and Yusof, K. M. M. 2018. A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. [J. Clean. Prod.](#) 171: 1532-1545.
- Bari, S., T.H. Lim, and C.W. Yu. 2002. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine. [Renew. Energ.](#) 27: 339–351.

- Beg, Q.K., Kapoor M., Mahajan, L. and Hoondal, G.S., 2001. Microbial xylanases and their industrial applications. *Appl. Microbiol. Biot.* 56: 326-338.
- Berstad, D.A., Knapstad, B., Lamvik, M., Skjølsvik, P.A., Tørklep, K. and Øye, H.A. 1988. Accurate measurements of the viscosity of water in the temperature range 19.5–25.5°C. *Physica A*. 151: 246-280.
- Bib, Z., Ansari, A., Rahmat, R., Aman, A. and Shah, A. 2014. Production of xylan degrading endo-1,4-b-xylanase from thermophilic *Geobacillus stearothermophilus* KIBGE-IB29. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 7: 478-485.
- Biely, P. 1985. Microbial xylanolytic systems. *Trends. Biotechnol.* 3: 286-290.
- Campbell Louw, The development of polysaccharide degrading wine yeast strains [Online], Available [file:///C:/Users/Administrator/Downloads/louw_development_2004%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Administrator/Downloads/louw_development_2004%20(2).pdf) [11 มีนาคม 2558]
- Coughlan, P.M. and Hazlewood, P.G. 1993. β -1,4-D-Xylan-Degrading Enzyme Systems: Biochemistry. *Biotechnol. Appl. Biochem.* 17: 259-289.
- Chan, Y., Chong, M. and Law, C. 2010. Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a lab-scale sequencing batch reactor (SBR). *J. Environ. Manage.* 91: 1738–1746.
- Cheong, W.F., Wenk, M.R. and Shui, G. 2014. Comprehensive analysis of lipid composition in crude palm oil using multiple lipidomic approaches. *J. Genet. Genomics.* 41: 293-304.
- Gundllapalli, S.B., Cordero R.R. and Pretorius I.S. 2005. Domain engineering of *Saccharomyces cerevisiae* exoglucanases. *Biotechnol. Lett.* 27: 355–362.
- Dayana, A., Roshanida, R., Rosli, A.R. and M.L. 2012. Effects of xylanase and cellulose production during composting of EFB and POME using fungi. *Sci. Eng. Technol.* 68: 390
- Dong, H., Wang, X., Liu, L., Zhang, X. and Zhang, S. 2010. The rise and deformation of a single bubble in ionic liquids. *Chem. Eng. Sci.* 65: 3240-3248.

- Duangsuwan, W., Prasertsan, P. and Chawalitsittikul, A. 2014. Design and testing of long throat venturi- and jet-type bubble generators for using in palm oil industry. In Proceeding of The International Bioscience Conference (IBSC 2014). Phuket, Thailand. 29-30 September 2014, pp. 230-233.
- Eman, N. and Tay, C.I. 2013. Characterization of biodiesel produced from palm oil via base catalyzed transesterification. [Procedia. Eng.](#) 53: 7-12.
- Fan, L.T. and Lee, Y.H. 1983. Kinetics studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: Derivation of a mechanistic kinetic model. *Biotechnol. Bioeng.* 25: 2707- 2733.
- Gamage, A., & Shahidi, F. 2007. Use of chitosan for the removal of metal ion contaminants and proteins from water. *Food. Chem.* 104: 989-996.
- Gu, G., Sanders, R. S., Nandakumar, K., Xu, Z. and Masliyah, J. H. 2004. A novel experimental technique to study single bubble-bitumen attachment in flotation. *Int. J. Miner. Process.* 74(1-4), 15-29.
- Hassan, M. A. A. and Puteh, M. H. 2007. Pre-treatment of palm oil mill effluent (POME): A comparison study using chitosan and alum. *Malaysian J. Civ. Eng.* 19: 128-141.
- Ho, C.C. and Tan, Y.K. 1988. The treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent by pressurised activated sludge. *J. Chem. Technol. Biot.* 41: 75–84.
- Ho, C. C. and Tan, Y. K. 1989. Comparison of chemical flocculation and dissolved air flotation of anaerobically treated palm oil mill effluent. *Water. Res.* 23(4): 395-400.
- Hong, Z. and Verma, D. 2001. Plant cellulose synthase complexes. *Plant. Mol. Biol.* 47: 693–701.
- Huang, Y., Busk, P. and Lange, L. 2015. Cellulose and hemicellulose-degrading enzymes in *Fusarium commune* transcriptome and functional characterization of three identified xylanases. [Enzyme Microb. Tech.](#) 73-74: 9-19.
- Ibrahim, S., Wang, S. and Ang, H.M. 2010. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw. *Biochem. Eng.* 49: 78-83.

- Jia, W., Ren, S. and Hu, B. 2013. Effect of water chemistry on zeta potential of air bubbles. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8: 5828-5837.
- Karhu, M., [Leiviskä](#), T. and Tanskanen, J. 2014. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions. [Sep. Purif. Technol.](#) 122: 231–241.
- Karim, M. and Hie, L. 1987. The use of coagulating and polymeric flocculating agents in the treatment of palm oil mill effluent (POME). *Biol. Wastes*. 22: 209–218.
- Keawchai, s. and Prasertsan, P. 2002. Screening and application of thermotolerant microorganisms and their flocculants for treatment of palm oil mill effluent. *Songklanakarin. J. Sci. Technol.* 24: 413-420.
- Kim, B.K., Lee. B.H., Lee, Y.J. Jin, I.I.H., Chung C.H. and Lee, J.W. 2009. Purification and characterization of carboxymethyl cellulase isolated from a marine bacterium, *Bacillus subtilis* A-53. *Ezyme. Microb. Tech.* 44: 411-416.
- Kiyoshi, I., Hironobu, O., Takashi, S. and Takeaki, I. 2014. Purification and properties of acid stable xylanases from *Aspergillus kawachii*. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 56: 547-550
- Laohaprapanon, T., Prasertsan, P. and Kittikun, A.H. 2005. Physical and chemical separation of oil and suspended solids from palm oil mill effluent. *Asian J. Energ. Environ.* 6: 39-55.
- Laohaprapanon T. 2007. Screening of thermotolerant microorganisms and application for oil separation from palm oil mill wastewater. *Songklanakarin J. Sci. Technol. Prince of Songkla University.* 29: 801-808.
- Lauren, G. 2017. Top 5 Palm Oil Producing Countries and Making Sustainability a Key Focus in 2017 [Online], Available: <https://www.bizvibe.com/blog/top-5-palm-oil-producing-countries/> [2 มีนาคม 2561]
- Liu, Z., Wu, Z., Li, R. and Fan, X. 2013. Two-stage foam separation technology for recovering potato protein from potato processing wastewater using the column with the spiral internal component. *J. Food. Eng.* 114: 192-198.

- Lisa Smith, 2017. The effect of temperature on bubble solution. [Online], Available: <https://sciencing.com/effect-temperature-bubble-solution-8744446.html> [3 มีนาคม 2561]
- Mahmood, K. A., Wilkinson, S. J. and Zimmerman, W. B. 2015. Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes. *Chem. Eng. Sci.* 137: 243-253.
- M.I.A. Karim. and A.Q.A. Kamil. 1989. Biological treatment of palm oil mill effluent using *Trichoderma viride*. *Biol. Waste.* 27: 143–152.
- Muhammad, F., Izarul, M., Asri, G. and Hiroyuki, D. 2016. The Combination of air flotation and a membrane bioreactor for the treatment of palm oil mill effluent. *Int. J. Technol.* 5: 767-777.
- Muppaneni, T., Reddy, H. K., Ponnusamy, S., Patil, P. D., Sun, Y., Dailey, P. and Deng, S. 2013. Optimization of biodiesel production from palm oil under supercritical ethanol conditions using hexane as co-solvent: a response surface methodology approach. *Fuel.* 107: 633-640.
- Ng, W.J., Goh, A.C.C. and Tay, J.H. 1988. Palm oil mill effluent treatment-liquid-solid separation with dissolved air flotation. *Biol. Waste.* 25: 257-268.
- Okawa, T., Tanaka, T., Kataoka, I., & Mori, M. 2003. Temperature effect on single bubble rise characteristics in stagnant distilled water. *Int. J. Heat. Mass. Tran.* 46: 903-913.
- Painmanakul, P., Sastaravet, P., Lersjintanakarn, S. and Khaodhiar, S. 2001. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process. *Chem. Eng. Res. Des.* 88: 693–702.
- Pendashteh, A.R., Fakhru, A. Chaibakhsh, N., Abdullah, L.C., Madaeni, S.S. and Abidin, Z.Z. 2011. Modeling of membrane bioreactor treating hypersaline oily wastewater by artificial neural network. *J. Hazard. Mater.* 192: 568–575.

- Prakash, R., Majumder, S. K. and Singh, A. 2018. Flotation Technique: Its Mechanisms and Design Parameters. Chem. Eng. Process. 127: 249-270.
- Prasertsan, P., H-Kittikun, K. and Chantaphaso, S, 2001. Factors affecting treatment of palm oil mill effluent using enzyme from *Aspergillus niger* ATCC 6275. [Online], Available : https://www.researchgate.net/publication/26485718_Factors_affecting_treatment_of_palm_oil_mill_effluent_using_enzyme_from_Aspgillus_niger_ATCC_6275 [8 มิถุนายน 2558]
- Prasertsan, P., H-Kittikun, K. and A. Kunghae, J. Maneesri and S. Oi. 1997. Optimization for xylanase and cellulose production from *Aspergillus niger* ATTC 6275 in palm oil mill wastes and its application. World J. Microb. Biot. 13: 555-559.
- Prasertsan, P., Jitbunjerdkul, S., & Hunpongkittikul, A. 1990. Process, waste utilization and wastewater characteristics of palm oil mill. Songklanakarin J. Sci. Technol.
- Poh, P.E., Ong, W.Y.J., Lau, E.V. and Chong, M.N. 2014. Investigation on micro-bubble flotation and coagulation for the treatment of anaerobically treated palm oil mill effluent (POME). J. Environ. Chem. Eng. 2: 1174-1181.
- Ratanakhanokchai, K., Kyu, K.L. and Tanticharoen, M. 1999. Purification and properties of a xylan-binding endoxylanase from alkaliphilic *Bacillus* sp. strain K-1. Appl. Environ. Microbiol. 85: 694-697.
- Rattanapan, C., Sawain, A., Suksaroj, T. and Suksaroj, C. 2011. Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation process. Desalination. 280: 370-377.
- Ray, A. K., Bairagi, A., Ghosh, K. S. and Sen, S. K. 2007. Optimization of fermentation conditions for cellulase production by *Bacillus subtilis* CY5 and *Bacillus circulans* TP3 isolated from fish gut. Acta. Ichthyol. Piscat. 1(37): 47-53.
- Saifuddin, N., and Dinara, S. 2011. Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using magnetic chitosan. J. Chem-NY. 8(S1): S67-S78.

- Salman Zafar, 2011. Palm Oil Mill Effluent (POME), Cleantech Solutions. [Online], Available : <https://cleantechsolutions.wordpress.com/2011/11/08/palm-oil-mill-effluent-pome/> [9 มีนาคม 2558]
- Salman Zafar, 2014. Palm Kernel Shells as Biomass Resource, Bioenergy consult. [Online], Available : <http://www.bioenergyconsult.com/palm-kernel-shells-as-biomass-resource/> [23 มีนาคม 2558]
- Santander, M., Rodrigues, R.T. and Rubio, J. 2011. Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations. *Colloid. Surface. A.* 375: 237-244.
- Sá-Pereira, P., Costa-Ferreira, M. and Aires-Barros, M. R. 2002. Enzymatic properties of a neutral endo-1, 3 (4)- β -xylanase Xyl II from *Bacillus subtilis*. *J. Biotechnol.* 94(3), 265-275.
- Sarhan, A.R., Naser, J. and Brooks, G. 2016. CFD simulation on influence of suspended solid particles on bubbles' coalescence rate in flotation cell. *Int. J. Miner. Process.* 146:54-56
- Saththasivam, J., Loganathan, K. and Sarp, S. 2016. An overview of oil–water separation using gas flotation systems. *Chemosphere.* 144: 671-680.
- Sato, Y., Murakami, Y., Hirose, T., Uryu, Y. and Hirata, K. 1980. Removal of emulsified oil particles by dispersed air flotation. Department of Chemical Engineering Kyushu University.
- Shah, A.K., Sidid, S.S., Ahmed, A. and Rele, M.V. 1999. Treatment of bagasse pulp with cellulose-free xylanase from an alkalophilic *Bacillus sp.* Sam-3. *Bioresources. Technol.* 68: 133-140.
- Sharifudin, W. S. S. A. W., Sulaiman, A., Mokhtar, N., Baharuddin, A. S., Tabatabaei, M., Busu, Z. and Subbian, K. 2015. Presence of Residual Oil in Relation to Solid Particle Distribution in Palm Oil Mill Effluent. *Bioresources.* 10: 7591-7603.

- Janpromsri, S., Duangsuwan, W., Prasertsan, P. 2016. Testing of long throat venture for including air bubbles in oily wastewater. In proceeding of The 40th National Graduate Research Conference (NGRC40). The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Songkhla, Thailand. 20-21 October 2016. 448-453.
- Tabassum, S., Zhang, Y. and Zhang, Z. 2015. An integrated method for palm oil mill effluent (POME) treatment for achieving zero liquid discharge – A pilot study. [J. Clean. Prod.](#) 95: 148-155.
- Tao, D. 2005. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – A review. *Sep. Sci. Technol.* 39:741-760.
- Teoh, Y.P. and Mashitah, M.D. 2010. Cellulase Production by *Pycnoporus sanguineus* on oil palm residues through pretreatment and optimization study. *J. Appl. Sci.* 1036-1043.
- Tuan, V., Tsyuoshi, I. Takaya, H. Ryosuke, D. Jantima, T. and Sun, X. 2012. Separation of oil-in-water emulsions by micro-bubble treatment and the effect of adding coagulant or cationic surfactant on removal efficiency, *Water. Sci. Technol.* 66:1036–43.
- T.K. Hwang, S.M. Ong, C.C. and Seow, H.K. 1978. Tan Chemical composition of palm oil mill effluents. *Planter.* 54: 749–756.
- Ugoji EO. 1997. Anaerobic digestion of palm oil mill effluence and its utilization as fertilizer for environmental/rotation. *Renew. Energ.* 10(2): 20.
- [Vijayaraghavan](#), K. and Ahmad, D. 2006. Biohydrogen generation from palm oil mill effluent using anaerobic contact filter. [Int. J. Energ.](#) 31: 1284–1291.
- Wang, L., Wu, Z., Zhao, B., Liu, W. and Gao, Y. 2013. Enhancing the adsorption of the proteins in the soy whey wastewater using foam separation column fitted with internal baffles. *J. Food. Eng.* 119: 377-384.

- Wang, S., Ru, B., Dai, G., Sun, W., Qiu, K. and Zhou, J. 2015. Pyrolysis mechanism study of minimally damaged hemicellulose polymers isolated from agricultural waste straw samples. [Bioresour. Technol.](#) 190: 211–218.
- White, F.M. 1986. Fluid Mechanics. 2nd Ed., McGraw Hill, Singapore.
- Wu, T., Mohammad, A., Jahim, J. and Anuar, N. 2010. Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end-of-pipe processes. *J. Environ. Manage.* 91:1467-1490.
- Yuliansyah, A. T. and Hirajima, T. 2012. Efficacy of hydrothermal treatment for production of solid fuel from oil palm wastes. *Sustain. Resour. Manage. Intech.*
- Zhang, Z., Zhang, Y., Wu, Z., Zhang, O. and Wang, Y. 2014. Intensification of the interfacial adsorption of whey soy protein in the liquid phase using a foam separation column with the vertical sieve tray internal. *J. Ind. Crop. Prod.* 53:308-313.
- Zhan, X., Gao, B.Y. Wang, Y. and Yue Q.Y. 2011. **Influence of velocity gradient on aluminum and iron floc property for NOM removal from low organic matter surfacewater by coagulation.** *Chem. Eng. J.* 166: 116-121
- Zularisam, A. W., Ismail, A. F. and Salim R., 2006. Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment – A review. *Desalination.* 194:1-3, 211-231.

ภาคผนวก

วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์, ปริมาณน้ำมัน, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณของแข็งแขวนลอย, ฟิโชน และค่าซีไอดีที่เหลือใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

(1) การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส

1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) ของ Miller (1959) (Robertson *et al.*, 2001)

ดูดส่วนใสที่ได้จากการหมუნเหวียงเอาเซลล์ออก ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย CMC 1.0 % ที่ละลายใน PBS ฟิโชน 7.5 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ใน micro centrifuge tube จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 850 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำไปต้มในน้ำเดือดเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างที่ได้จากการทำปฏิกิริยาปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาดเล็ก เติมสารละลาย Dinitrosalicylic acid (DNS) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำให้เย็นทันที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าที่ได้แทนในสมการมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส

1.2 การคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเป็นหน่วยของเอนไซม์

กำหนดให้ 1 ยูนิต หมายถึง ปริมาณเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาย่อยสลายสับสเตรทให้เป็นกลูโคส 1 ไมโครโมลในเวลา 1 นาที โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{กิจกรรมของเอนไซม์ (ยูนิต/มล.)} = \frac{CD}{MtV}$$

- เมื่อ C คือ ปริมาณน้ำตาลกลูโคสโดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน
 D คือ ค่าการเจือจางตัวอย่างของเอนไซม์
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคส เท่ากับ 180.16 กรัมต่อโมล
 t คือ ระยะเวลาบ่ม (30 นาที)
 V คือ ปริมาตรของเอนไซม์

(2) การวัดการเจริญของเชื้อ

ตรวจวัดการเจริญของเชื้อโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร สำหรับตัวอย่างที่มีสีเข้มจะใช้การเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสเก็บไว้วิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ ล้างตะกอนเซลล์ 2 ครั้ง ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.85 % นำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง แล้วเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.85 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ละลายตะกอนก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.85 % เป็นแบลนด์

(3) การหาปริมาณน้ำมันที่เหลือใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

สารเคมี

1. ไฮโดรคลอริก (HCl)
2. เฮกเซน (n-Hexane)
3. โซเดียมซัลเฟต Na_2SO_4 ผลึก

วิธีการหาปริมาณน้ำมันใน POME สามารถทำได้โดย ล้างเครื่องแก้วทุกชนิดด้วยเฮกเซน เพื่อขจัดคราบน้ำมันและไขมันที่อาจติดเครื่องแก้วได้ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาทำให้เป็นกรดที่พีเอช เท่ากับ 2 (โดยทั่วไปใช้ HCl 5 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร) นำตัวอย่างน้ำทิ้ง 2 มิลลิลิตรใส่ลงในกรวย

แยก ล้างภาชนะใส่ตัวอย่างน้ำทิ้งด้วยเฮกเซน 10 มิลลิลิตร แล้วเทลงในกรวยแยก ปิดฝา และเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น ปล่อยให้ชั้นน้ำลงในบีกเกอร์ที่สะอาด แล้วจึงปล่อยให้เฮกเซนลงในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (B) โดยปล่อยให้ไหลผ่านกระดาษกรองที่มีอยู่บนกรวยที่มี Na_2SO_4 1 กรัมหรือมากกว่าใส่อยู่ นำตัวอย่างน้ำเค็มสกัดแยกตามข้างต้นอย่างน้อย 3 ครั้ง ด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตรต่อ 1 ครั้งแล้วเทรวมกันลงในขวดกลั่นที่ชั่งน้ำหนักแล้วขวดเค็ม และล้างกระดาษกรองด้วยเฮกเซน 10-20 มิลลิลิตร ระเหยเฮกเซนจากขวดกลั่นในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วนำขวดกลั่นไปเข้าตู้อบ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ 30 นาที และชั่งน้ำหนัก (A) น้ำหนักของขวดกลั่นที่เพิ่มขึ้นคือปริมาณน้ำมันและไขมัน

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักขวดกลั่นหลังการทดลอง

B คือ น้ำหนักขวดกลั่นก่อนการทดลอง

(4) การหาค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เหลือใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

อบด้วยกระบี่เบี่ยงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำด้วยใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นลง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (B) เก็บในเดซิเคเตอร์ ดูดปริมาตรตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เทลงในถ้วยกระบี่เบี่ยงแล้วนำไปตั้งบนเครื่องอังไอน้ำ ปล่อยให้ให้น้ำระเหยจนแห้ง นำด้วยกระบี่เบี่ยงเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง นำด้วยกระบี่เบี่ยงใส่ในเดซิเคเตอร์ปล่อยให้เย็นและชั่งน้ำหนัก (A) ทำซ้ำจนได้น้ำหนักที่คงที่ คำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{TS (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักด้วยกระเบื้องหลังการทดลอง

B คือ น้ำหนักด้วยกระเบื้องก่อนการทดลอง

(5) การหาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

อบกระดาษกรองใยแก้วที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักกองที่ (B) วางกระดาษกรองบนกรวยบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ จากนั้นกรองตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องกรองบุชเนอร์ ล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที เมื่อแห้งแล้วนำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักกองที่ (A) คำนวณปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักกระดาษกรองหลังการทดลอง

B คือ น้ำหนักกระดาษกรองก่อนการทดลอง

(6) การหาค่าพีเอชใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

ค่าพีเอช เป็นค่าที่แสดงปริมาณของอนุภาคไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ในน้ำ พีเอชมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของไฮโดรเจนไอออนต่อไฮดรอกซิลไอออน ถ้าปริมาณไฮโดรเจนไอออนมีมากกว่าปริมาณไฮดรอกซิลไอออน สารละลายนั้นจะเป็นกรด ถ้าปริมาณไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนมีปรากฏอยู่เท่ากัน สารละลายนั้นจะเป็นกลาง

หลักการหาค่าพีเอชด้วยเครื่องมือวัดโดยทั่วไป

ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างแท่งแก้วอิเล็กโทรดและคาโบลอิเล็กโทรดให้สะอาด ใช้กระดาษทิชชูซับให้แห้ง จากนั้นปรับเครื่องมือให้ได้มาตรฐานด้วยสารละลายมาตรฐานที่มีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าของน้ำที่ตัวอย่าง ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างอิเล็กโทรดอีกครั้ง ซับน้ำให้แห้ง วัดค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ โดยจุ่มอิเล็กโทรดในตัวอย่าง เปิดสวิชทิ้งไว้ 30 วินาที แกว่งอิเล็กโทรดหลายๆครั้ง อ่านค่าพีเอช ปิดสวิช และล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น แล้วเช็ดในสารละลายที่เหมาะสม

(7) การหาค่าซีโอดีใน POME ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผ่านการให้อากาศในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต
2. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น
3. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

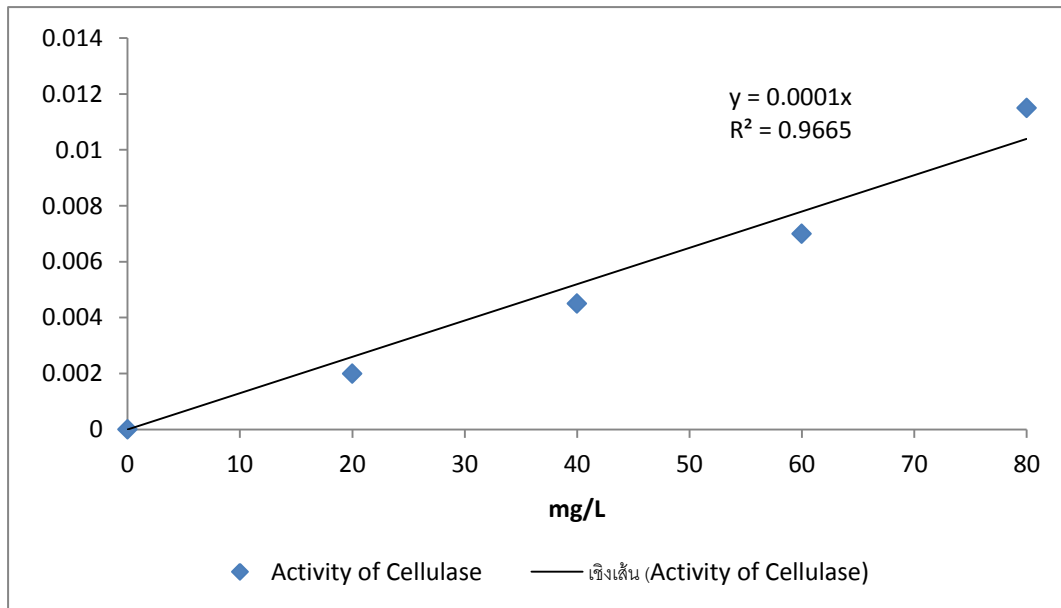
ค่าซีโอดีจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี closed reflux method (APHA, AWWA and WEF, 1998) เจือจางตัวอย่างให้มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ล้างหลอดซีโอดีด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 และน้ำกลั่น จากนั้นเติมตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 5 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีซิลเวอร์ซัลเฟต 7 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล ใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ นำผลที่ได้มาคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(A-B) \times M \times 8,000}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

เมื่อ A คือ ลบ.ชม.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทแบบลค์

B คือ ลบ.ชม.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ

M คือ โมลาริตีของ FAS

Standard curve of Glucose sugar

การเตรียมสารละลายไซเตรตบัฟเฟอร์ (sodium citrate buffer) ตามวิธีของ Gomori (1995

อ้างโดย Perrin and Dempsey, 1974)

เตรียมโดยผสมสารละลาย A และ B ตามค่าพีเอชที่ต้องการ และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

สารละลาย A : 0.05 M citric acid ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ 10.51 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร)

สารละลาย B : 0.05 M sodium citric ($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ 14.7 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร)

พีเอช	A (มิลลิลิตร)	B (มิลลิลิตร)
3.0	46.5	3.5
3.2	43.7	6.3
3.4	40.0	10.0
3.6	37.0	13.0
3.8	35.0	15.0
4.0	33.0	17.0
4.2	31.5	18.5
4.4	28.0	22.0
4.6	25.5	24.5
4.8	23.0	27.0
5.0	20.5	29.5
5.2	18.0	32.0
5.4	16.0	34.0
5.6	13.7	36.3
5.8	11.8	38.2
6.0	9.5	40.5
6.2	7.2	42.8

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสิประภา จันพรมศรี

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5711020022

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ไบโอเทค)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Proceeding

Janpromsri, S., Duangsuwan, W., Prasertsan, P. 2016. Testing of long throat venture for including air bubbles in oily wastewater. In proceeding of The 40th National Graduate Research Conference (NGRC40). The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Songkhla, Thailand. 20-21 October 2016, pp. 448-453.

Janpromsri, S., Duangsuwan, W., Prasertsan, P. 2018. Treatment of Palm Oil Mill Effluent using Induced Air Flotation with Adding Culture Broth of *Bacillus subtilis* to Reduce Oil Content. In proceeding of Water and Environment Technology Conference (WET). Lecture Hall A, Johoku Campus of Ehime, Japan. 14-15 July 2018, pp. 32.