การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค

Enhancement of Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent by Ultrasonic Pretreatment

สุทธิสา ยาอีด

Sutisa Yaeed

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Management
Prince of Songkla University
2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค

ผู้เขียน นางสาวสุทธิสา ยาอีด

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	**คณะกรรมการสอบ**
.....	.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรมาศ สุทธินุ่น)
	.....กรรมการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี)
.....	.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี สุขสาโรจน์)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง)
.....	.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชนิดา ชินผา)	(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)
	.....กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี สุขสาโรจน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นางสาวสุทธิสา ยาอีด)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....
(นางสาวสุทธิสา ยาอีด)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค

ผู้เขียน นางสาวสุทธิสา ยาอีด

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มรวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียดังกล่าว โดยศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยวิธีการตกจมร่วมกับอัลตราโซนิคก่อนการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ การบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันในน้ำเสียได้ 50.3 % ซึ่งทำให้ค่าไขมันในน้ำเสียลดลงอยู่ในช่วงของค่าแนะนำในการเดินระบบแบบไม่ใช้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (น้อยกว่า 10 g/L) จากการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตมีเทนและศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศหลังผ่านการหมักในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ที่อุณหภูมิ 35 °C ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นทำให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.7 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 539.1 ml CH_4/g $COD_{removal}$ นอกจากนี้พบว่า การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคมีผลทำให้น้ำตาลรีดิวซ์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้นถึง 76% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในรูปของบีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น 22.2 % และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น 30.5 % ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย และการกำจัดสีในหน่วย ADMI มีค่าเพิ่มขึ้น 10.5 % และ 10.7% ตามลำดับ สำหรับสารอินทรีย์ในรูปอื่นๆ หลังผ่านการหมักแบบไร้อากาศ พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค สามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนินและสารฮิวมิค ได้เพิ่มขึ้น 10.5, 10.2, 14.4, 21.1 และ 21.5 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม หลังจากนั้นทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และระยะเวลากักเก็บ 16 วัน ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค ให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 30.2 % โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 520.5 ml CH4/g $COD_{removal}$ การบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเข้าสู่การบำบัดในขั้นต่อไปของระบบบำบัดคือ ระบบบ่อปรับเสถียรจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้น้ำในบ่อสุดท้ายมีค่าสีและสารอินทรีย์ลดลงด้วย

Thesis Title Enhancement of biogas production from palm oil mill effluent by ultrasonic pretreatment

Author Miss Sutisa Yaeed

Major Program Environmental Management

Academic Year 2016

ABSTRACT

This research aimed to enhance biogas production from crude palm oil mill wastewater. The factor that influenced on color and organic matter removal efficiency was also studied. The pretreatment methods including ultrasonication combined with natural sedimentation were investigated for palm oil mill effluent (POME) treatment, prior to the biological digestion process. The oil removal efficiencies obtained from that pretreatment method was 50.3 percent, which decreased oil content value to be in the range of recommended initial values for palm oil mill biogas operation (less than 10 g/L). The potential of an anaerobic digestion and methane gas production efficiency of pretreated POME were firstly investigated in laboratory-scale with batch digesters operated at 35 °C. The result compared with the non-pretreatment processes showed that these pretreatment processes increased methane production by 29.7 percent. The maximum methane production was 539.1 ml CH4/g $COD_{removal}$ from wastewater pretreated by ultrasonication. In addition, the ultrasonication can increase the reducing sugar content in wastewater 76 percent. The percent of BOD_5 removal increased 22.2 percent whereas about of COD removal efficiencies were increase 30.5 percent. The increasing of suspended solids and color removal efficiencies (ADMI unit) were also observed by 10.5 and 10.7 percent. For other form of organic compounds, after the anaerobic digestion process, the sonicated wastewater can increase the phenols, flavonoid, anthocyanin, lignin, and humic substances removal efficiencies by 10.5, 10.2, 14.4, 21.1, and 21.5 percent respectively in comparing with non-pretreated wastewater. After that the pretreated wastewater by different methods were studied for their biomethane production potential in semi-continuous experiments which were done in completely stirred tank reactor (CSTR) at 35 °C and 16 days of HRT. The methane yields obtained from wastewater pretreated by ultrasonication were 520.5 ml CH4/g $COD_{removal}$ which increased the methane production by 30.2 percent from non-pretreatment wastewater experiment. These pretreatment processes affected on the color and organics removal by would reduce the color and organics in the

effluent from final pond of stabilization pond system which was the following stage after biogas system.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี เตชะภัททวรกุล สุขสาโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชนิดา ชินผา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรมาศ สุทธินุ่น ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา แก้ไขข้อบกพร่อง และแนะนำแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจสอบความถูกต้องจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2556 และทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปี 2555 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยหากการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตลอดจนนักวิทยาศาสตร์ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในทุกส่วนของหน่วยงานคณะการจัดการสิ่งแวดล้อมที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานตั้งแต่เริ่มจนจบสำเร็จลุล่วงด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณบริษัท พิทักษ์ปาล์มออยล์ จำกัด เป็นอย่างสูง สำหรับความกรุณาในการอนุเคราะห์ตัวอย่าง และความสะดวกต่างๆ ตลอดการดำเนินงานโครงการวิจัย ขอขอบคุณคุณณัฏฐาทัศน์ เจ้ยเปี้ยว ผู้จัดการระบบบำบัดน้ำเสียบริษัท พิทักษ์ปาล์มออยล์ จำกัด และเจ้าที่ประจำระบบทุกท่านที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูล และอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดียิ่งทุกครั้งที่ไปติดต่อ

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อเบบ ยาอีด คุณแม่สะลิขอ ยาอีด เป็นอย่างสูงที่สนับสนุนในทุกด้านตลอดการศึกษา ตลอดจนให้ความรัก ความห่วงใย ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอมา ขอบคุณคุณพ่อระวิ โอภิธากร และคุณแม่วัฒนา โอภิธากร พี่นุ๊ด พี่สิ พี่เน็ก น้องกวาง น้องดี้ น้องปุ้ย น้องไลลา น้องป๊อป น้องโมน่า น้องโฟล์ค น้องเดล ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในห้อง E701 กลุ่ม Aj.Bie students group และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาคณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตลอดจนทุกๆ ท่านที่มิได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ขึ้นได้

สุทธิสา ยาอีด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) (5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) (6)
กิตติกรรมประกาศ (8)
สารบัญ (9)
รายการตาราง (11)
รายการภาพประกอบ (13)
ตัวย่อและสัญลักษณ์ (16)
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
2 ทฤษฎีและการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 น้ำมันปาล์มดิบและกระบวนการผลิต 6
2.2 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 14
2.3 องค์ประกอบสารอินทรีย์และสีในน้ำเสียโรงงานสกัดสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 24
2.4 ลิกโนเซลลูโลส 28
2.5 สารประกอบฟีนอล 29
2.6 การเกิดสีของสารประกอบ Aromatic hydrocarbon 38
2.7 การวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI 41
2.8 การผลิตแก๊สชีวภาพ 44
2.9 การเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 52
2.10 อัลตราโซนิค pretreatment 55
2.12 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุน 62
3 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง 65
3.1 วัสดุอุปกรณ์การทดลอง และสารเคมี 65
3.1.1 วัสดุที่ใช้การทดลอง 65
3.1.2 สารเคมี 65
3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง 65
3.2 ภาพรวมของวิธีดำเนินการทดลอง 67
3.2.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมน้ำเสีย 68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของน้ำเสีย 68
3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารอินทรีย์ในน้ำเสีย 69
3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัลตราโซนิค pretreatment 73
3.2.5 ศึกษาการหมักแบบไม่ใช้อากาศระดับห่องปฏิบัติการ 68
3.2.6 ศึกษาความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ 78
3.2.7 พิจารณาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ 79
4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล 80
4.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสีย 80
4.2 ศึกษาสภาวะในการทำ Ultrasonic pretreatment 87
4.3 การผลิตก๊าซชีวภาพและศักยภาพการเกิดมีเทน 99
4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม 111
4.6 การพิจารณาความเป็นได้ในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ 115
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 117
เอกสารอ้างอิง 120
ภาคผนวก 125
ประวัติผู้เขียน 144

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2-1 การเปรียบเทียบการแยกน้ำมันตามวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน โดยใช้เทคโนโลยีการแยกแบบ separator การใช้ decanter และการใช้ decanter ร่วมกับ separator 13

2-2 ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติน้ำเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของกระบวนการผลิต 16

2-3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำทิ้งรวม (POME) 17

2-4 คุณสมบัติของน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม น้ำเสียก่อนเข้าระบบผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียหลังออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ และน้ำเสียในบ่อสุดท้าย 18

2-5 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปในแต่ละกระบวนการของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 21

2-6 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบอุตสาหกรรม 22

2-7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของมาตรฐานน้ำทิ้งในประเทศไทย 23

2-8 องค์ประกอบทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 24

2-9 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฮิวมิค 36

2-10 แสดงผลของการคอนจูเกตที่มีต่อค่า λ_{max} และ ε 39

2-11 เฉดสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ 43

2-12 ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมัก 46

2-13 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 51

2-14 การใช้ Thermal pretreatment เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 53

2-15 การใช้ Ozonation pretreatment เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 53

2-16 การทดลอง Ultrasonic pretreatment เพื่อการลดปริมาณสลัดจ์ในระบบบำบัดน้ำเสีย 61

2-17 การใช้ Ultrasonic pretreatment เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 61

3-1 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 69

3-2 วิธีการวิเคราะห์ สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และลิกนิน 69

3-3 Ultrasonic density เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Amplitude (%) 73

3-4 สภาวะในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำ pretreatment น้ำเสียตัวอย่าง 74

3-5 ระยะเวลากักเก็บ และปริมาตรของเสียที่เติม-ออกในแต่ละวันในการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง semi-continuous stirred digester 77

4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 80

4-2 สัดส่วนองค์ประกอบในน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4-3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ลิกนินแทนนิน ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน ในน้ำเสียตัวอย่าง 84

4-4 reducing sugar ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration 87

4-5 BOD_5 ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration 88

4-6 SCOD ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration 89

4-7 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค power input 0.27 W/ml 91

4-8 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค power input 0.31 W/ml 91

4-9 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค power input 0.44 W/ml 92

4-10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ-เคมีของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 99

4-11 ลักษณะสมบัติของของน้ำเสียก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศ แบบกะ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 102

4-12 ปริมาณแก๊สชีวภาพ และแก๊สมีเทนของการหมักแบบไร้อากาศแบบกะ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 103

4-13 ลักษณะสมบัติของของน้ำเสียก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศ แบบกึ่งต่อเนื่อง pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 106

4-14 ปริมาณแก๊สชีวภาพ และแก๊สมีเทนของการหมักแบบไร้อากาศแบบกะ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 103

4-15 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียบ่อแรก บ่อหลังผลิตก๊าซชีวภาพ และบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 110

4-16 เงินลงทุนเริ่มต้นของบ่อหมักแก๊สชีวภาพ 112

4-17 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานการผลิตแก๊สชีวภาพ 113

4-18 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม 116

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2-1 สัดส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มโลก 6
2-2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลปาล์มสด 8
2-3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบแบบมาตรฐาน (แบบเปียก) 10
2-4 ตัวอย่างแผนภาพการไหลของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 19
2-5 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส 28
2-6 พันธะต่างๆของ hemicellulose และ cellulose 29
2-7 สารประกอบฟีนอลพื้นฐาน 30
2-8 สารประกอบโพลีฟีนอล 31
2-9 สีของแอนโทไซยานนิน 33
2-10 กระบวนการเกิดฮิวมิค 35
2-11 โครงสร้างแบบจำลองของฮิวมิค 36
2-12 อัลตราไวโอเลทของ polyenes แสดง red shift เนื่องจากอิทธิพลของคอนจูเกชัน 38
2-13 molecular orbital ของ 1, 3 – butadiene 39
2-14 สเปกตรัมของบีตาแคโรทีนที่เป็นไอโซเมอร์ (isomer) กัน 40
2-15 การเปลี่ยนสภาวะ π-π^* ใน s-trans และ s-cis ของ 1,3-butadiene 41
2-16 องค์ประกอบในการวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI 42
2-17 แผนภาพกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวภาพ 45
2-18 ตัวอย่างการสร้างกราฟปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลอง BMP 50
2-19 ช่วงความถี่คลื่นอัลตราโซนิค 55
2-20 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ 56
2-21 อ่างอัลตราโซนิค 56
2-22 ลักษณะของฮอร์นชนิดต่างๆ 57
2-23 การแตกของเซลลูโลส 59
2-24 แสดงโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของสลัดจ์จากการเพิ่มเวลาในการ sonication 60
A) 0 นาที B) 2 นาที C) 10 นาที D) 30 นาที
3-1 น้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 66
3-2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นหัวเชื้อในกระบวนการหมัก 66
3-3 ชุดทดลองอัลตราโซนิค 66
3-4 แสดงการแยกชั้นไขมันในขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียตั้งต้น 68
3-5 การหมักด้วยปฏิกรณ์แบบกะ (Batch) 75
3-6 การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการแทนที่น้ำ 75
3-7 แบบจำลอง semi-continuous stirred digester ที่ใช้ในการทดลอง 76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-8 การทดลองระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบCSTR 76

4-1 ประสิทธิภาพการลดลงของน้ำมันและไขมัน และซีโอดี ที่ระยะเวลา 0.5 ถึง 5 ช.ม. 81

4-2 ลักษณะของน้ำมันในน้ำเสียตัวอย่างส่วนล่างหลังการตั้งให้เกิดการแยกชั้นเองตามธรรมชาติกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 100 เท่า 82

4-3 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) 85

4-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication duration กับปริมาณ reducing sugar ที่วัดได้ เมื่อ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml 88

4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication duration กับปริมาณ BOD_5 ที่วัดได้ เมื่อ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml 89

4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication duration กับปริมาณ SCOD ที่วัดได้ เมื่อ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml 90

4-7 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml 93

4-8 ความเข้มข้นของ BOD_5 เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml 94

4-9 ความเข้มข้นของ SCOD เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml 94

4-10 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.27 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที 95

4-11 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.31 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที 96

4-12 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที 96

4-13 สัดส่วนของ BOD_5/TCOD SCOD/TCOD และ reducing sugar ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 90 นาที 98

4-14 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 90 นาที 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4-15 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลังการหมักด้วยระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกะ (Batch) ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 30 นาที 101

4-16 ปริมาณแก๊สมีเทนสะสมจากการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกะ ของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 103

4-17 ประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อผ่านการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง ของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.44 W/ml 105

4-18 การผลิตมีเทนของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง ของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตร้าโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml 108

4-19 ไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ในครัวเรือน 114

5-1 แนวคิดการประยุกต์ใช้ Ultrasonic pretreatment ในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 119

สัญลักษณ์และคำย่อที่สำคัญ

CPO	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)
EFB	ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch)
FFB	ผลปาล์มสด **(**Fresh Fruit Bunch)
GTZ	สำนักความร่วมมือทางวิชาการของเยอรมัน (Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit)
PKO	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil)
POME	น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent)
PORIM	สถาบันวิจัยน้ำมันปาล์มประเทศมาเลเซีย (Palm Oil Research Institute of Malaysia)
BOD	Biochemical oxygen demand
COD	Chemical oxygen demand
DO	Dissolved oxygen
DOC	Dissolved organic carbon
DOM	Dissolved organic matter
FEEM	Fluorescent excitation-emission matrix
HPI	Hydrophilic
HPO	Hydrophobic
HRT	Hydraulic retention time
MW	Molecular weight
NOM	Natural organic matter
OLR	Organic loading rate
SCOD	Soluble chemical oxygen demand
SS	Suspended solid
SUVA	Specific ultraviolet absorbent
TDS	Total dissolved solid

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของภาคใต้ ซึ่งกรรมวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มดิบในปัจจุบันที่ใช้กันมากกว่าร้อยละ 90 ของผลผลิตในรูปของน้ำมันปาล์มดิบทั้งหมดเป็นการสกัดแบบใช้น้ำ (แบบมาตรฐาน) กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานจะมีการใช้น้ำในกระบวนการสกัดเป็นปริมาณมาก ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจึงมีปริมาณมากเช่นกัน (Rupani *et al*., 2010; Mohammad *et al.,* 2012) น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลประกอบด้วยสารอินทรีย์ในปริมาณสูง และมีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.6-4.8 ค่าสารอินทรีย์ในรูปของ COD อยู่ระหว่าง 70,000-120,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสารอินทรีย์ในรูปของ BOD อยู่ระหว่าง 30,000-40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Rupani *et al*. 2010; Lam and Lee 2011; Wu *et al.* 2010) จากลักษณะน้ำเสียดังกล่าวนี้ จึงมีความจำเป็นต้องมีการนำน้ำเสียมาทำการบำบัดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ได้แก่ ค่า pH อยู่ระหว่าง 5.5 – 9 ค่าสารอินทรีย์ในรูปของ COD ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าสารอินทรีย์ในรูปของ BOD ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ราชกิจจานุเบกษา, 2539)

ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกือบทั้งหมดใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียแบบระบบชุดบ่อไร้อากาศร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อผึ่ง (Pond system) ต่อเนื่องกัน (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) และมีโรงงานผู้ผลิตน้ำมันปาล์มดิบส่วนหนึ่งทำการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเป็นการหมักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์แบบไร้ออกซิเจนแบบปิด (Closed anaerobic tank system) จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอยและสารละลาย ได้ออกมาเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีส่วนประกอบของก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Singh *et al.*, 2011) โดยที่ก๊าซชีวภาพนี้จะถูกส่งไปใช้ประโยชน์ สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันเตา ก๊าซหุงต้ม หรือนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานเองหรือขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคผ่านโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็ก ซึ่งเป็นมาตรการที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในสภาวะปัจจุบันและอนาคตนั้นพลังงานมีแนวโน้มลดลงและอาจขาดแคลนได้ (Sinnaraprasat and Fongsatitkul, 2011) วิธีการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความสกปรกได้มากแต่ยังไม่สามารถปล่อยออกสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้ (Yejian *et al.,*2008) เนื่องจากน้ำเสียในบ่อสุดท้ายของระบบดังกล่าวยังคงมีค่าเกินค่าความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์และสารแขวนลอยสูงเกินกว่า

มาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและสีซึ่งมีลักษณะเป็นที่พึงรังเกียจและอาจมีผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำหากมีการปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยตรง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ปัจจุบันการจัดการกับน้ำเสียในบ่อสุดท้ายของกระบวนการดังกล่าวจึงเป็นการระบายออกโดยการกักเก็บไว้ในบ่อเพื่อปล่อยให้มีการซึมลงสู่ใต้ดินส่วนหนึ่งและมีการระเหยไปเองตามธรรมชาติอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้จะต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการขุดบ่อเพื่อกักเก็บน้ำ ส่วนอีกวิธีการหนึ่งคือการนำน้ำไปรดสวนปาล์มของโรงงานหรือแปลงของเกษตรกรที่อยู่ใกล้เคียง (ธีระพงศ์ จันทรนิยม, 2551) อย่างไรก็ตามในช่วงฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเพียงพอต่อความต้องการของพืช และมีอัตราการระเหยน้ำค่อนข้างต่ำ การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังที่กล่าวมาก็ไม่สามารถทำได้และจำเป็นต้องมีพื้นที่เพิ่มขึ้นเพื่อการกักเก็บน้ำไว้ (อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และพูนสุข ประเสริฐสรรพ์, 2551)

ด้วยลักษณะเด่นของน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มคือสารอินทรีย์ โดยเฉพาะในรูปค่าบีโอดีและซีโอดีที่ค่อนข้างสูงเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ที่วัดได้ ทำให้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพซึ่งมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น (Yejian *et al.,* 2008) จึงมีความสำคัญในการนำมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและยังจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดอื่นๆในระบบบำบัดร่วมด้วย เนื่องจากในบางกรณีการใช้กระบวนการทางชีวภาพเพียงระบบเดียวอาจสามารถลดค่าซีโอดีและบีโอดีได้ตามมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่ยังคงเป็นปัญหาอยู่ เนื่องจากสารปนเปื้อนในน้ำเสียมีองค์ประกอบที่หลากหลายของสารอินทรีย์ และบางชนิดก็ยากแก่การย่อยสลายทางชีวภาพ (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547) การจัดการสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่สลับซับซ้อนจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้หมดโดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพเพียงอย่างเดียว กระบวนการทางกายภาพ-เคมีจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยอาจต้องมีการบำบัดก่อน (Pretreatment) หรือการบำบัดหลัง (Post-treatment) การใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพก็ได้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) การจัดเรียงกระบวนการทางกายภาพ-เคมีไว้ก่อนการใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ จะใช้ในกรณีที่น้ำเสียมีองค์ประกอบของสารที่อาจยับยั้งหรือยากแก่การย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งกระบวนการทางกายภาพ-เคมีจะช่วยแตกพันธะของสารที่ซับซ้อนให้มีโมเลกุลเล็กลงทำให้การทำงานในกระบวนการทางชีวภาพดีขึ้น ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงให้อัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีมีค่าสูงขึ้น (กูนูรหายาม ยามิรูเด็ง และคณะ, 2551) ส่งเสริมให้การย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศเพิ่มขึ้นซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนการนำกระบวนการทางกายภาพ-เคมีมาใช้ต่อจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพก็เพื่อต้องการให้คุณภาพของน้ำทิ้งดีขึ้น สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้หรือมีโอกาสที่จะปล่อยทิ้งได้ตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดอีกด้วย ซึ่งต้องมีวิธีบำบัดอย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยพิจารณาจาก

องค์ประกอบหลายๆด้าน เช่น ลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย พื้นที่ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555) เนื่องจากแม้จะเป็นน้ำเสียจากโรงงานเดียวกันแต่ข้อมูลลักษณะน้ำเสียอาจแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตในช่วงเวลานั้นๆ และกระบวนการผลิต

ดังนั้นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีลักษณะเด่นในเรื่องของภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ในปริมาณสูงและสารย่อยสลายยากที่ยังหลงเหลืออยู่หลังผ่านการบำบัดในระบบบ่อโดยปกติแล้ว โดยทั่วไปแล้วอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบสามารถผลิตไฟฟ้าใช้ได้เองในปริมาณมากและมากพอสำหรับการส่งขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วย (อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และพูนสุข ประเสริฐสรรพ์, 2551) ซึ่งพบว่าผลของการนำอัลตราโซนิคเข้ามาปรับปรุงระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซให้ได้มากขึ้นและเป็นไปได้ที่จะมีปริมาณไฟฟ้ามากพอในการดำเนินการระบบอัลตราโซนิคได้เองโดยไม่รบกวนกำลังการผลิตเดิม ซึ่งในต่างประเทศพบว่าสามารถเพิ่ม Yield ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 25% กับน้ำเสียของอุตสาหกรรมการเกษตร (Singhal *et al.*, 2012)

ด้วยจุดมุ่งหมายในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ในการศึกษานี้จึงสนใจในการนำอัลตราโซนิค โคอะเลสเซอร์ และกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ มาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดขั้นต้น เพื่อส่งเสริมให้จุลินทรีย์ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพสามารถใช้ประโยชน์จากสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบให้ได้มากที่สุดและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นแนวทางที่ให้ประโยชน์ ทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic) สิ่งแวดล้อม (Environment) และเทคโนโลยี (Technology) โดยในด้านเศรษฐศาสตร์นั้น เป็นการสร้างมูลค่าให้กับของเสีย ในด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการบำบัดของเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ส่วนในด้านเทคโนโลยีเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการทางด้านวิศวกรรมเพื่อบำบัดของเสีย ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการและแนวทางที่สำคัญยิ่งที่จะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในมิติด้านเศรษฐศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ควบคู่ไปกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักในการวิจัยนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีการบำบัดแบบไร้อากาศร่วมด้วย โดยการศึกษามีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1) ศึกษาองค์ประกอบในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและสารที่ยากแก่การย่อยสลายทางชีวภาพ

2) ศึกษาผลของ power input และ sonication time ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค

3) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค เปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบเดิม

4) ศึกษาความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อพิจารณาการใช้อัลตราโซนิคร่วมกับกระบวนการบำบัดที่โรงงานมีอยู่เดิมเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือปล่อยทิ้งตามกฎหมายเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบที่เสนอตามโครงการ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้งทางกายภาพและทางเคมีเพื่อระบุสัดส่วนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

1.3.2 ศึกษาผลของการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการแปรเปลี่ยนได้แก่ power input และ sonication time

1.3.3 ศึกษาศักยภาพในผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคโดยทำการทดลองการหมักแบบไร้อากาศจำลองในห้องปฏิบัติการ (Biochemical methane potential – BMP –)

1.3.4 ศึกษาศักยภาพในผลิตก๊าซชีวภาพด้วย Reactor แบบ Semi-continuous ขนาด 3 ลิตร

1.3.5 ตัวแปรหลักในการประเมินประสิทธิภาพคือ Methane yield และ COD removal รวมทั้งองค์ประกอบในน้ำเสียที่เปลี่ยนไป ทั้งในรูปของตัวแปรพื้นฐานและตัวแปรเชิงลึก

1.3.6 ประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเสนอทางเลือกในการนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการบำบัดที่มีอยู่ในการประสิทธิภาพการบำบัดให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบสัดส่วนขององค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

1.4.2 ทราบผลของปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค

1.4.3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะการลดสารอินทรีย์และสี

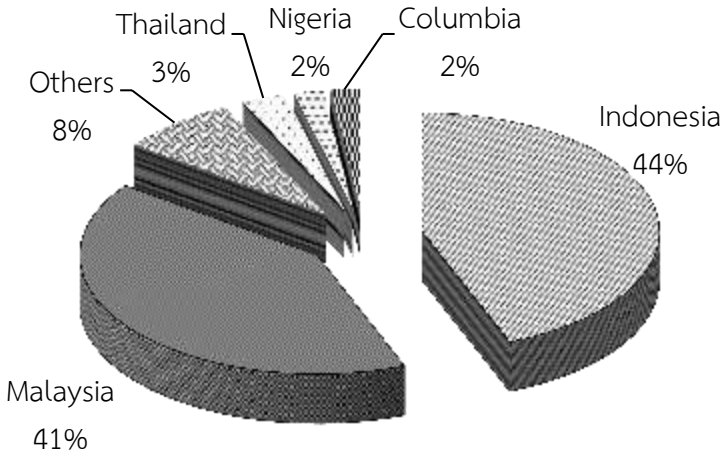
1.4.4 เป็นแนวทางปฏิบัติในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นก่อนเข้าสู่การปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นสูง(Tertiary treatment) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือทิ้งได้ตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด

บทที่ 2
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2.1.1 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของโลก

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นที่มีการเพาะปลูกได้เฉพาะในพื้นที่เขตร้อนชื้นของโลก โดยพบว่าปาล์มน้ำมันมีการขยายตัวของพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 40 ปีที่ผ่านมา แต่การขยายตัวของพื้นที่ปลูกดังกล่าวเกิดขึ้นในบางประเทศเท่านั้น (Singh *et al*., 2010, Wu *et al.,* 2010) ซึ่งประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซียเป็นประเทศผู้ผลิตน้ำมันปาล์มรายใหญ่ของโลก (Lam and Lee, 2011, Poh and Chong, 2009, Wu *et al.,* 2009, Mohammad *et al.,* 2012, Wu *et al.,* 2010) โดยทั้งสองประเทศมีสัดส่วนการผลิตกว่า 85% ของการผลิตทั่วโลก ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 สัดส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มโลก
ที่มา : ดัดแปลงจาก Mohammad *et al*. (2012), Rupani *et al.* (2010) และ Singh *et al*. (2010)

อย่างไรก็ตามรายงานสถานการณ์ตลาดน้ำมันปาล์มทั่วโลกปี 2554 คาดการณ์ว่าในอนาคตการผลิตน้ำมันปาล์มในมาเลเซียจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนที่ดินเพาะปลูกประกอบกับต้นปาล์มน้ำมันมีอายุมาก ในทางตรงข้าม อนาคตการผลิตน้ำมันปาล์มของอินโดนีเซียกลับสดใสเนื่องจากต้นปาล์มน้ำมันยังมีอายุน้อยและยังสามารถขยายพื้นที่การเพาะปลูกออกไปได้อีก ดังนั้น คาดว่าผลผลิตน้ำมันปาล์มของอินโดนีเซียจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในอนาคต (กระทรวงเกษตรและ

สหกรณ์, 2552) พื้นที่สำหรับการปลูกปาล์มเพื่อผลิตน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทยมีจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ โดยเฉพาะคู่แข่งคือ ประเทศมาเลเซีย และอินโดนีเซีย (กรมการค้าภายใน, 2554)

2.1.2 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของประเทศไทย

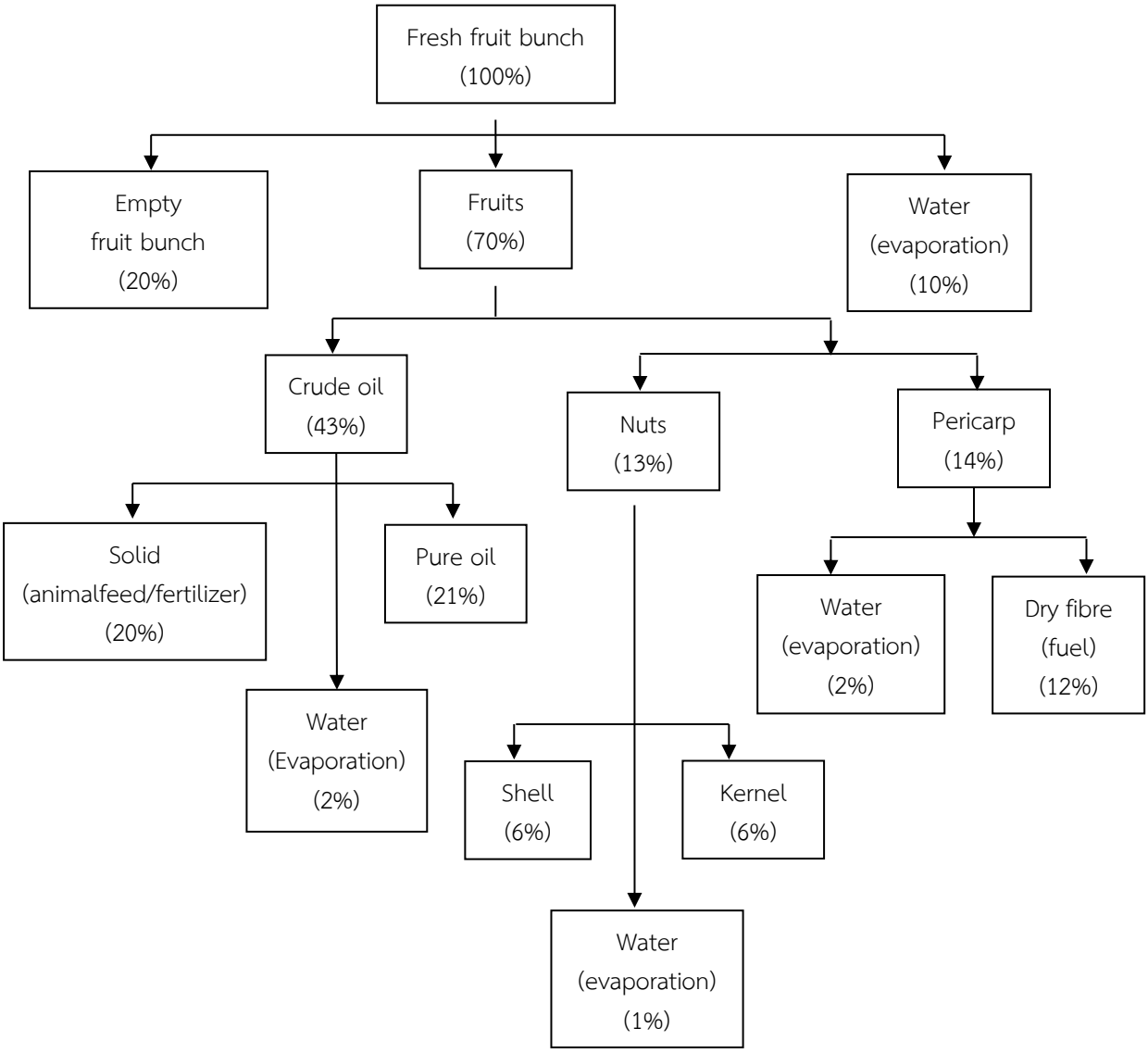
อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของประเทศไทยเริ่มดำเนินการมากว่า 30 ปี (GTZ, 2008) โดยในช่วง 20 ปีแรกธุรกิจการสกัดน้ำมันปาล์มดำเนินไปได้ด้วยดี เป็นผลให้มีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพิ่มมากขึ้น แต่ในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา การผลิตน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทยกลับมีเจริญเติบโตลดลงอย่างมาก เนื่องจากพื้นที่ปลูกปาล์มไม่ได้มีการขยายตัวตามและมีจำนวนจำกัด (กรมการค้าภายใน, 2554) ทำให้ผลปาล์มสดมีปริมาณไม่เพียงพอ ดังนั้นผลตอบแทนของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจึงลดลง จึงจำเป็นต้องพิจารณาหาช่องทางในการปรับปรุงกระบวนผลิตเพื่อเพิ่มรายได้ อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันก็ยังเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีการพึ่งพาตนเองเกือบทั้งหมดในด้านพลังงาน เนื่องจากปริมาณชีวมวลทั้งหมดที่มีอยู่ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่สามารถนำมาผลิตพลังงานได้นั้นโดยทั่วไปจะมีปริมาณมากกว่าความต้องการใช้พลังงานของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (วารี ช้อนรักธรรม, 2548)

การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศไทย นับได้ว่ามีความสำคัญอย่างมาก โดยพื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 98 อยู่ในภาคใต้ของประเทศไทย จึงมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของภาคใต้ (Chavalparit *et al.,* 2006) จังหวัดที่มีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันมาก คือ กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร นครศรีธรรมราช ตรัง สตูล และสงขลา (กรมการค้าภายใน, 2554) ทำให้เกิดอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ในภาคใต้เป็นจำนวนมาก ในปัจจุบันมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานทั้งสิ้นประมาณ 77 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557) การสกัดน้ำมันปาล์มนอกจากจะได้น้ำมันปาล์มดิบแล้ว ยังมีวัสดุเศษเหลือและของเสียจำนวนมาก โดยกรมการค้าภายใน (2553) ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณมลสารของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทั้งหมดกับปริมาณมลสารที่เป็นของเหลวจากบ้านเรือน (60 กรัมบีโอดีต่อคนต่อวัน) จะมีค่าเท่ากับการปล่อยของเสียโดยประชากรประมาณ 3 ล้านต่อคนต่อวัน ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

2.1.3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในปัจจุบัน

เนื่องจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีรายละเอียดที่สำคัญ ซึ่งรายละเอียดของหน่วยการผลิตบางอย่างจัดเป็นความลับทางการค้าที่สำคัญของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โรงงานจึงอาจแสดงรายละเอียดได้ไม่หมดเนื่องจากเกรงว่าจะเกิดการสูญเสียความได้เปรียบเชิงธุรกิจ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันสามารถสรุปกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้เป็น 2 ประเภทคือ กระบวนการสกัดแบบใช้ไอน้ำหรือที่เรียกว่าแบบมาตรฐาน (แบบเปียก) และ

กระบวนการแบบไม่ใช้ไอน้ำ (กระบวนการสกัดแบบย่างผลปาล์ม และกระบวนการสกัดแบบทอดผลปาล์ม) (Mohammad *et al.,* 2012) ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อนำผลปาล์มผ่านเข้าสู่กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบสัดส่วนโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลปาล์มสด จะเป็นดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลปาล์มสด
ที่มา : ดัดแปลงจาก Mohammad *et al.* (2012), Lam and Lee (2011)
และ Poh and Chong (2009)

โดยทั่วไปวิธีการสกัดแบบไม่ใช้น้ำจะไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย แต่กระบวนการสกัดที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ในปริมาณมาก สามารถให้ผลผลิตในรูปน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพ คือ กระบวนการสกัดแบบใช้ไอน้ำ (Rupani *et al*., 2010) แต่จะเกิดน้ำเสียจากการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการที่สนใจนำมาศึกษา กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบแบบมาตรฐาน (แบบเปียก) ดังแสดงในภาพที่ 2-3

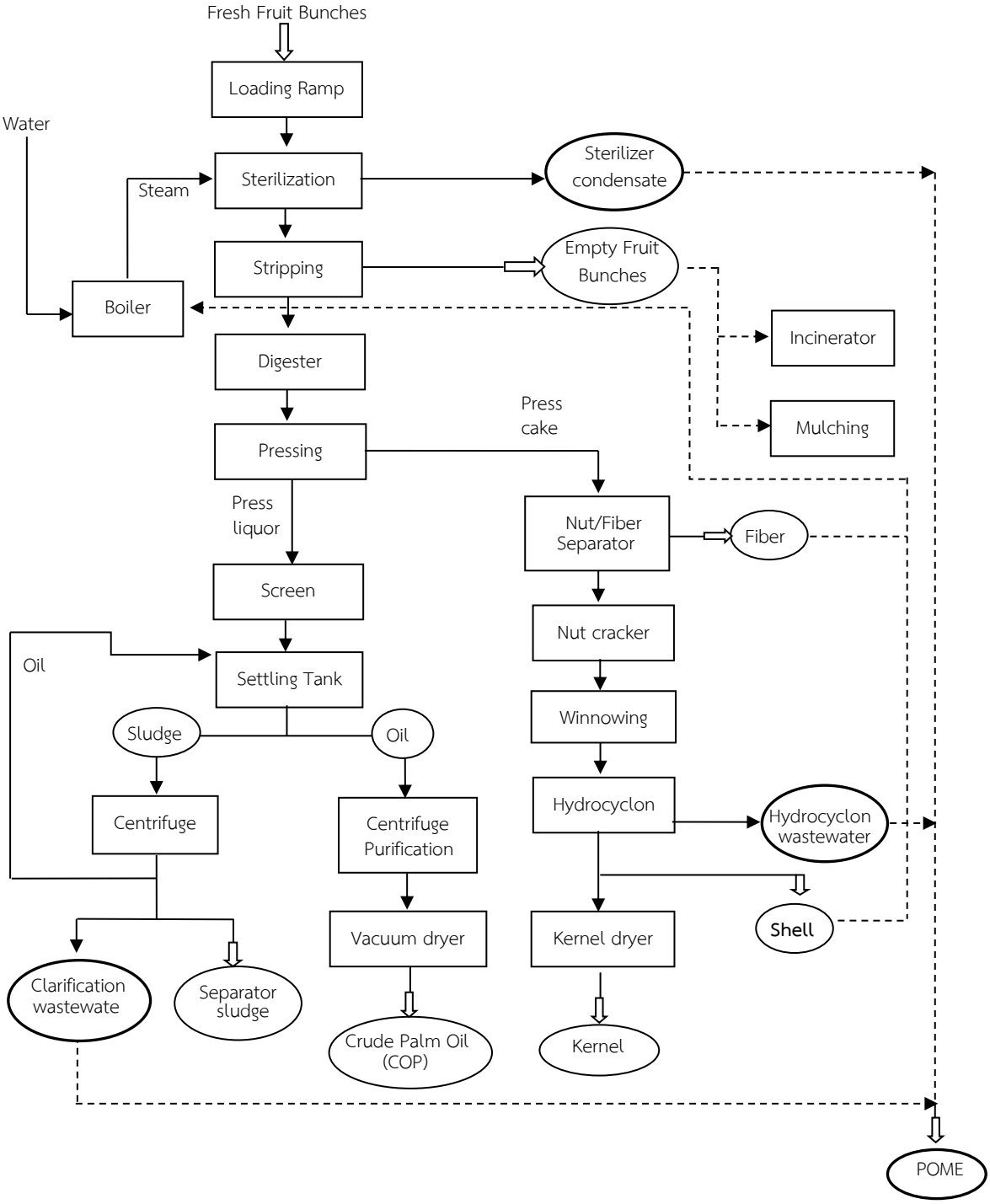
จากภาพที่ 2-3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้ไอน้ำ เริ่มต้นหลังจากการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มจากสวนและขนส่งมายังโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทะลายปาล์มสดจะถูกขนถ่ายลงบนพื้นที่รองรับ (ramp) และใส่ในตู้ขนาด 2.5–3.0 ตัน ระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยวจนถึงการนึ่งทะลายปาล์มควรสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และไม่ควรเกิน 72 ชั่วโมง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไขมันอิสระจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในส่วนเปลือก น้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสดมีกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 1 หากทิ้งผลปาล์มไว้นานปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mohammad *et al.,* 2012) ทำให้น้ำมันมีปริมาณและคุณภาพลดลง จากนั้นจะนำเข้าสู่กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีกระบวนการหลักอยู่ 4 ขั้นตอน (Rupani *et al*., 2010) คือ การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) การแยกผลปาล์ม (Bunch stripping) การสกัดน้ำมัน (Oil extraction) และการทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification)

2.1.3.1 การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization)

การอบนึ่งทะลายปาล์มในแต่ละครั้งจะบรรจุทะลายปาล์มในห้องฆ่าเชื้อ และทำการนึ่งทะลายปาล์มสดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส (Wu *et al.,* 2010) ที่ความดันประมาณ 40-50 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลาประมาณ 40-60 นาที การนึ่งทะลายปาล์มมีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งเอนไซม์ซึ่งจะหยุดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระอันจะเป็นผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมัน และส่งผลให้เกิดกลิ่นหืน การนึ่งปาล์มยังทำให้ขั้วผลปาล์มนิ่มหลุดร่วงจากทะลายปาล์มได้ง่าย และทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มยุ่ย ง่ายต่อการหีบอัดน้ำมัน (Singh *et al.,* 2010)

2.1.3.2 การแยกผลปาล์ม (Bunch stripping)

ทะลายปาล์มที่นึ่งเสร็จแล้วจะถูกลำเลียงเข้าเครื่องแยกผลปาล์มและทะลายปาล์มออกจากกัน โดยใช้เครื่อง Rotary drum thresher ซึ่งเป็นทรงกระบอกกลวงหมุนด้วยความเร็วประมาณ 23 รอบต่อนาที ในส่วนของทะลายปาล์มจะถูกแยกเก็บแล้วนำไปเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ลดปริมาณวัสดุเหลือและเพื่อผลิตเถ้าสำหรับใช้เป็นปุ๋ยต่อไป ในปัจจุบันอาจนำไปเพาะเห็ดและทำปุ๋ยหมัก (Chavalparit *et al*., 2006) ส่วนผลปาล์มที่แยกได้จะถูกนำส่งไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม (Vertical steam-jacketed drum digesters) โดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปถังทรงกระบอกซึ่งภายในมีใบพัด มีลักษณะเป็นแผ่นเพื่อตีผลปาล์มให้แตกและจะมีการเติมน้ำร้อนลงไปเล็กน้อยเพื่อตี



ภาพที่ 2-3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบแบบมาตรฐาน (แบบเปียก)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rupani *et al*. (2010), Lam and Lee (2011), Wu *et al.* (2010) และ Mohammad *e al.* (2012)

ผลปาล์มให้ยุ่ย กวนผลปาล์มให้เส้นใยฉีกแยกจากเมล็ดและให้เซลล์น้ำมันเกิดการแตกตัว การกวนจะเกิดขึ้นประมาณ 15-20 นาที จากนั้นจึงป้อนเข้าเครื่องหีบแบบอัดเกลียว (Screw press) ในขั้นตอนการสกัดน้ำมันต่อไป (Rupani *et al*., 2010; Mohammad *et al.,* 2012)

2.1.3.3 การสกัดน้ำมัน (Oil extraction)

น้ำมันที่เกิดขึ้นจากส่วนของเปลือกของผลปาล์มถูกสกัดด้วยเครื่องหีบเกลียวอัด ได้ของผสมที่มีน้ำมันอยู่ (Oil phase) (Rupani *et al.,* 2010) ซึ่งจะมีปริมาณสารแขวนลอยทำให้แยกน้ำมันได้ยาก มีผลทำให้น้ำเสียของโรงงานมีภาระบรรทุกอินทรีย์ (Organic loading) สูง น้ำมันจะถูกแยกออกจากน้ำ เศษเส้นใย รวมทั้งสิ่งสกปรกอื่นๆ โดยการใช้เครื่อง Decanter หรือ เครื่อง Separator (Wu *et al.,* 2010) อย่างไรก็ตามน้ำมันดิบที่ผ่านเครื่อง separator โดยส่วนใหญ่ยังคงมีสิ่งเจือปนอยู่อีกมาก โดยเฉพาะอนุภาคของแข็ง จึงต้องมีการนำมาผ่านเข้าเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูงเพื่อบำบัดอนุภาคของแข็งหลังจากนั้นจึงผ่านเข้าสู่เครื่องดูดสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้น แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บในถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่ รอเข้าสู่ขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์หรือเตรียมจำหน่ายโรงงานผลิตน้ำมันบริสุทธิ์ (Lam and Lee, 2011)

ในส่วนที่เป็นของแข็ง (Press cake) ประกอบด้วยเมล็ดและใย ซึ่งถูกทำให้ร้อนด้วยลมร้อน (135 องศาเซลเซียส) จนแห้งแล้วแยกออกจากกันโดยใช้ไซโคลน เมล็ดปาล์มที่แยกได้จะถูกนำไปเข้าเครื่องกะเทาะ (Centrifuge crackers) เพื่อแยกเมล็ดในและกะลา โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะขายเมล็ดในปาล์มให้โรงงานสกัดน้ำมันเมล็ดใน แล้วนำเส้นใยและกะลาไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำ (Mohammad *et al.,* 2012)

2.1.3.4 การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification)

ขั้นตอนต่างๆ นับจากนี้เป็นต้นไป จะอยู่ในส่วนที่เรียกว่าห้องน้ำมัน (Oil room) ซึ่งจะต้องผ่านการกรองเพื่อแยกอนุภาคขนาดใหญ่จากนั้นจะเข้าสู่ถังตกจมเพื่อแยกส่วนน้ำมันออกจากน้ำสลัดจ์ น้ำมันที่แยกได้จากถังตกจมจะผสมรวมกับน้ำมันที่แยกได้จากน้ำสลัดจ์ และจะเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบที่บริสุทธิ์และจะเก็บไว้ในถังเก็บจนกว่าจะส่งไปขายยังโรงกลั่นบริสุทธิ์ (Rupani *et al.,* 2010)

<u>การกรองน้ำมันดิบ</u>

การแยกน้ำมันจากของผสมที่มีน้ำมันอยู่ จำเป็นต้องเติมน้ำร้อนลงไปในน้ำมันดิบ แล้วผ่านตะแกรงสั่น (vibrating screen) เป็นตะแกรงกรองเส้นใยและชิ้นส่วนเล็กๆ ของส่วนเปลือกออกจากส่วนที่เป็นของเหลว (Rupani *et al.,* 2010; Lam and Lee, 2011) น้ำมันดิบที่ได้หลังการกรองยังมีอนุภาคขนาดเล็กและน้ำปนกันอยู่ ตะแกรงชนิดนี้มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีการสัมผัสของน้ำมันและออกซิเจน เป็นผลให้คุณภาพน้ำมันลดลง (Wu *et al.,* 2010)

<u>การแยกน้ำมันในถังตกจม</u>

วิธีการแยกน้ำมันและส่วนปนเปื้อน (น้ำและอนุภาคต่างๆ) เกิดขึ้นในถังตกจมโดยมีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำโดยตรง หรือให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อยู่ในท่อปิดและอาศัยแรงโน้มถ่วงตลอดจนการเติมน้ำร้อนเพื่อปรับปรุงการแยกน้ำมัน เครื่องมือและวิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพการแยกอย่างจำกัด โดยเฉลี่ยสามารถแยกน้ำมันได้เพียงร้อยละ 30 ขึ้นกับอัตราภาระบรรทุกพื้นผิว (Surface loading rate) (Lam and Lee, 2011) และระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ น้ำมันที่แยกได้ยังคงมีอนุภาคต่างๆ ปนเปื้อน และส่วนผสมที่ปล่อยออกจากถังตกจมยังคงมีน้ำมันปะปนอยู่มาก การเพิ่มระยะเวลาที่อยู่ในถังตกจมและการใช้อุณหภูมิมีผลให้น้ำมันที่ได้มีคุณภาพลดลง น้ำมันที่อยู่ส่วนบนของถังตกจมจะถูกส่งไปทำให้บริสุทธิ์ ส่วนของผสมส่วนล่าง (น้ำสลัดจ์) จะถูกรวบรวมไว้ในถังน้ำสลัดจ์ (Sludge tank) และจะถูกส่งไปแยกน้ำมันโดยเครื่องแยกเหวี่ยงต่อไป (Rupani *et al*., 2010)

<u>การแยกและการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กในน้ำมัน</u>

การทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ในขั้นตอนสุดท้ายโดยใช้วิธีเหวี่ยงแยก เพื่อแยกวัสดุเศษเหลือที่เป็นของแข็งออก โดยในกระบวนการสกัดแบบใช้ไอน้ำจะมีเทคโนโลยีการแยกอยู่สองแบบคือ เครื่องเหวี่ยงแยกแบบแบบ separator (เครื่องเหวี่ยงแยก 2 วัฏภาค ของเหลว/ของแข็ง) และแบบ decanter (เครื่องเหวี่ยงแยก 3 วัฏภาค ของเหลวหนัก/ของเหลวเบา/ของแข็ง) ซึ่งพบว่าเทคโนโลยีโดยใช้ decanter มีประสิทธิภาพดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานที่ใช้การแยกโดย separator (Lam and Lee, 2011) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 โดยจะเห็นว่าการใช้ decanter นอกจากจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแล้วยังมีน้ำเสียออกมาน้อยกว่าด้วย และวิธีการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐานที่ใช้ decanter ในการแยกโดยตรงยังสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเพิ่ม separator ที่มีประสิทธิภาพเข้าไปเพื่อแยกน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจาก decanter ซึ่งสามารถแยกน้ำมันได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 2 กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด (PORIM-Standard sheet, 1998; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยน้ำมันดิบจากถังตกจม (น้ำมันส่วนบน) จะผสมรวมกับน้ำมันที่แยกได้จากน้ำสลัดจ์ และจะเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดน้ำออกจากน้ำมัน (Lam and Lee, 2011)

สำหรับประเทศไทย ปัจจุบันยังมีการใช้เครื่องแยกเหวี่ยงอยู่ทั้ง 2 แบบ ซึ่งการเลือกใช้เทคโนโลยีการแยกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นต่างกันด้วยดังแสดงในตารางที่ 2-1 โดยเครื่อง decanter จะสามารถผลิตเค้กที่ค่อนข้างจะแห้งกว่า และยังสามารถแยกของแข็งที่มีแรงเกาะระหว่างกันสูง วัสดุที่มีลักษณะเป็นเยื่อเมือก และวัสดุที่มีลักษณะเป็นปุยอ่อนนุ่มได้

<u>การกำจัดน้ำออกจากน้ำมัน</u>

แม้ว่าขั้นตอนการแยกหลายขั้นตอนจะลดปริมาณน้ำของน้ำมันปาล์มดิบบ้างแล้ว แต่น้ำมันที่ได้ยังคงมีน้ำอยู่ ซึ่งจะถูกกำจัดออกด้วยการระเหยภายใต้สุญญากาศ น้ำมันปาล์มดิบที่บริสุทธิ์จะเก็บไว้ในถังเก็บจนกว่าจะส่งไปขายยังโรงกลั่นบริสุทธิ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554)

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบการแยกน้ำมันตามวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน โดยใช้เทคโนโลยี การแยกแบบ separator การใช้ decanter และการใช้ decanter ร่วมกับ separator

ปัจจัย	**หน่วย**	**วิธีการสกัด**		
		separator	decanter	decanter และ separator
ประสิทธิภาพการแยก	ร้อยละ	95.3	95.9	97
การสูญเสียน้ำมันระหว่างการแยก	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	7	7	5
การลดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	0	10-20	>20-30
ภาระบรรทุกถังตกจม	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	720	-	-
ภาระบรรทุกเครื่องเหวี่ยงแยกตัวที่ 1	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	820	395	395
ภาระบรรทุกเครื่องเหวี่ยงแยกตัวที่ 2	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	-	-	165
ปริมาตรน้ำเสีย	กิโลกรัมต่อตันทะลายปาล์มสด	892	315	315

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2554)

2.2 น้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2.2.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

แหล่งต่างๆ ที่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีดังนี้

2.2.1.1 น้ำเสียที่เกิดจากการใช้ในกระบวนการสกัด ได้แก่

1) น้ำจากการนึ่งปาล์ม เป็นน้ำเสียจากการอบทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำส่วนนี้แม้จะมีน้ำมันอยู่แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชัน โดยทั่วไปการอบทะลายปาล์ม 25 ตัน จะมีน้ำนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2-3 ลูกบาศก์เมตร (ธนกฤต พรหมทองและคณะ, 2553)

2) น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน น้ำเสียส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุดและเป็นน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยมาก กรณีที่ใช้ decanter ในการแยก น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมันจะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาเฉลี่ยประมาณ 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 ตันทะลายปาล์มสด และในกรณีที่ใช้ separator จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาเฉลี่ยประมาณ 0.65 ลูกบาศก์เมตรต่อ 1 ตันทะลายปาล์มสด (ธีระพงศ์ จันทรนิยม, 2551)

2.2.1.2 น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ

เครื่องมือที่ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง ได้แก่ เครื่องแยกกรวดทราย ต้องทำการล้างทุกครึ่งชั่วโมง ใช้น้ำในการล้างประมาณ 0.05-0.1 ลูกบาศก์เมตร เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งต้องมีการล้างทำความสะอาด ซึ่งจะมีน้ำเสียเกิด ครั้งละ 0.2-0.5 ลูกบาศก์เมตร และเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง ต้องทำการล้างทุก 20-30 นาที ในการล้างจะใช้น้ำครั้งละ 0.05-0.06 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังต้องล้างทำความสะอาดพื้น ถังพัก และภาชนะต่างๆ อีกด้วย

2.2.1.3 น้ำจากการหล่อเย็นหม้อกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย เป็นน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมากและยังสะอาดอยู่ส่วนใหญ่มีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

2.2.1.4 น้ำจากแหล่งอื่นๆ เช่นน้ำจากห้องน้ำในโรงงาน น้ำจากโรงอาหาร เป็นต้น ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 60 ของปริมาณทะลายปาล์ม หรือมีปริมาณน้ำเสีย 2.5-3.5 เท่าของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ (Chavalparit *et al.,* 2006) ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้วิธีการสกัดแบบใช้น้ำจะก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันที่ผลิตได้ (Wu *et al.,* 2010) ซึ่งเป็นน้ำเสียจากหม้อนึ่ง เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน (Separator หรือ Decanter) และเครื่องแยกกรวดทราย ในสัดส่วน 9:15:1 ตามลำดับ (Wu *et al.,* 2010)

2.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

น้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบมาตรฐาน (แบบเปียก) จะมีน้ำทิ้งจากขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิต ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 2-2 และ 2-3 โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.2.1 มีปริมาณสารอินทรีย์ที่สูง โดยปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากน้ำมันเส้นใย และกากเนื้อผลปาล์มที่ปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้ง และสารประกอบอินทรีย์และต่างๆที่แตกตัวออกมาจากผลปาล์มในขั้นตอนการสกัด นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์อาจเกิดจากสารทำความสะอาดจำพวกสบู่ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 10,000-50,000 mg/l และค่าซีโอดีประมาณ 15,000-100,000 mg/l (Chungsiriporn *et al*., 2006)

2.2.2.2 มีสีน้ำตาลเข้มถึงน้ำตาลปนดำ มีพีเอชประมาณ 3-5 (Ahmad *et al.,* 2008)

2.2.2.3 มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในระดับสูง ซึ่งโดยทั่วไปมักมีค่าประมาณ 10,000-80,000 mg/l ส่วนของแข็งแขวนลอยมีประมาณ 50,000-60,000 mg/l ทั้งขึ้นอยู่กับกระบวนการและเทคโนโลยีในการแยก (Wu *et al.,* 2010)

2.2.2.4 มีอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะน้ำทิ้งในบ่อรวบรวมน้ำทิ้งบ่อแรกซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 70-90 °C และจะค่อยๆลดอุณหภูมิลงเมื่อเวลาผ่านไปหรือเมื่อมีการถ่ายเทไปยังบ่ออื่นๆในระบบ (Ahmad *et al.,* 2008)

2.2.2.5 มีสารอนินทรีย์เจือปนอยู่ โดยส่วนใหญ่แล้วได้แก่ โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก โบรอน สังกะสี แมงกานีส และทองแดง เป็นต้น (Sumathi *et al.,* 2008)

2.2.2.6 เกิดน้ำเสียขึ้นในปริมาณมาก (Aghalino, 2000; Wu *et al.,* 2010) ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉลี่ยประมาณ 0.59 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด หรือประมาณ 2.5 ตันต่อตันน้ำมันที่สกัดได้ (Ahmad *et al.,* 2008) ซึ่งคิดมาจากการสำรวจปริมาณน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย โดย PORIM/RMIM ได้ประมาณการน้ำทิ้งซึ่งส่วนใหญ่มาจากหม้อนึ่งฆ่าเชื้อและมีปริมาณ 0.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังมีน้ำทิ้งจากเครื่องแยกกรวดทรายประมาณ 0.1-0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมัน และน้ำทิ้งจากเครื่องเหวี่ยงแยก separator หรือ decanter อีกประมาณ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมัน ดังนั้นน้ำทิ้งรวมจึงมีประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันที่ผลิตได้ (Ahmad *et al.,* 2008) และจากผลการศึกษาของ Kaewmai *et al.,* (2012) พบว่าสำหรับประเทศไทยค่าเฉลี่ยของน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันที่ผลิตได้

ตารางที่ 2-2 ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติน้ำเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของกระบวนการผลิต

Parameter	Condensate	Separation process	Hydrocyclone wastewater
pH	5.0	4.5	-
BOD_5 (mg/L)	23,000	29,000	5,000
COD (mg/L)	47,000	64,000	15,000
Total solids (mg/L)	39,000	87,000	7,100
Suspended solids (mg/L)	5,000	23,000	7,000
Oil and grease (mg/L)	4,000	7,000	1,165
Total nitrogen (mg/L)	500	1,200	-

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rupani *et al*. (2010)

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำทิ้งรวม (POME)

Parameters	Concentration (mg/L)		Element	Concentration (mg/L)[2]
	POME (range)[1]	POME (mean)[1]		
Temperature (°C)	80-90	85	Potassium	2,270
pH	3.4-5.2	4.2	Magnesium	615
Oil and grease (mg/L)	130-18,000	6,000	Calcium	439
BOD_5(mg/L)	10,250-43,750	25,000	Phosphorus	180
COD (mg/L)	15,000-100,000	51,000	Iron	46.5
Total solids (mg/L)	11,500-79,000	40,000	Boron	7.6
Suspended solids (mg/L)	5,000-54,000	18,000	Zinc	2.3
Total nitrogen (mg/L)	180-1,400	34,000	Manganese	2.0
Color (ADMI)	3,260-7,000[4]	6,450[3]	Copper	0.89

ที่มา : ดัดแปลงจาก [1]Malaysian Palm Oil Board (2010), [2]Singh *et al*. (2010), [3]Ratpukdi *et al*. (2012), [4]Neoh *et al.,* (2012)

สำหรับประเทศไทยน้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบมาตรฐาน (แบบเปียก) ที่เข้าสู่บ่อรวบรวมน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม น้ำเสียก่อนเข้าระบบผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียหลังออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ และน้ำเสียในบ่อสุดท้าย มีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม น้ำเสียก่อนเข้าระบบผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียหลังออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ และน้ำเสียในบ่อสุดท้าย

Parameter	Unit	Range	Average
Palm oil mill effluent (POME)	m^3	54,992–337,440	122,386
COD wastewater	(mg/L)	60,764–106,485	76,198
COD inlet to biogas	(mg/L)	52,576–92,516	62,890
COD outlet from biogas	(mg/L)	2,925–26,128	11,188
COD final pond	(mg/L)	181–17,498	3234

หมายเหตุ : เป็นค่าเฉลี่ยของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ จำนวน 14 โรงงาน

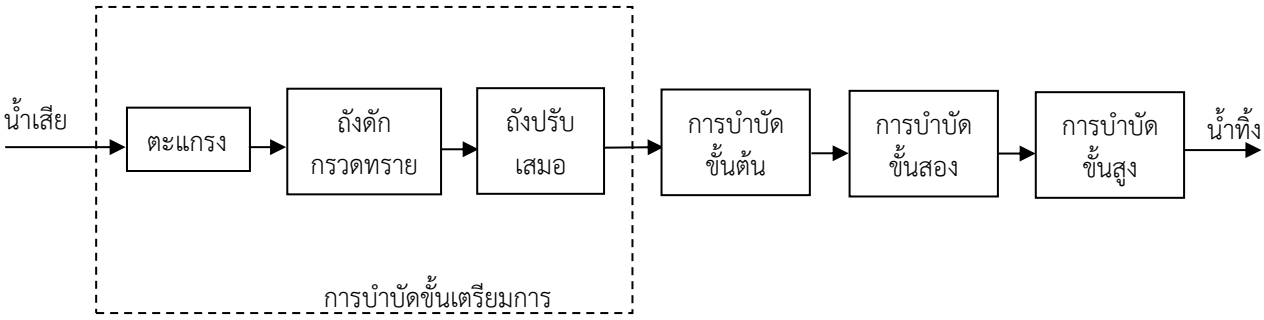
ที่มา : ดัดแปลงจาก Kaewmai *et al.,* (2012)

2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกือบทั้งหมดใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียแบบระบบบ่อรวมน้ำทิ้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) แล้วระบายลงสู่ระบบชุดบ่อไร้อากาศร่วมกับบ่อเติมอากาศและบ่อผึ่ง (Pond system) ต่อเนื่องกัน (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) โดยสามารถแบ่งกระบวนการของระบบบำบัดน้ำเสียออกเป็นระดับต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2-4 ซึ่งได้แก่ การบำบัดขั้นเตรียมการ (Preliminary treatment) การบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) การบำบัดขั้นสอง (Secondary treatment) และการบำบัดขั้นสูง (Advanced treatment) (Yejian *et al.,* 2008) โดยในแต่ละโรงงานไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทุกระดับขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียและคุณภาพของน้ำที่ต้องการหลังผ่านการบำบัด ซึ่งในแต่ละระดับมีจุดประสงค์ในการกำจัดสารมลพิษแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

2.2.3.1 การบำบัดขั้นเตรียมการ (preliminary treatment)

การบำบัดขั้นเตรียมการเป็นกระบวนการขั้นแรกของระบบบำบัดมีจุดประสงค์เพื่อเตรียมน้ำเสียให้มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดในระดับต่อไป เพื่อป้องกันอุปกรณ์เครื่องจักรเสียหายหรือเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบำบัดในขั้นตอนต่อไป การบำบัดขั้นเตรียมการส่วนใหญ่มักเป็นกระบวนการทางกายภาพ เช่น ตะแกรง (screen) ถังดักกรวดทราย (grit chamber) ถังปรับเสมอ (equalizing tank; EQ) มาตรวัดการไหล (flow meter)



ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างแผนภาพการไหลของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
ที่มา : ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ (2546)

2.2.3.2 การบำบัดขั้นต้น (primary treatment)

การบำบัดขั้นต้น หรือการบำบัดขั้นปฐมภูมิมักเป็นขั้นตอนหลังการบำบัดขั้นเตรียมการมีจุดประสงค์หลักเพื่อกำจัดอนุภาคอินทรีย์หรือน้ำมัน/ไขมันก่อนน้ำเสียเข้าการบำบัดขั้นสอง (กระบวนการชีวภาพ) ซึ่งเป็นการลดภาระการบำบัด (หรือลดขนาด) และเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการบำบัดขั้นสอง การบำบัดในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่มักเป็นกระบวนการทางกายภาพ เช่น ถังตกตะกอนขั้นต้น การลอยตัวด้วยอากาศละลาย (dissolve air flotation, DAF) หรือการปล่อยให้เกิดการแยกชั้นตามธรรมชาติแล้วทำการเก็บกวาด เป็นต้น อย่างไรก็ตามการบำบัดขั้นต้นอาจไม่มีความจำเป็นต้องใช้หากน้ำเสียมีสารแขวนลอยและบีโอดีต่ำหรือถ้าการบำบัดขั้นสองมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของแข็งแขวนลอยได้อย่างเพียงพออยู่แล้ว

2.2.3.3 การบำบัดขั้นสอง (secondary treatment)

การบำบัดขั้นสองหรือการบำบัดขั้นทุติยภูมิส่วนใหญ่มีจุดประสงค์หลักเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งเป็น กระบวนการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งปัจจุบันนิยมติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อจัดการกับปัญหาสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในปริมาณสูง และจะนำแก๊สที่ได้มาผลิตไฟฟ้าโดยผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานเองหรือขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็ก

2.2.3.4 การบำบัดขั้นสูง (Advanced or Tertiary treatment)

การบำบัดขั้นสูง หรือ การบำบัดขั้นตติยภูมิ เป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากการบำบัดขั้นสอง เพื่อนำน้ำทิ้งดังกล่าวกลับไปใช้ประโยชน์ต่อไปหรือเพื่อลดผลกระทบต่อแหล่งรับน้ำที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหามลพิษในกรณีที่ต้องการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่น อัลกัลบลูมหรือยูโทรฟิเคชัน เป็นต้น ปัจจุบันสำหรับอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยกำลังให้ความสนใจกับการบำบัดในขั้นสูงเพื่อประโยชน์ในการนำน้ำกลับใช้ใหม่โดยเฉพาะการกรองด้วยเมมเบรน แต่ยังประสบปัญหาเรื่องการอุดตันและการเกิดฟาล์วลิงค์ซึ่งปัญหานี้ต้องอาศัยการศึกษาองค์ประกอบของน้ำเสียที่มีลักษณะดังกล่าวในเชิงลึกเพื่อการแก้ปัญหา

น้ำเสียหลังจากใช้กระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic process) กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic process) และระบบบ่อธรรมชาติ (Natural pond system) ร่วมกัน Yejian *et al.* (2008) ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบดังกล่าวสามารถบำบัดปริมาณสารแขวนลอย น้ำมันและไขมัน ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีลงได้มาก ดังแสดงในตารางที่ 2-5 ซึ่งแสดงให้เห็นการลดลงของความสกปรก แต่ยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2-6 ซึ่งประกาศเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน 2559 โดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้ประกาศกำหนดมาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตอุตสาหกรรม มาตรฐานกลางนี้จะถูกนำมาใช้แทนมาตรฐานการควบคุมน้ำเสียสำหรับโรงงานและนิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539 ซึ่งใช้งานมาเป็นเวลานานกว่า 20 ปี มาตรฐานฉบับใหม่เป็นการร่วมมือกันระหว่างกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษ โดยใช้เวลา 8 ปีในการรวบรวมข้อมูล ซึ่งมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฉบับใหม่ดังกล่าวได้เน้นการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้ทันสมัยกับมาตรฐานการวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการปัจจุบัน โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานเพิ่มจากเดิมจากเดิมเพียงบางค่าเท่านั้น เช่น กำหนดค่ามาตรฐานของสีในน้ำทิ้งที่ 300 ADMI (มาตรฐานเดิมไม่เป็นที่รังเกียจ) กำหนดวิธีการเก็บตัวอย่างเป็นแบบจ้วง สำหรับแหล่งกำเนิดมลพิษทุกประเภท (มาตรฐานเดิมใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบผสมรวมในกรณีน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรม) (ตารางที่ 2-7) และเปิดช่องทางให้มีจากจัดทำมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2-5 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปในแต่ละกระบวนการของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Parameter		จากแต่ละ process					POME		Anaerobic		Final pond
		Condensate		Separate		Hydrocyclone			Influent	Effluent	
		Thailand	Malaysia	Thailand	Malaysia	Malaysia	Thailand	Malaysia	Malaysia	Malaysia	Malaysia
pH	range	4.84-5.35	-	-	-	-	-	3.4-5.2[3]	-		7.0-7.4[5]
	mean	4.89[1]	5.0[2]	4.8[1]	4.5[2]	-	4.6[1]	4.2[3]	6.4[4]	8.2[4]	7.3[5]
Oil&grease (mg/L)	(range)	20.9-1,200	-	-	-	-	-	130-18,000[3]	-		10-430[5]
	(mean)	1,165[1]	4,000[2]	1,130[1]	7,000[2]	1,165[2]	1,165[1]	6,000[3]	11,019[4]	3,856[4]	130[5]
BOD_5 (mg/L)	(range)	22,800-42,000	-	-	-	-	-	10,250-43,750[3]	-		110-1,800[5]
	(mean)	41,986[1]	23,000[2]	68,550[1]	29,000[2]	5,000[2]	60,000[1]	25,000[3]	-	-	610[5]
COD (mg/L)	(range)	35,360-82,000	-	-	-	-	-	15,000-100,000[3]	-		340-19,680[5]
	(mean)	80,146[1]	47,000[2]	105,955[1]	64,000[2]	15,000[2]	80,523[1]	51,000[3]	32,520[4]	1,959[4]	4,820[5]
TS (mg/L)	(range)	26,367-77,000	-	-	-	-	-	11,500-79,000[3]	-		6,090-18,400[5]
	(mean)	76,733[1]	39,000[2]	118,570[1]	87,000[2]	7,100[2]	82,582[1]	40,000[3]	40,427[4]	26,704[4]	10,360[5]
SS (mg/L)	(range)	2,600-6,100	-	-	-	-	-	5,000-54,000[3]	-		760-14,850[5]
	(mean)	3,050[1]	5,000[2]	40,000[1]	23,000[2]	7,000[2]	27,800[1]	18,000[3]	11,780[4]	2,456[4]	4,680[5]
VSS (mg/L)	(range)							9,000-72,000[3]	-		2,680-14,570[5]
	(mean)							34,000[3]	8,758[4]	423[4]	5,000[5]
TDS (mg/L)									17,560[4]	18,381[4]	-
Total nitrogen (mg/L)	(range)	-	-	-	-	-	-	180-1,400[3]			320-1,070[5]
	(mean)	1,353[1]	500[2]	1,413[1]	1,200[2]	-	-	750[3]			520[5]
Tempereture (C^{o})	(range)							80-90[3]			-
	(mean)							85[3]			-
Alkalinity (mg/L)		320[1]			200[1]		180				-
Acidity (mg/L)		7,125[1]			5,355[1]		5,438				-
VFA (mg/L)									1,044	480	-

ที่มา : ดัดแปลงจาก [1]กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2554); [2]Rupani *et al*. (2010); [3]Malaysian Palm Oil Board (2010); [4]Yejian *et al.* (2008); [5]Lam and Lee, 20

ตารางที่ 2-6 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบอุตสาหกรรม

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม		
ดัชนีคุณภาพน้ำ	**ค่ามาตรฐาน**	**วิธีวิเคราะห์**
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5 - 9.0	pH Meter
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids หรือ TDS)	(1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำต้องไม่เกิน 3,000 มก/ล. (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มก/ล. ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
สี (Color)	300 เอดีเอ็มไอ	วิธีเอดีเอ็มไอ (ADMI Method)
Fat, Oil and Grease	ไม่ เกิน 5.0 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่น และตรวจวัดด้วยวิธีเทียบสี (Colorimetric Method)
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่ เกิน 100 มด./ล.	เจลดาห์ล (Kjeldahl)

ที่มา: ดัดแปลงจาก ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. (2539). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153ง. ลงวันที่ 7 มิถุนายน 2560. หน้า 11-15.

ทั้งนี้ ได้มีการระบุไว้ในประกาศว่ามาตรฐานการควบคุมจะมีผลบังคับใช้ในหนึ่งปีหลังจากการตีพิมพ์ (6 มิถุนายน พ.ศ. 2560) การเปลี่ยนแปลงมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับโรงงานที่กำหนดขึ้นภายใต้พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ส่งผลให้จำเป็นต้องปรับปรุงมาตรฐานน้ำทิ้งที่ประกาศภายใต้พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เช่นกัน โดยเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2560 กระทรวงอุตสาหกรรมมีการประกาศกำหนดมาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำจากโรงงาน พ.ศ. 2560 มาตรฐานนี้มีค่าควบคุมพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์เป็นไปตาม ควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตอุตสาหกรรม ที่ประกาศโดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมตามที่กล่าวข้างต้นด้วย

ตารางที่ 2-7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของมาตรฐานน้ำทิ้งในประเทศไทย

พารามิเตอร์	**มาตราฐานเดิม**	**มาตราฐานปัจจุบัน**
สี	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ	300 ADMI
TDS	3,000-5,000 มก./ล. ขึ้นอยู่กับค่า TDS ของแหล่งรับรองน้ำ กำหนดการวิเคราะห์ที่ 103 $^{\circ}$C	3,000 มก./ล. กรณีระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ 5,000 + TDS กรณีระบายลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่า TDS มากกว่า 3,000 มก./ล. โดยกำหนดการวิเคราะห์ที่ 180 $^{\circ}$C
TSS	50-150 มก./ล.	50 มก./ล.
ซัลไฟด์	วิเคราะห์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์	วิเคราะห์ ซัลไฟด์ทั้งหมด
BOD	20 มก./ล. ยกเว้นที่ 60 มก./ล. สำหรับโรงฆ่าสัตว์, แป้ง, สิ่งทอ, โรงงานสารเคมี	20 มก./ล โดยไม่มีข้อยกเว้น
COD	120 มก./ล. การยกเว้นที่ 400 มก./ล. สำหรับโรงงานเครื่องปรุงอาหาร, สิ่งทอ, เยื่อและกระดาษ, หนังสัตว์	120 มก/ล. โดยไม่มีข้อยกเว้น
วิธีการเก็บตัวอย่าง	เก็บตัวอย่างแบบจ้วงสำหรับกรณีที่เป็นโรงงาน และเก็บตัวอย่างแบบผสมรวมกรณีที่เป็นนิคมอุตสาหกรรม	เก็บตัวแบบจ้วงสำหรับทุกกรณี

2.3 องค์ประกอบสารอินทรีย์และสีในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2.3.1 องค์ประกอบในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

จากการรายงานการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบพบว่าสามารถแบ่งได้เป็นสามส่วนหลักคือ น้ำ ของแข็ง และน้ำมัน ซึ่งได้มีการรายงานสัดส่วนขององค์ประกอบไว้ดังแสดงในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 องค์ประกอบทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Parameter (%)	Sutunto et al., 2004	Igwe et al., 2007	Shazvin et al., 2004 Silapakal et al., 2005 Foo and Hameed, 2010
Water	95	93-95	95-96
Total Solid	not measured	3-4	4-5
Suspended Solid	2	not measured	not measured
Dissolved Solid	2	not measured	not measured
Oil	1	0.5-2	0.6-0.7

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มไม่มีการเติมสารเคมีอื่นใดนอกจากน้ำ ดังนั้นสีน้ำตาลของน้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างของสารอินทรีย์ต่างๆ ในผลปาล์ม อันเนื่องจากการให้ความร้อนในขั้นตอนการนึ่งปาล์มและการแตกตัวขององค์ประกอบจากขั้นตอนการหีบอัด (Rakamthong and Prasertsan, 2011)

2.3.2 รายงานการพบสารอินทรย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ในรูปของ บีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมัน ในปริมาณสูง ดังแสดงตารางที่ 2-5 และยังพบว่าน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ เช่น แอนโทไซยานิน แคโรทีน ลิกนิน แทนนิน และโพลีฟีนอลอื่นๆ ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ทำให้น้ำเสียมีสีน้ำตาลเข้มถึงน้ำตาลปนดำ (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์และคณะ, 2544) โดยสารอินทรีย์และรงควัตถุที่มีอยู่ในผลปาล์มถูกจะสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ เนื่องจากเซลล์ของผลปาล์มถูกทำลาย (Hartley, 2000) ทั้งนี้ฟีนอลและสารที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอลเป็นสารที่พบเป็นองค์ประกอบอยู่ในผลปาล์มปริมาณ 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อกรัมผลปาล์ม (Sundram *et al.,* 2003) นอกจากนี้นยังพบการปนเปื้อนของฟีนอลในน้ำทิ้ง

จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มความเข้มข้นแตกต่างกันตั้งแต่ 5 ถึงมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ธรรมศักดิ์ศรี สุขใส, 2547; Alam *et* al., 2009; Cordova-Rosa *et* al., 2009)

เมื่อผ่านกระบวนการนึ่งฆ่าเชื้อผลปาล์มที่ใช้ความร้อนและความดันสูง จะเกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase เป็นผลให้ฟีนอลไม่ถูกย่อยสลายปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (Sundram et al., 2003) และในกระบวนการย่อยสลายลิกนินผ่านกระบวนการ wet oxidation ไปเป็นแทนนินยังได้ฟีนอลเป็นสารตัวกลาง (Kongjan *et al.,* 2010; Alam *et al.,* 2009) นอกจากนี้ในองค์ประกอบของน้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มยังพบสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ แป้ง น้ำตาล เพคติน และเพนโตแซน รวมทั้งโปรตีนทั้งในส่วนน้ำทิ้งและสลัดจ์ด้วย (Barker and Worgan, 1981)

2.3.3 สีของเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

สีของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนหนึ่งอาจเกิดจากสารประกอบพวกเมลานอยดิน (Sundram *et al.,* 2003) จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาล และกรดอะมิโน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยอาจเกิดสารประกอบพวกเมลานอยดิน ก่อนการแยกสลัดจ์ออกจากน้ำทิ้งด้วยเช่นกัน (Rupani *et al*., 2010) นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่ามีสิ่งแปลกปลอมในน้ำทิ้งที่ทำให้เกิดสีอีกอย่างหนึ่งคือสารประกอบพวกกัม (Gum) ซึ่งเมื่อกัมโดนความร้อนในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจะทำให้เกิดสีน้ำตาลคล้ำขึ้น และกัมสามารถรวมตัวกับเกลือของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และทองแดง ทำให้เกิดความคงตัวของสีและสารพวกออกซิเดทีฟได้ด้วย (โสภา จันทภาโส, 2542)

สีของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบนั้นเกิดจากจากการปนเปื้อนของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์และทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สีในน้ำอาจจะเป็นผลมาจากน้ำนั้นมีอิออนของโลหะในธรรมชาติ เช่น เหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น ฮิวมัส แพลงค์ตอน วัชพืชและสารปนเปื้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต สีสามารถถูกกำจัดเพื่อทำให้น้ำเหมาะกับการใช้โดยทั่วไปและการใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ ถ้าปรากฏว่าน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีสีซึ่งเป็นที่น่ารังเกียจโรงงานอุตสาหกรรมนั้นต้องกำจัดสีของน้ำให้เป็นไปตามที่กำหนดก่อนที่จะระบายออกนอกโรงงานลงสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้ง

2.3.4 ผลกระทบของน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และสีต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มโดยเฉพาะกระบวนการผลิตแบบมาตรฐาน (หีบเปียก) จะก่อให้เกิดน้ำเสียรวมในปริมาณมาก ซึ่งพบว่ามีปริมาณของสารอินทรีย์รวมทั้งแร่ธาตุต่างๆสูง ทำให้ค่าซีโอดี บีโอดี ของแข็งทั้งหมดและสี สูงด้วย จึงเป็นแหล่งที่จะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (Lam and Lee, 2011) เนื่องจากลักษณะของน้ำทิ้งแม้ว่าจะผ่านการบำบัดแล้วก็ยังมีค่าความสกปรกเกินกว่ามาตฐานและมีสีค่อนข้างไปทางสีน้ำตาลเข้มถึงดำ จนไม่สามารถปล่อยทิ้งหรือนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ ซึ่งเมื่อมีการปนเปื้อนของสีในน้ำทิ้งแล้วเป็นเรื่องค่อนข้างยากอย่างมากในการแยกสีออกมาให้หมดได้ ผลกระทบของน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสี ได้แก่

2.3.4.1 ผลต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

หากมีการปนเปื้อนของสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ สีจะเป็นตัวกั้นหรือขัดขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงใต้น้ำ ทำให้เกิดการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ในแหล่งน้ำได้น้อยลง มีผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลง (Zhou *et al*., 2008; Wang, 2009) และสีที่เกิดขึ้นในน้ำเป็นสิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดีของแหล่งน้ำ เกิดความไม่น่าดูและเป็นที่พึงรังเกียจซึ่งสีส่วนใหญ่แล้วเกิดจากสารอินทรีย์ชนิดที่สามารถละลายได้ในน้ำและพวกคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งหากมีการรั่วไหลหรือมีการปล่อยทิ้งโดยไม่ผ่านการบำบัดก็จะทำให้แหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์เหล่านั้น ซึ่งจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำขนาดเล็ก (Jamal *et al.,* 2011; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) และในระยะยาวอาจเกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้ โดย Spandre และ Dellomonaco (1996) ได้ทำการการติดตามสารปนเปื้อนจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปสารโพลีฟีนอลจะเกิดการปนเปื้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากการซึมของน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ดังนั้นการนำน้ำใต้ดินที่เกิดการปนเปื้อนมาใช้โดยตรงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้เช่นกัน (ธนกฤต พรหมทอง และคณะ, 2553)

2.3.4.2 ผลกระทบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพของดิน

จากรายงานการศึกษาการใช้ระบบบ่อผึ่งในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกเป็นเวลานาน พบว่าจะทำให้ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้น (Bene *et al.,* 2012) รวมทั้งทำให้โครงสร้างของดินไม่ดี มีผลทำให้น้ำซึมผ่านได้ช้าลง (Spandre and Dellomonaco, 1996; Bene *et al.,* 2012) และทำให้การถ่ายเทอากาศลดลงอีกด้วย (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

2.3.4.3 เป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity)

การนำน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมเช่น สวนปาล์มหรือสวนยาง พบว่าธาตุอาหารในน้ำเสียสามารถใช้เป็นปุ๋ยให้กับดินได้ แต่ต้องใช้ในปริมาณที่ควบคุมไว้ไม่เกิน 180 ลูกบาศก์เมตรต่อ 6.25 ไร่ต่อปี (Sumathi *et al*., 2008) แต่ถ้าหากมีปริมาณเกินกว่าที่กำหนดจะทำให้มีผลกระทบต่อการดูดซึมอาหารของพืช อาจทำให้ ใบไหม้ บิด หงิกงอ หรืออาจทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต เนื่องจากสารตกค้างในดินบางชนิดมีฤทธิ์ทำให้พืชลดการดูดน้ำ และยับยั้งการดูดใช้โพแทสเซียมและแคลเซียมซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงของพืชลดลงด้วย (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

2.3.4.4 ต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antibacterial activity)

สารบางชนิดเช่น แทนนิน และสารประกอบฟีนอล มีฤทธิ์ทำให้สมบัติของผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เปลี่ยนไปทำให้จุลินทรีย์ชะงักการเจริญเติบโตและตายในที่สุด หรือทำให้ประสิทธิภาพของเอนไซม์ที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์เสียไป จุลินทรีย์จึงไม่เจริญเติบโตและอาจตายได้

(Kaur *et al.,* 2008) รวมทั้งการมีผลต่อกลไกทางพันธุกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์หยุดชะงักแบ่งการเซลล์ จุลินทรีย์จึงไม่เพิ่มปริมาณและจุลินทรีย์ที่มีอยู่อาจตาย จึงทำให้มีจำนวนจุลินทรีย์ลดลง (Ekwenye and Ijeomah, 2005)

2.3.4.5 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์

สารฟีนอลเมื่อสัมผัสผิวหนังของมนุษย์ จะถูกดูดซึมได้อย่างรวดเร็ว หากสัมผัสร่างกายจะเกิดการกัดกร่อนเนื้อเยื่ออย่างรุนแรง และเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะมีผลต่อตับ ไต ปอด และระบบเลือด อาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ (Busca et al., 2008) หากมนุษย์กลืนกินฟีนอล 1 กรัม ทำให้เสียชีวิตได้ (Seetharam and Saville, 2003) ถ้าบริโภคฟีนอลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานที่ระดับความเข้มข้นฟีนอลระหว่าง 10 และ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจทำให้ท้องเสีย ปัสสาวะมีสีเข้ม (Barker *et* al., 1978) ทั้งนี้ฟีนอลยังมีผลต่อระบบประสาท และอวัยวะสำคัญ เช่น ม้าม ตับอ่อน และไต (Manahan, 1994)

โพลีฟีนอลกลุ่มฟลาโวนอยด์ จัดเป็นโภชนะเภสัช (nutraceutical) มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยทำหน้าที่ในการหน่วงเหนี่ยว หรือเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงช่วยหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระได้ เป็นสารที่สามารถจับตัวกับโลหะ ทำปฏิกิริยากับเหล็ก เกิดสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ยับยั้งการดูดซึมของเหล็กในลำไส้ได้ สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ อื่นๆ เช่น แคทีชิน มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของ amylase ซึ่งเป็นเอนไซม์ย่อยแป้งทั้งในน้ำลายและลำไส้ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือ แป้งจะถูกย่อยช้าลง ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในเลือดเป็นไปอย่างช้าๆ นอกจากนั้นยังลดการดูดซึมของกลูโคสที่ลำไส้ (Deng and Tao, 1998; Gomes et al, 1995) สามารถฆ่า spores ของ Clostridium botulinum ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอาหารเป็นพิษ และยังสามารถฆ่าแบคทีเรียที่ทนความร้อน เช่น *Bacillus subtilis B.cereus Vibrio parahaemolyticus* และ *C.perfringens* (Chou et al, 1999) ได้อีกด้วย สำหรับสารไอโซฟลาโวน (isoflavone) เช่น สาร เดดซีน (daidzein) จีนิสทีน (genistein) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ เป็นสารไฟโตเคมิคัลที่มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพ เป็นสารโภชนะเภสัชมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และเป็นไฟโตอิสโทรเจน (phytoestrogen) ซึ่งทำงานคล้ายกับฮอร์โมนเพศหญิง

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ในร่างกายมนุษย์และสัตว์ สามารถดูดซับน้ำดีได้ดี และอาจมีผลชะลอการดูดซึมสารอาหารบางชนิดในลำไส้เล็ก ลิกนินจึงทำให้การย่อยได้ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณลิกนินจึงมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพของพืชอาหารสัตว์ ที่ใช้สำหรับเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง ม้า และกระต่าย เป็นต้นสำหรับแทนนิน ผลที่เห็นได้อย่างเด่นชัด คือทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์ลดลงเนื่องจากาแทนนินมีผลทำให้เมือกหล่อลื่นลำไส้ลดลง ทำให้การขับถ่ายพวกธาตุที่มีประจุบวกผิดปกติ การขับถ่ายโปรตีนและ

กรดอะมิโนมากกว่าปกติ ทำให้การเจริญเติบโตผิดปกติอีกด้วย นอกจากนั้นยังสามารถตกตะกอนกับโลหะหนักพวก lead acetate, zinc acetate, potassium dichromate และ ferric chloride ดังนั้นแทนนินจึงจัดเป็นสารขัดขวางทางโภชนาการชนิดหนึ่ง

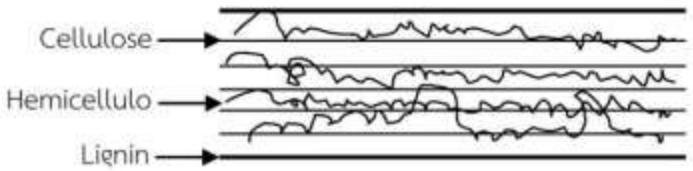
เบต้าแคโรทีนเป็นรงควัตถุที่มีสีส้ม สีเหลือง จัดเป็นแคโรทีนอยด์พวกที่เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ เพราะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นเรตินอลได้ในทางเดินอาหาร มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ หรับผลข้างเคียงที่อาจเป็นผลเสียต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์จากเบตาแคโรทีนและแอนโทไซยานิน ขณะนี้ยังไม่พบการรายงาน

อย่างไรก็ตามแม้จะมีรายงานการพบองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์หลากหลายชนิดแต่ก็ยังไม่สามารถระบุปริมาณหรือสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านั้นได้อย่างชัดเจนเนื่องจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกือบทั้งหมดใช้ระบบรวบรวมน้ำเสียแบบ combined system ทำให้ยากต่อการระบุสัดส่วนขององค์ประกอบในน้ำเสียเนื่องจากน้ำเสียอาจมีความเข้มข้นที่ไม่คงที่

การทราบถึงปริมาณขององค์ประกอบต่างๆหรือสัดส่วนของสารที่ปนเปื้อนในน้ำเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม และเป็นประโยชน์ในการหาแนวทางในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ หรือการเก็บเกี่ยวผลพลอยได้ที่มีอยู่หรือเกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ทั้งนี้จะต้องมีความเหมาะสมทั้งในด้านปริมาณเศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม ซึ่งนอกจากจะช่วยลดความสกปรกให้น้อยลงแล้ว ยังสามารถเพิ่มประโยชน์ทางการค้า และเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

2.4 ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose)

ลิกโนเซลลูโลสที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกิดจากการแตกตัวออกจากผลปาล์มดิบในขั้นตอนของการหีบสกัดน้ำมันปาล์ม เศษเส้นใยลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 โดยเซลลูโลสเป็นสายโพลีแซคคาไรด์ ของน้ำตาล D-glucose เชื่อมต่อด้วยพันธะ β-1,4 glycosidic ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย ส่วนเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิแซคคาไรด์ประกอบด้วย น้ำตาลหลายชนิดเชื่อมต่อกันเป็นโซ่สาขา ได้แก่ น้ำตาลเฮกโซส (กลูโคส กาแลคโตส และแมนโนส)

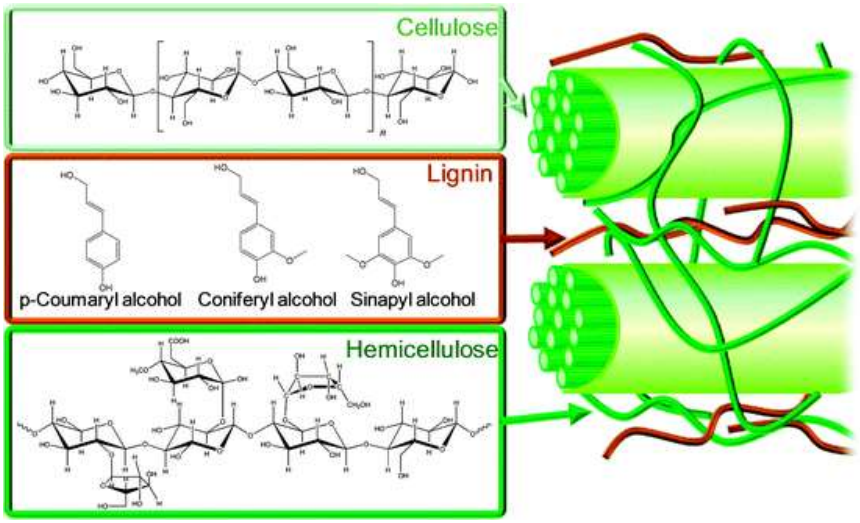


ภาพที่ 2-5 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส

ที่มา : ดัดแปลงจากสุภาวดี ผลประเสริฐ (2557)

สำหรับลิกนินเป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) มากกว่า 10,000 หน่วย และเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกันซึ่งทนต่อการย่อยสลายมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพก่อนนำไปใช้

การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อแตกลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (cellulose crystallinity) กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ



ภาพที่ 2-6 พันธะต่างๆของ hemicellulose และ cellulose
ที่มา : ดัดแปลงจาก Chaiprapat a Laklam, (2011)

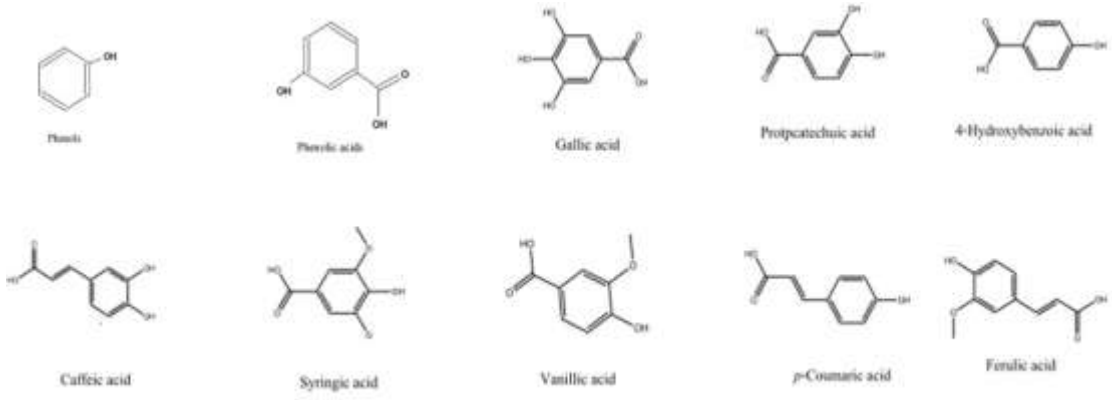
2.5 สารประกอบฟีนอล (Phenols)

สารประกอบฟีนอล เป็นสารที่พบตามธรรมชาติในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร ธัญพืช เป็นต้น สารประกอบฟีนอลที่พบในพืชมักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) น้ำตาลชนิดที่พบมากที่สุดในโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล คือ น้ำตาลกลูโคส (glucose) และพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์ (organic acid) รวมอยู่ในโมเลกุล

ของโปรตีน แอลคาลอยด์ (alkaloid) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoid) เป็นต้น แหล่งที่พบสารประกอบฟีนอล พบอยู่ในส่วนของช่องว่างภายในเซลล์ (cell vacuole) ในส่วนต่างๆ ของพืช เป็นสารที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในกระบวนการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด สามารถละลายได้ในน้ำ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซิน มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่ออยู่เป็นโครงสร้างพื้นฐาน สารประกอบฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด และมีลักษณะสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ แบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลักคือ

2.5.1 สารประกอบฟีนอลพื้นฐาน

เป็นสารประกอบฟีนอลที่โมเลกุลประกอบด้วย วงแหวนเบนซิน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่หรือมากกว่า หรือสร้างพันธะกับหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH group) เช่น สารฟีนอล (phenols) กรดฟีนอลิก (phenolic acids) กรดแกลลิก (galloc acid) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2-7



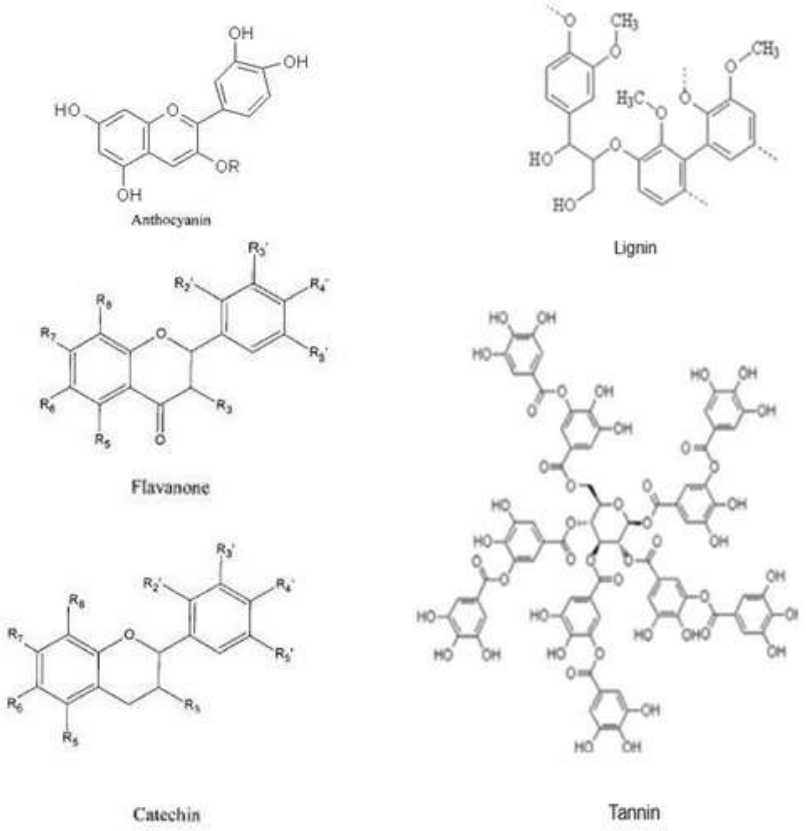
ภาพที่ 2-7 สารประกอบพีนอลพื้นฐาน

ฟีนอลมีสูตรเคมี C_6H_5OH เป็นสารกึ่งของแข็งที่ปราศจากสี มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว เมื่อละลายน้ำแล้วมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน อาจเรียกว่า กรดคาร์บอลิก มวลโมเลกุลเท่ากับ 94.11 กรัม/โมล จุดเดือด 40.9 °C จุดหลอมเหลว 181.75 °C สามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอร์ คาร์บอนเตทตระคลอไรด์ และอะซิติคเอซิด เป็นต้น

2.5.2 โพลีฟีนอล

เป็นสารประกอบฟีนอลที่โมเลกุลประกอบด้วย วงแหวนเบนซินตั้งแต่ 2 วง สร้างพันธะกันโดยอาจจมีหมู่เคมีอื่นๆ มาแทนที่ในวงแหวนเบนซิน พอลิฟีนอลเป็นสารพฤกษเคมี (Phytochemical) ที่สังเคราะห์โดยพืช มีโครงสร้างโมมเลกุลที่ซับซ้อนเกาะเกี่ยวกันจนเป็นพอลิเมอร์

ขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ฟลาโวนอย์ด (Flavonoid) แอนโทไซยานิน (anthocyaanins) ลิกนิน (Lignin) และแทนนิน (Tannin) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2-8 โพลีฟีนอลเป็นสารจับโลหะ (Chelating agent) สามารถทำปฏิกิริยากับเหล็ก เกิดสารประกอบที่ไม่ละลายในน้ำได้



ภาพที่ 2-8 สารประกอบโพลีฟีนอล

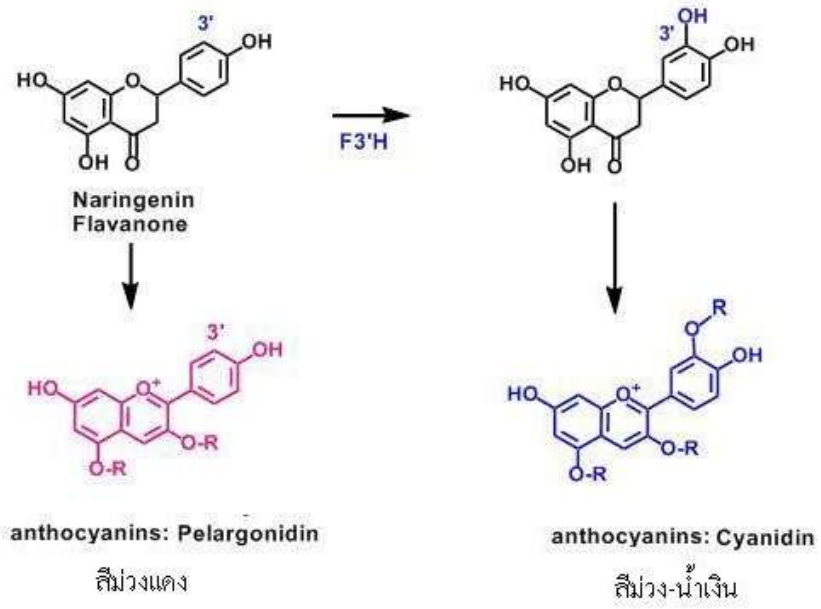
ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) เป็นสารประกอบฟีนอลประเภทพอลิฟีนอล มีโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลประกอบด้วยวงเบนซีน 2 วงเชื่อมกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม เป็น C_6 C_3 C_6 สามารถละลายในน้ำได้ ส่วนใหญ่มักพบอยู่รวมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) ได้แก่

ฟลาวาโนน (flavanones) ฟลาวาโนนมีโครงสร้างแบบคีโทนอยู่ในโมเลกุล

ฟลาวาน (flavans) ฟลาวานจะมีโครงสร้างแบบแอลดีไฮด์หรือแอลกอฮอล์

แคทีชิน (catechins) เป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ที่เป็นสาร Chelating agent สามารถรวมตัวกับไอออนของโลหะหนักได้ เป็นสารไม่มีสี ละลายได้ในน้ำ ให้รสขมฝาด และลดการเกิด Peroxidation ของไขมัน

แอนโทไซยานิน (anthocyaanins) เป็นรงควัตถุหรือสารสี (pigment) ที่ให้สีแดง ม่วง และน้ำเงิน ใช้เป็นสารให้สีธรรมชาติในอาหาร ละลายได้ดีในน้ำ ไม่เสถียร มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 445-2,000 กรัม/โมล สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสง เมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป สีจะเปลี่ยนไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อสีของแอนโทไซยานิน คือ ความเป็นกรดเป็นด่าง ในสภาพที่เป็นกรดมีค่า pH ต่ำกว่า 3 (เป็นกรดสูง) จะทำให้แอนโทไซยานินมีสีแดง ในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกลาง หรือมีค่า pH ประมาณ 7-8 แอนโทไซยานินจะมีสีม่วง และเมื่อสภาพเป็นเบสหรือมีค่า pH มากกว่า 11 (เป็นเบสสูง) แอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แสดงดังภาพที่ 2-9 และเนื่องจากหมู่สารที่แทนที่ในโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้มีการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันไป เช่น เมื่อโมเลกุลของน้ำตาลที่มาเกาะที่คาร์บอน ถูกไฮโดรไลซ์ จะเหลืออะไกลโคน (aglycone) หรือที่เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidines) ให้สีม่วง-น้ำเงิน (Lee *et. al.,* 2008) แอนโทไซยานินละลายน้ำได้ดีมาก แต่จะถูกทำลายได้ง่ายโดยความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีออกซิเจนอยู่ด้วย ความร้อนจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็น chalcone (ไม่มีสี) หรือแตกไปเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้สีซีดลง และบางกรณีจะพบมีสีน้ำตาลเนื่องจากเกิดสารพอลิเมอร์ ซึ่งระดับการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดของแอนโทไซยานินและระดับอุณหภูมิ ออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพันธะคู่ที่มีในโมเลกุลทำให้เกิดสีน้ำตาล ส่วนแสงหรือรังสีอื่นๆนั้นทำให้สีของ แอนโทไซยานินมีสีจางลง นอกจานี้แอนโทไซยานินจะมีสีจางลงเมื่อมีสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมด้วย แอนโทไซยานินสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็ก ทำให้เกิดการรั่วแบบรูเข็ม (pin holing) ได้ สารสกัดแอนโทไซยานิน นอกจากจะมีสมบัติเป็นโภชนะเภสัชแล้วยังช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) อีโคไล (*Escherichia coli*) อีกด้วย



ภาพที่ 2-9 สีของแอนโทไซยานิน

แทนนินเป็นสารประกอบโพลีฟีนอลชนิดหนึ่งที่ละลายน้ำ (Water-soluble phenolics) ที่มีหมู่ hydroxyl จำนวนมาก มีโมเลกุลใหญ่และโครงสร้างซับซ้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-5,000 Dalton (Jackson *et al.,* 1996) มีคุณสมบัติเป็น alkaloid gelatin มีสถานะเป็นกรดอ่อน (สรศักดิ์ เหลี่ยวไชยพันธุ์, 2531) แทนนินเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง เพราะสามารถรวมกับโปรตีนหรือพอลิเมอร์อื่น เช่น พอลิแซคคาไรด์ได้ ทำให้แทนนินมีโครงสร้างของสาร 2 ชนิด ที่ต่างกันคือ ชนิดแรกเป็นกลูโคแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ส่วนชนิดที่สองเป็นโมเลกุลของกลูโคส ต่อกับสารฟีนอล

ลิกนิน (Lignin) เป็น complex phenolic polymer ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง เป็นตัวเชื่อมขวาง (crosslink) อยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ไม่ให้พลังงาน เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย พบมากในผลสุกมากกว่าผลดิบ โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโซ่โมเลกุลของออกซิจิเนตเตตฟีนิลโพรเพน มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 ดาลตัน ไม่สลายทั้งในกรดและด่างแก่

2.5.3 สารฮิวมิค (Humic substsnces)

สสารฮิวมิคประกอบด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์ประเภทที่มีมวลโมเลกุลสูงหรือค่อนข้างสูง โครงสร้างโมเลกุลของสารฮิวมิคเป็นแบบอสัณฐาน ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน มีหลายสีเช่น สีเหลือง สี

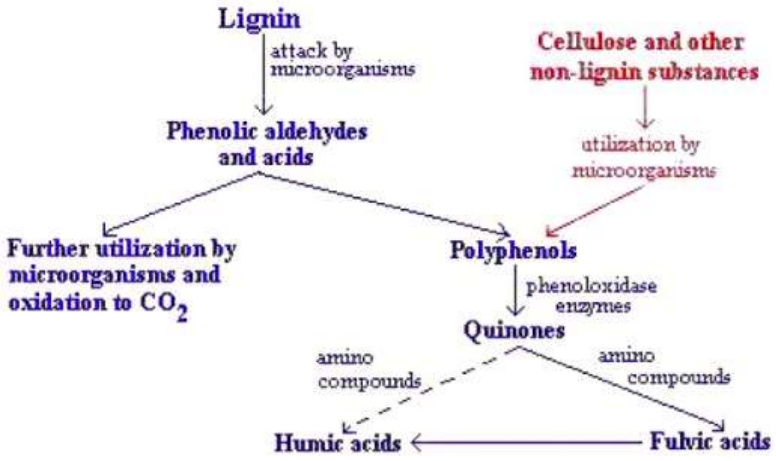
น้ำตาล จนถึงน้ำตาลดำ แสดงสมบัติเป็นสารคอลลอยด์ โดยมีอนภาคขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ประมาณ 3-10 นาโนเมตร สารฮิวมิคละลายน้ำได้น้อย บางส่วนละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดและด่าง สสารฮิวมิคเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพของพืชที่ตายแล้ว เช่น ลิกนิน จากจุลินทรีย์ สสารฮิวมิคจะยากต่อการที่จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพต่อไป สสารฮิวมิคสามารถจะเป็นได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ กรดฮิวมิค กรดฟูลวิค และฮิวมิน กรดฮิวมิคและฟูลวิคสกัดได้เป็นของเหลวในรูปสารแขวนลอย กรดฮิวมิคจะตกตะกอนจากสารแขวนลอยนี้โดยการปรับค่าพีเอชให้เป็น 1 ด้วยการใช้กรดเกลือ ส่วนกรดฟูลวิคจะยังคงแขวนลอยอยู่

กรดฮิวมิค (Humic acid) เป็นส่วนประกอบหลักของสสารฮิวมิค เกิดขึ้นโดยกระบวนการย่อยสลายในทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่ตายลง กรดฮิวมิคไม่ใช่กรดเดี่ยวๆ แต่เป็นการผสมของกรดหลายๆ ชนิดที่อยู่ในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และฟีนอล (phenol) กรดฮิวมิคสามารถจะจับตัวกับไอออนที่พบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมมาเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination complex) โดยโมเลกุลจะประกอบด้วย อะตอมกลาง (central atom) (โดยปกติแล้วจะเป็นอะตอมของธาตุโลหะ) สร้างพันธะเชื่อมต่อกับอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมรอบๆ แต่ละอะตอมหรือกลุ่มอะตอมดังกล่าวที่สร้างพันธะกับอะตอมกลางเรียกว่า ลิแกนด์ (ligand) เป็นกลุ่มที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าฟลูวิค คือ ประมาณ 10,000-100,000 ดาลตัน หรือมากกว่า

กรดฟูลวิค (Fulvic Acid) สามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่างเจือจาง เป็นส่วนที่ไม่ตกตะกอนจากการสกัดด้วนสารละลายด่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วทำให้ (กรดฮิวมิค) ตกตะกอน กรดฟลูวิคเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ประเภทที่มีมวลโมเลกุลต่ำถึงค่อนข้างต่ำ โดยเฉลี่ยมักอยู่ในช่วง 500-20,000 ดาลตัน

ฮิวมิน (Humin) คือ สสารฮิวมิคซึ่งไม่สามารถสกัดได้ด้วยสารละลายด่างเจือจาง และกรด มีสีคล้ำดำหรือน้ำตาลเข้ม สำหรับฮิวมีนนั้นในปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่เป็นพวกกรดฮิวมิคที่มีมวลโมเลกุลสูง ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ รวมทั้งมีหมู่ฟังก์ชันนัล (Functional group) ในโมเลกุลของสารทั้งสองใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการศึกษาสำหรับฮิวมีนถือว่ามสมบัติใกล้เคียงไป ทางกรดฮิวมิค

การแปรสภาพของสารอินทรีย์ไปเป็นสารฮิวมิคเป็นกระบวนการที่มีหลายขั้นตอน รวมกันและมีการเกิดได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สภาพแวดล้อม และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ 4 ขั้นตอนดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 กระบวนการเกิดฮิวมิค
ที่มา : ดัดแปลงจาก Stevenson, 1982

ขั้นตอนที่ 1 เกิดจากลิกนิน ซึ่งถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ โดยจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างของหมู่เมทอกซิล (–COH_3 group) เป็นออโท–ไฮดรอกซีฟีนอล (o–Hydroxy phenols) ไดเป็นโพลีฟีนอล (Polyphenol) และเปลี่ยนต่อเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก (–COOH group) หลังจากนั้นจึงรวมกับโปรตีนให้กรดฮิวมิค

ขั้นตอนที่ 2 ลิกนินสลายตัวเป็นควิโนน (Quinone) แล้วจึงรวมกับโปรตีนให้กรดฮิวมิค

ขั้นตอนที่ 3 เซลลูโลสซึ่งสลายตัวเช่นเดียวกับกระบวนการที่ 2 เป็นควิโนน แล้วจึงรวมกับโปรตีนใหกรดฮิวมิค

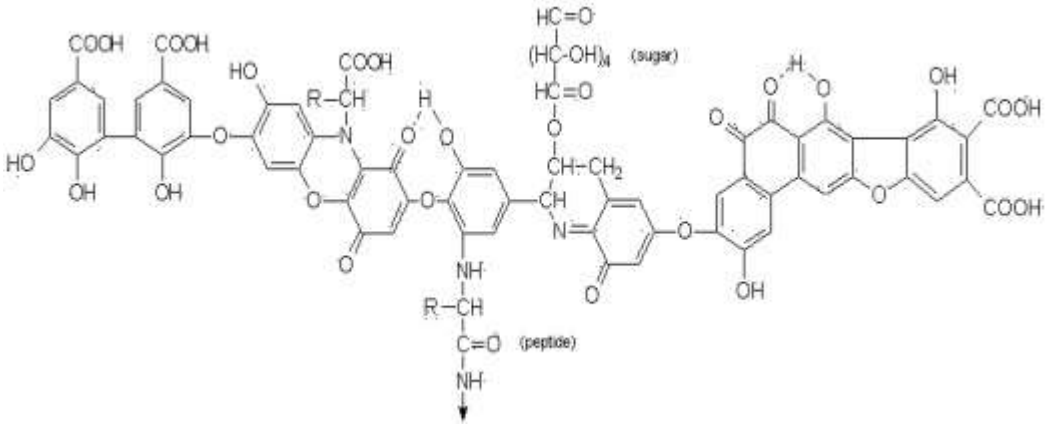
ขั้นตอนที่ 4 เกิดจากน้ำตาลรวมกบโปรตีนให้กรดฮิวมิค

สารฮิวมิคซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดฮิวมิคและกรดฟลูวิค มีคาร์บอน (C) และ ออกซิเจน (O) เป็นธาตุองค์ประกอบรวมกันถึงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนอื่นๆ 10 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และธาตุอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-7 เมื่อเปรียบเทียบกับกรดฟูลวิค โดยทั่วไปพบว่ากรดฮิวมิคมีองค์ประกอบของคาร์บอน มากกว่า แต่ปริมาณของออกซิเจน มีแนวโน้มน้อยกว่า สูตรเอมพิลิกัล (Empirical formula) โดยเฉลี่ยของกรดฮิวมิคและฟลูวิคอาจเขียนได้เป็น $C_{10}H_{12}O_5N$ และ $C_{12}H_{12}O_9N$ ตามลำดับ (ไม่รวมซัลเฟอร์) โดยอัตราส่วนของ คาร์บอน:ไนโตรเจน (C:N) จะอยู่ในช่วง 10-12 : 1

ตารางที่ 2-9 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฮิวมิค

ธาตุ	ปริมาณ (เปอร์เซนต์	
	กรดฮิวมิค	กรดฟลูวิค
C	53.8 – 58.7	40.7 – 50.6
O	32.8 – 38.3	39.7 – 49.8
H	3.2 – 6.2	3.8 – 7.0
N	0.8 – 4.3	0.9 – 3.3
S	0.1 – 1.5	0.1 – 3.6

โมเลกุลของสารฮิวมิคสลับซับซ้อนมาก โครงสร้างไม่เป็นผลึกและไม่มีรูปแบบที่ แน่นอน (Amorphous) อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1982 Stevenson ได้แสดงลักษณะที่สำคัญของกรดฮิวมิคไว้ค่อนข้างจะครบถ้วนโดยที่ โครงสร้างประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันนัลฟีนอลิก (–OH) ทั้งที่เป็นอิสระและที่ทำพันธะไฮโดรเจน (H–bond) กับหน่วยอื่น โครงสร้างของควิโนน พันธะซึ่งเชื่อมโยงด้วยไนโตรเจนและออกซิเจน รวมทั้งหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีอยู่ทั่วไปของอโรเมติกพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างแบบจำลองของฮิวมิค

ที่มา : ดัดแปลงจาก Stevenson, 1982

2.3.5 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกสามารถทำได้หลายวิธีและสามารถประยุกต์ใช้กับตัวอย่างได้หลากหลาย ดังนี้

1) การวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีโนลิกทั้งหมด โดยใช้ วิธี Folin-Ciocalteu colorimetric

วิธีการของ Ergul et al. (2011) โดยนำตัวอย่างส่วนใสมา 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ลงไป 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2 CO_3$) เข้มข้นร้อยละ 7.5 โดยมวลต่อปริมาตร ลงไป 2 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดด้วย พาราฟิลม์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิค (Gallic acid) รายงานผลเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมกรดแกลลิค (mg/g Gallic acid equivalent, GAE)

วิธีของ Inglett et al. (2011) นำสารตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาผสมกับ สารละลาย Folin-Ciocalteau reagent (1:1) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลาย $NaCO_3$ เข้มข้น 20% (w/v) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 2 ชม. ในที่มืด วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารผสมที่ 765 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตโฟโตมิเตอร์ หาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน ของ Gallic acid และคำนวณเป็น mg GE/g dry sample

2) วิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-Aminoantipyrine, 4-AAP method)

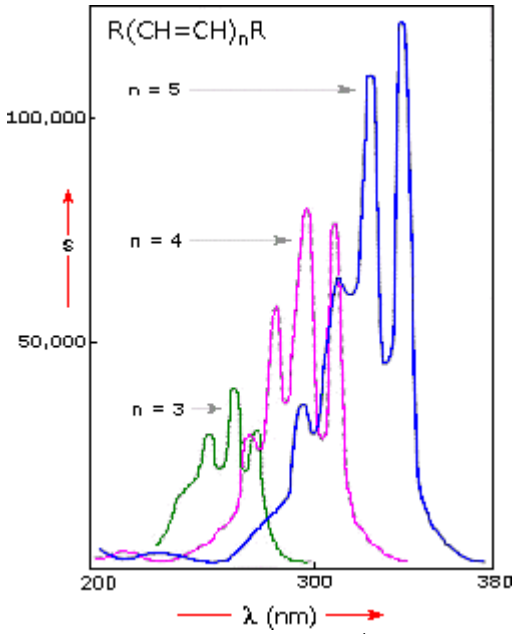
วิธีนี้อาศัยหลักการเกิดสีของแอนติไพรีน (Antipyrine dye) โดยให้สารละลายตัวอย่างฟีนอลทำปฏิกิริยากับ 4-AAP ในสารละลายที่มีตัวออกซิไดซเปนเบส (Alkaline oxidizing agent) เชน โพแทสเซียมเฟอรโร ไซยาไนด (Potassium ferrocyanide) ซึ่ง 4-AAP นี้จะทำปฏิกิริยาที่เฉพาะเจาะจงกับฟนอล แล้วเกิดสีของแอนติไพรีน (Antipyrine dye) หลังจากนั้นสกัดสีด้วยคลอโรฟอรม (Chloroform) วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ซึ่งวิธี 4 อะมิโนแอนติไพรีน เป็นวิธีการที่แนะนำโดย APHA AWWA and WEF (2012) โดยใช้สารฟีนอลเป็นสารมาตรฐาน หน่วยที่ใช้วิเคราะห์ คือ mg/L

2.6 การเกิดสีของสารประกอบ Aromatic hydrocarbon

2.6.1 การคอนจูเกต (conjugation)

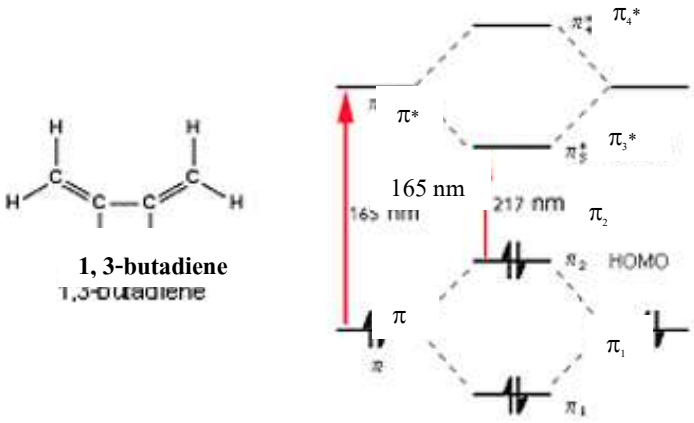
สารประกอบที่ทำให้เกิดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเหล่านี้ต่างก็เป็นสารประกอบ Aromatic hydrocarbon ซึ่งสามารถทำให้เกิดสีเนื่องจากระบบ Conjugate ของสารประกอบเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการที่ทำให้เกิดสีได้

การคอนจูเกต (conjugation) หมายถึง การเรียงสลับระหว่างพันธะคู่กับพันธะเดี่ยว ทำให้อิเล็กตรอนในออร์บิทัลสามารถครองตำแหน่งพื้นที่ในพันธะ (delocalized) ได้มากขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือเกิดการเปลี่ยนสภาวะได้ง่ายขึ้น เมื่อจำนวนพันธะคู่ที่คอนจูเกตกันเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นยาวขึ้น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า red shift เนื่องจากระดับพลังงานสภาวะของอิเล็กตรอนเข้าใกล้กันมากขึ้น เป็นผลให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอนจาก bonding orbital ไปยัง antibonding orbital มีค่าลดลง และความเข้มข้นของการดูดกลืนรังสีจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 อัลตราไวโอเลตของ polyenes แสดง red shift เนื่องจากอิทธิพลของคอนจูเกชัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก อรุษา เชาวนลิขิต (2554)

ผลของการคอนจูเกตจะทำให้เกิดการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยใช้แผนภาพโมเลกุลาร์ออร์บิทัล (molecular orbital: M.O.) โดยยกตัวอย่าง 1,3-butadiene ดังแสดงในภาพที่ 2-13 ต่อไปนี้



ภาพที่ 2-11 molecular orbital ของ 1, 3 - butadiene
ที่มา : ดัดแปลงจาก อรุษา เชาวนลิขิต (2554)

เอทิลีนมีพันธะ C=C อยู่อย่างโดดเดี่ยว การเกิด π -π * ต้องใช้ความยาวคลื่น 165 nm เนื่องจากออร์บิทัลทั้งสองอยู่ห่างกันมาก ต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสภาวะสูง แต่ใน 1,3-butadiene มีการคอนจูเกตของพันธะคู่สองพันธะ ทำให้มี π ออร์บิทัลสองออร์บิทัล และ π * อีกสองออร์บิทัล โดยทั้งสี่ออร์บิทัลมีการเหลื่อมซ้อนกันทำให้ระยะห่างระหว่างπ π * ใกล้กันมากขึ้น ใช้พลังงานในการเปลี่ยนสภาวะน้อยลง ดังนั้น 1,3-butadiene จึงมีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นยาวกว่า คือที่ 217 nm

ตารางที่ 2-10 แสดงผลของการคอนจูเกตที่มีต่อค่า λ_{max} และ ε

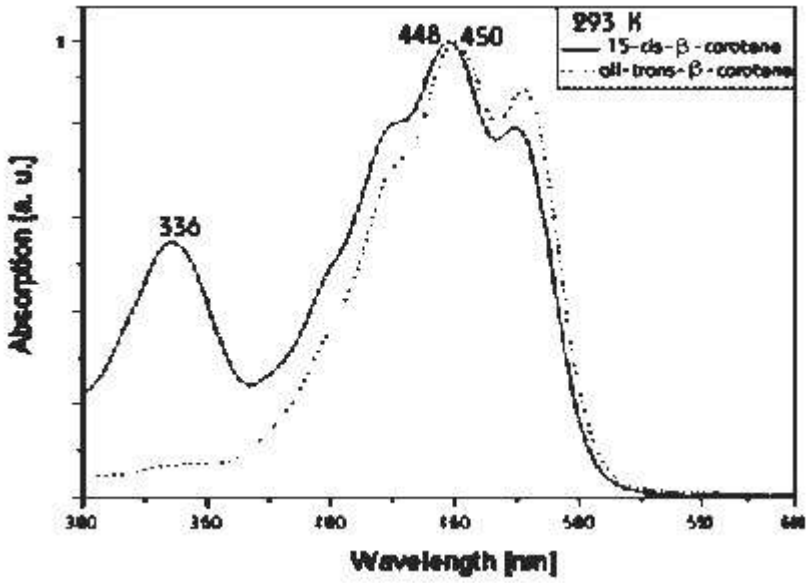
	λ_{max} (nm)	ε (molarabsorptivity)
-C=C-	170	16000
-C=C-C=C-	220	21000
-C=C-C=C-C=C-	260	35000

ที่มา : ดัดแปลงจาก อรุษา เชาวนลิขิต (2554)

จากตารางที่ 2-10 จะเห็นว่าถ้าคอนจูเกตเพิ่มขึ้น λ_{max} จะมากขึ้น และ ε จะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าพันธะคู่มีการคอนจูเกตกันมากๆ จะทำให้สารประกอบมีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นยาวขึ้น จนกระทั่งมีการดูดกลืนที่ช่วงแสงที่มองเห็นได้ จึงทำให้สารประกอบปรากฏเป็นสีต่างๆ เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ที่อยู่ในกลุ่มสารที่เรียกว่าแคโรทีน (carotene) โดยจะมีรงควัตถุหรือสารสีที่ชื่อว่าแคโรทีนอยด์ (carotenoid) ในโครงสร้างแคโรทีนอยด์จะประกอบด้วยพันธะคู่คอนจูเกตกัน 9 คู่ เป็นต้น

2.6.2 โครงสร้าง (conformation)

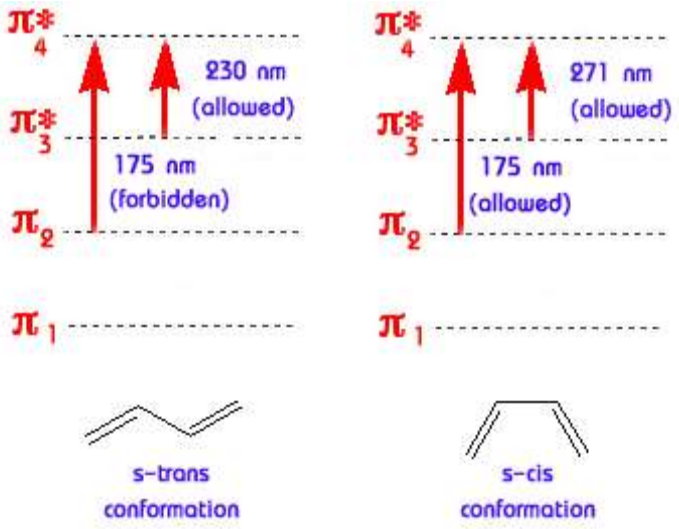
ค่า molar absorptivity เป็นค่าเฉพาะของสารแต่ละชนิด ดังนั้นสารชนิดเดียวกันจึงน่าที่จะมีสเปกตรัมเหมือนกันทุกประการ แต่จากสเปกตรัมในภาพประกอบที่ 2-12 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของเบตาแคโรทีน (beta-carotene) 2 โครงสร้างที่มีจำนวนและชนิดพันธะเหมือนกัน แต่มีการจัดวางตัวในโครงสร้างต่างกันที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 15 พบว่าสเปกตรัมของบีตาแคโรทีนทั้ง 2 โครงสร้างที่เป็นไอโซเมอร์ (isomer) กันนี้มีลักษณะที่ต่างกัน



ภาพที่ 2-12 สเปกตรัมของบีตาแคโรทีนที่เป็นไอโซเมอร์ (isomer) กัน
ที่มา : ดัดแปลงจาก อรุษา เชาวนลิขิต (2554)

15-cis-beta-carotene จะมีสเปกตรัมพีคที่ชัดเจนที่ 336 nm และ 448 nm ส่วน all-trans-beta-carotene จะมีสเปกตรัมพีคที่ชัดเจนที่ตำแหน่งเดียวคือ 450 nm ซึ่งโครงสร้าง conformation ที่ต่างกัน เป็นสาเหตุให้สารเดียวกันมีสเปกตรัมต่างกันได้

โครงสร้าง (conformation) รูปร่างเชิง 3 มิติของโมเลกุล มีอิทธิพลต่อการดูดกลืน ถึงแม้จะเป็นสารชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน ความสามารถในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆ หรือค่า ε ก็จะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากโครงสร้างของสารมีผลต่อความยากง่ายในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ยกตัวอย่าง โพลิอีน (polyene) เช่น 1,3-butadiene มีการเปลี่ยนแปลง π-π^* 2 แบบคือ π_2-π_3^* และ π_2-π_4^* ดังภาพที่ 2-9 แต่โครงสร้างแบบ s-trans นั้น การเปลี่ยนแปลง π_2-π_4^* ซึ่งเกิดที่ 175 nm เป็นการเปลี่ยนสภาวะแบบต้องห้าม นั่นคืออิเล็กตรอนในโครงสร้างแบบ s-trans จะกระโดดจาก π_2 ออร์บิทัล ไปยัง π_4^* ออร์บิทัลไม่ได้ แต่จะเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างแบบ s-cis ดังแสดงในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 การเปลี่ยนสภาวะ π-π^* ใน s-trans และ s-cis ของ 1,3-butadiene
ที่มา : ดัดแปลงจาก อรุษา เชาวนลิขิต (2554)

ดังนั้นสเปกตรัมของเบตาแคโรทีนแบบ cis จึงมีสเปกตรัม 2 พีคที่ชัดเจนในบริเวณที่ 336 nm และ 448 nm ส่วนแบบ trans มีเพียงพีคเดียวชัดเจนในบริเวณที่ 450 nm

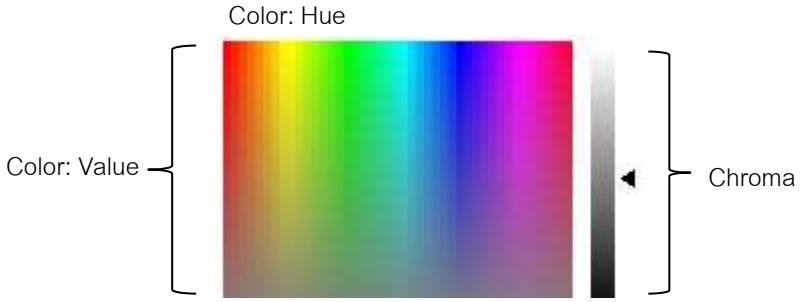
โครงสร้างของสารเป็นตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่า สารที่มีสีเดียวกันซึ่งอาจเป็นสารชนิดเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน หรือเป็นสารคนละชนิดก็ตาม ไม่จำเป็นต้องมีค่า molar absorptivity (ε) ที่ความยาวคลื่นเดียวกันเท่ากันเสมอไป เพราะถึงแม้สารจะดูดกลืนช่วงแสงสีเดียวกัน แต่อย่าลืมว่า โครงสร้างของสารที่แตกต่างกันแม้เพียงนิดเดียว มีผลทำให้ความยากง่ายหรือโอกาสในการกระโดดของอิเล็กตรอนแตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงแตกต่างกันด้วย

2.2.7 การวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI

ADMI ย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute ถือเป้นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสีเพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนของเม็ดสีในน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากกลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้สีย้อมสังคเราะห์และเม็ดสีจำนวนมาก ซึ่งเป็นวิธีที่ยุติธรรมที่จะสามารถตัดสินได้ว่าระดับเฉดสีที่ต่างๆกันทุกเฉดสี ระดับไหนเกินกว่าค่ามาตรฐานที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI เป็นการวิเคราะห์ปริมาณของสีซึ่งพิจารณาจากส่วนประกอบ 3 ส่วนที่จะสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณสีจริงได้ ดังแสดงในภาพที่ 2-21 โดยส่วนประกอบทั้ง 3 อย่างที่นำมาพิจารณาได้แก่

1) เฉดสี (Hue) หมายถึงสีเฉดต่างๆ เช่น ม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง
2) ความอ่อนเข้มของเฉดสี (Chroma) เช่น แดงอ่อน แดงเข้ม

3) ปริมาณเม็ดสี หรือ ความสว่างสี (Color Value) เช่น แดงเฉดสว่าง



ภาพที่ 2-16 องค์ประกอบในการวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI

จากหลักการดังกล่าว การวัดค่าสีในหน่วย ADMI จึงเป็นการวิเคราะห์เฉดสีที่มีความสลับซับซ้อน มีการตรวจวัดค่าสีในทุกๆหน่วยของสี ยากแก่การสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์จึงเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดที่จะสามารถแยกแยะปริมาณสี เฉดสี และความเข้มของสีได้อย่างง่ายดาย โดยอาศัยหลักการ การวัดค่าการดูดกลืนแสง หรือค่าการส่องผ่าน โดยต้องทำการส่องแสงผ่านตัวอย่างสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร เพื่อตรวจจับปริมาณสีเฉดต่างๆ ที่จะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน การวัดค่าสีในหน่วย ADMI นี้มีการพัฒนามาจากหลักการวัดค่าสีแบบ Tristimulus filter method โดยจะมีการตรวจวัดค่าแสงส่องผ่าน (transmittance) ที่เครื่องวิเคราะห์ได้ แล้วนำมาคำนวณค่าโดยใช้สมการของ Adums-Nickerson chromatic value furmula ออกมาเป็นตัวเลขในหน่วย ADMI เนื่องจากสมการดังกล่าวมีตัวแปรจำนวนมากในการคำนวณในแต่ละความยาวคลื่นจึงใช้เวานามากจึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง ปัจจุบันจึงนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จที่มีในเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

การวิเคราะห์สีในหน่วย ADMI ตามารตรฐานการวิเคราะห์ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater ที่นิยมใช้กันได้แก่ APHA 2120E ADMI Tristimulus Filter Method และ APHA 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometer Method ทั้งสองวิธีเป็นการวิเคราะห์ปริมาณสีด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร เพราะฉะนั้นในกรณีที่ตัวอย่างมีเม็ดสีต่างๆกัน วิธีนี้จึงสามารถตรวจจับปริมาณสีได้ทั้งหมด ซึ่งต่างจากวิธีวิเคราะห์สีแบบ Patinum-Cobalt Unit ที่จะวิเคราะห์สีในช่วงตัวอย่างสีเหลืองเท่านั้น โดยการวิเคราะห์สี ADMI ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะมีเฉดสีที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 เฉดสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เฉดสี
400-465	ม่วง (Violet)
465-482	น้ำเงิน (Blue)
482-497	น้ำเงิน-เขียว (Blue-Green)
497-530	เขียว (Green)
530-575	เขียวอ่อน-เหลือง (Greenish-Yellow)
575-580	เหลือง (Yellow)
580-587	เหลืองอ่อน-ส้ม (Yellowish-Orange)
587-598	ส้ม (Orange)
598-620	ส้ม-แดง (Orange-Red)
620-700	แดง (Red)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัดค่าสีในหน่วย ADMI มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะการวิเคราะห์สี ADMI เป็นการวิเคระห์สีจริง (True Color) ของน้ำตัวอย่างจึงจำเป็นต้องกรองน้ำตัวอย่างก่อนการตรวจวัดด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน เพื่อลดการรบกวนของความขุ่นในน้ำตัวอย่าง

นอกจากนี้ค่า pH ของน้ำตัวอย่างก็ยังมีผลต่อค่าสีโดยตรง กล่าวคือในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีค่า pH สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพราะฉะนั้นหลังการกรองน้ำตัวอย่างจึงต้องทำการวิเคราะห์ค่าสีทันทีและทำการบันทึกผลการวิเคราะห์ไว้และต้องมีการปรับค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างให้มีค่าเท่ากับ 7.6 สำหรับวิธีวิเคราะห์ APHA 2120E และปรับค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างให้มีค่าเท่ากับ 7.0 สำหรับวิธีวิเคราะห์ APHA 2120F และนำไปวิเคราะห์อีกครั้งหนึ่ง เพราะฉะนั้นน้ำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างต้องมีการรายงานผลค่าสีADMI 2 ค่า ก่อนและหลังการปรับ pH

2.8 การผลิตแก๊สชีวภาพ

เป็นการทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียกลายเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพ โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic process) เป็นกระบวนการที่อาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobes) จำพวกแบคทีเรียเช่นจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane-producing bacteria) หรือเมทาโนเจน และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid-producing bacteria) มาช่วยย่อยในสภาวะไร้อากาศในกระบวนการย่อย โดยจุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลงเป็นขั้นๆ ไป (Kullavanijaya and Thongduang, 2012; Gerarth *et al*., 2008)

2.8.1 กลไกของการเกิดแก๊สมีเทนทางชีวภาพ

โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2-17

2.7.1.1 ไฮโดรลิซิส (Hydrolysis)

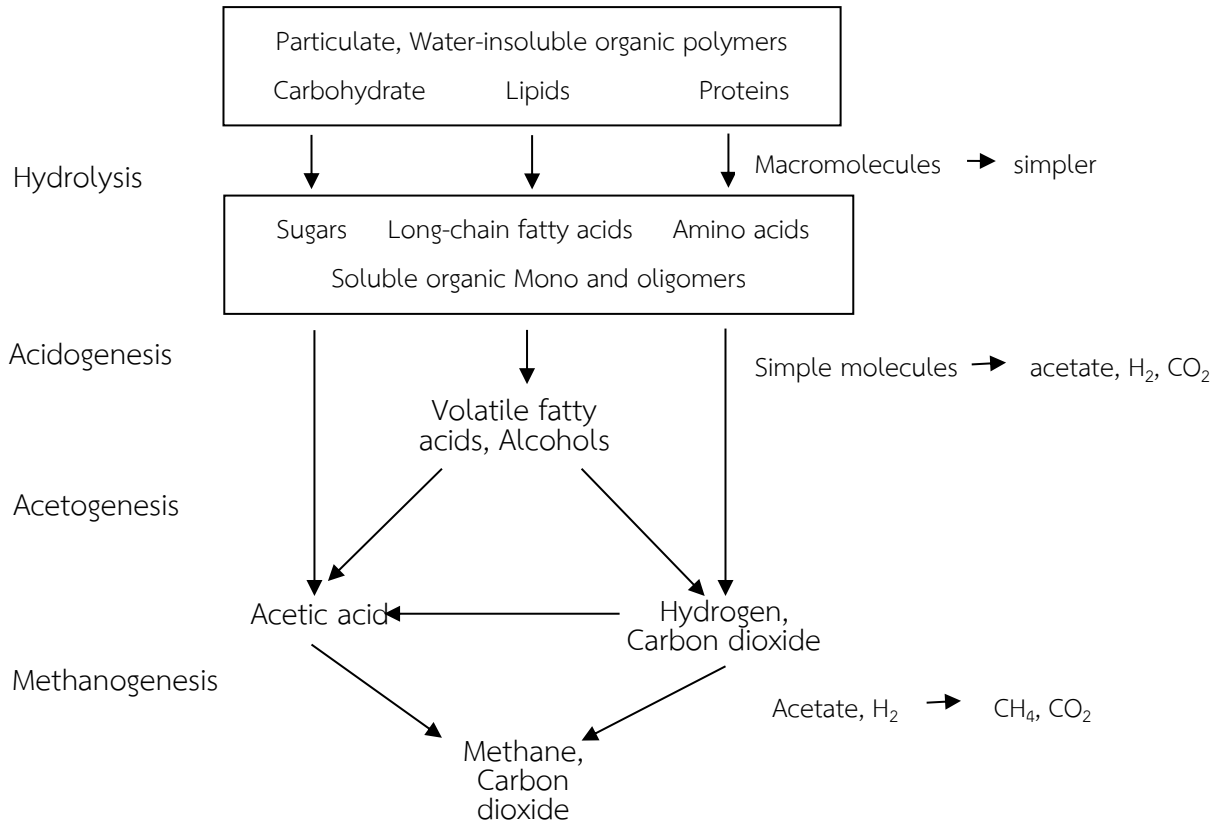
ขั้นตอนไฮโดรลิซิสเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ให้เปลี่ยนไปเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ โดยจุลินทรีย์กลุ่ม hydrolytic bacteria และ fermentative bacteria ซึ่งจะปล่อยเอ็นไซม์เอกซ์ตราเซลลูลาร์ (Extra cellular enzyme) มาช่วยละลายโครงสร้างโมเลกุลอันซับซ้อนให้แตกลงเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว (Monomer) (Taherzadeh and Karimi, 2008) เช่นการย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมัน และการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน

2.8.1.2 แอซิดิฟิเคชั่น หรือ แอซิโดเจเนซิส (Acidification/Acidogenesis)

กระบวนการนี้สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้หรือสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กเช่น กรดอะซิติก (Acitic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) กรดแลกติก (Lactic acid) โดยกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นจะมีกรดอะซิติกในปริมาณมากที่สุดและมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย (Bruni *et al.,* 2010)

2.8.1.3 อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นกระบวนการที่นำกรดอินทรีย์ชนิดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และกรดวาเลอริก จากกระบวนการแอซิโดเจเนซิส เปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกหรือเกลืออะซิเทต กรดฟอร์มิค แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Bruni *et al.,* 2010)



ภาพที่ 2-17 แผนภาพกระบวนการเกิดแก๊สมีเทนทางชีวภาพ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Bruni *et al.,* (2010); Gerath *et al.,* (2008); Bouallagui *et al.,* (2005) และ Gerarth, (2008)

2.8.1.4 เมทาไนเซชั่น หรือเมทาโนเจเนซิส (Methanization/Methanogenesis)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายในขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทน จากกรดอะซิติก และอื่น ๆ จากขั้น 2 รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนบางส่วนที่ได้จากระบวนการสร้างกรด จะเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเป็นมีเทนโดยเมทาโนเจน (Methanogen) การสร้างแก๊สมีเทนมีได้ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติดเป็นแก๊สมีเทน โดยคิดเป็น 70% ของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ อีกแบบหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนให้กลายเป็นแก๊สมีเทน (Gerath *et al.,* 2008)

- ปฏิกิริยา Acetoclasic:

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

- ปฏิกิริยา Hydrogenotrophic:

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$$

ผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-12

แบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยังได้โดยออกซิเจน ดังนั้นจึงต้องอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระเท่านั้น ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตแก๊สมีเทนทางชีวภาพมีอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการหมักทั้งระดับสูง กลาง ไปจนถึงอุณหภูมิต่ำ ข้อเสียของกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนทางชีวภาพคือ มีอัตราการย่อยที่ต่ำ ต้องใช้เวลาในการบำบัดนาน อีกทั้งในกระบวนการนี้ต้องการความร้อนด้วย และมักนิยมใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (Gerarth, 2008)

ตารางที่ 2-912 ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบแก๊สชีวภาพที่ได้จากการการหมัก

Compound	Concentration in Vol.-%
Methane (CH_4)	50–75
Carbon dioxide (CO_2)	25-45
Water (H_2O)	2-7
Hydrogen sulphide (H_2S)	< 2
Nitrogen (N_2)	< 2
Oxygen (O_2)	< 2
Hydrogen (H_2)	< 1

ที่มา : ดัดแปลงจาก Kaltschmitt *et al.,* (2001), Bruuni *et al.,* (2010);
และ Chen *et al.,* (2011)

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ และการย่อยสลายสารอินทรีย์มีปัจจัยต่างๆ เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ (Bruni *et al.,* 2010)

2.8.2.1 อุณหภูมิในการเดินระบบ (Operating temperature) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 10°C แบคทีเรียจะหยุดทำงานได้ อุณหภูมิในการเดินระบบแบ่งเป็นสองระดับตามสปีชีส์ของเมทาโนเจน ได้แก่ เมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) โดยอุณหภูมิที่เหมาะที่เมโซฟิลิกทำงานได้ดีคือประมาณ 20°C–45°C แต่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ช่วง 37°C–41°C (Gerarth, 2008) ซึ่งช่วงอุณหภูมิระดับนี้แบคทีเรียส่วนใหญ่ในถังหมักจะเป็นเมโซฟิลิก ส่วนเทอร์โมฟิลิก ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือประมาณ 50°C–52°C แต่ก็สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปถึง 70 °C แบคทีเรียเมโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปีชีส์มากกว่าเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย ทำให้ระบบหมักแก๊ส

ชีวภาพที่ใช้สภาวะเมโซฟิลิก เสถียรกว่า แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าในระบบที่ใช้เทอร์โมฟิลิกก็เป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการผลิตแก๊สสูงกว่า และระบบเทอร์โมฟิลิกจะต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาเพิ่มความร้อนให้ระบบ ทำให้อาจได้พลังงานสุทธิที่ต่ำกว่า (Bouallagui *et al.,* 2005)

2.8.2.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH Value) ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สชีวภาพคือระหว่าง 7.0–7.2 ค่า pH ในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมากและทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5 ก็จะส่งผลให้หยุดกระบวนการย่อยและหมักทั้งหมด แบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนนั้นอ่อนไหวต่อความเป็นกรดด่างมาก และจะไม่เจริญเติบโตหาก pH ต่ำกว่า 6.5 (Bouallagui *et al.,* 2005) ในช่วงท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของ NH_4 จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นโดยอาจสูงเกินกว่า 8 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร pH จะอยู่ระหว่าง 6.8–8

2.8.2.3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ที่สามารถใช้ผลิตแก๊สชีวภาพคือตั้งแต่ 8–30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพคือประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก ไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนนำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ผลผลิตแก๊สน้อย แต่ถ้าหาก C/N Ratio ต่ำมากๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีมากและจะไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 ก็จะเริ่มเป็นพิษกับแบคทีเรีย ทำให้จำนวนแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนลดลง นอกจากนี้หาก C/N ratio อยู่นอกเหนือจากช่วง 8-30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณแก๊สที่ได้เป็นแก๊สอื่นๆ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น (Gerath *et al.,* 2008)

2.8.2.4 ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Loading) ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบคือปริมาณสารอินทรีย์ที่เราเติมใส่ถังหมักในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เราเติมนั้นมากเกินไป ก็จะส่งผลให้ค่า pH ลดลง (เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการคือ Acidogenesis กรดจะถูกผลิตขึ้นมา) จนอาจทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนอาจตายหมด (Gerath *et al.,* 2008) ซึ่งหากเกิดกรณีนี้ขึ้นก็จะต้องเริ่มต้นระบบใหม่หมด แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยแก๊สที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ระบบเดินได้ไม่เต็มตามกำลังการผลิต ส่งผลให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น

2.8.2.5 ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time) ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบ/ถังหมัก หากระยะเวลาในการกัก

เก็บสั้นเกินไปก็จะไม่เพียงพอสำหรับให้แบคทีเรียผลิตแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไป ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป แบคทีเรียที่เหลืออยู่อาจทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่า pH ในถังหมักลดลงขึ้น ขณะเดียวกันหากระยะเวลากักเก็บนานเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14-60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณของแข็ง (Total solid content, TSC) อุณหภูมิ ขนาดและประเภทของ digester และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม (Gerardi, 2003) ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไหร่โดยไม่มีการเติมอาหาร เนื่องจากระยะเวลาการกักเก็บนั้นหมายถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไหร่ก็ตามที่แบคทีเรียยังย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่าแบคทีเรียก็จะไม่ตายจากการขาดอาหาร

2.8.2.6 ปริมาณของแข็ง (Solid content) ของสารอินทรีย์ในการผลิตแก๊สชีวภาพแบ่งเป็นสองระดับคือ High-solid (ปริมาณของแข็งสูง, TSC สูงกว่า ~ 20%) และ Low-solid (ปริมาณของแข็งต่ำ, TSC ต่ำกว่า ~ 15%) โดยถังหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ high solid จะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (Slurry) แต่เนื่องจากในระบบ high solid ความเข้มข้นของน้ำในถังหมักสูงกว่า พื้นที่ที่ใช้ก็จะน้อยกว่า ในทางกลับกัน ถังหมัก low solid สามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าในการสูบน้ำตะกอน แต่ก็ต้องใช้พื้นที่มากกว่าเนื่องจากปริมาตรต่อสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปสูงขึ้น ซึ่งการที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็ทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้นและการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็จะช่วยให้การย่อยและการผลิตแก๊สเร็วขึ้นด้วย (Gerardi, 2003)

2.8.2.7 การคลุกเคล้า (Mixing) การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และ สารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดแก๊สเร็วขึ้นและมีปริมาณมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถังได้ (Bougrier et al., 2006)

2.8.2.8 สารอาหาร (Nutrient) สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโตนอกจากคาร์บอนและไฮโดรดเจนแล้ว ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมากๆ เช่น เหล็ก แมงกานีส ลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซิลิเนียม ทังเสตน และนิเกิลเป็นต้น

2.8.2.9 สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and toxic materials) เช่น สารประกอบฟีนอลิก ไขมัน กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย รวมถึงธาตุไอออน สารพิษ

โลหะหนัก สารทำความสะอาดต่างๆ เช่นสบู่ น้ำยาล้างต่างๆ และยาปฏิชีวนะ สามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตแก๊สของแบคทีเรียได้ (Valo *et al.,* 2004)

2.8.2.10 อัลคาลินิตี้ (Alkalinity) ค่าอัลคาลินิตี้ หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง ค่าอัลคาลินิตี้ที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000-5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$) (Singhal *et al.,* 2012)

2.8.2.11 ชนิดและแบบของบ่อหมักแก๊สชีวภาพ (Biogas plant) บ่อแก๊สชีวภาพ แบ่งตามลักษณะการทำงาน ลักษณะของของเสียที่เป็นวัตถุดิบ และประสิทธิภาพการทำงานได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ บ่อหมักช้าหรือบ่อหมักของแข็ง และบ่อหมักเร็วหรือบ่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งบ่อบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบหลัก คือ แบบเอเอฟ (Anaerobic Filter, AF) และแบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanker, UASB) (Gerardi, 2003) แบบเอเอฟตัวกลางที่ใช้ทำได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น ก้อนหิน กรวด พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ไม้ไผ่ตัดเป็นท่อน เป็นต้น ในลักษณะของบ่อหมักเร็วแบบนี้ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนบนตัวกลางที่ถูกตรึง ส่วนแบบแบบยูเอเอสบีจะใช้ตะกอนของสารอินทรีย์ (Sludge) ที่เคลื่อนไหวภายในบ่อหมักเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ ลักษณะการทำงานของบ่อหมักเกิดขึ้น โดยการควบคุมความเร็วของน้ำเสียให้ไหลเข้าบ่อหมักจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนตะกอนส่วนที่เบาจะลอยตัวไปพร้อมกับน้ำเสียที่ไหลล้นออกนอกบ่อตะกอนส่วนที่หนักจะจมลงก้นบ่อ

2.8.3 Biochemical Methane Potential (BMP)

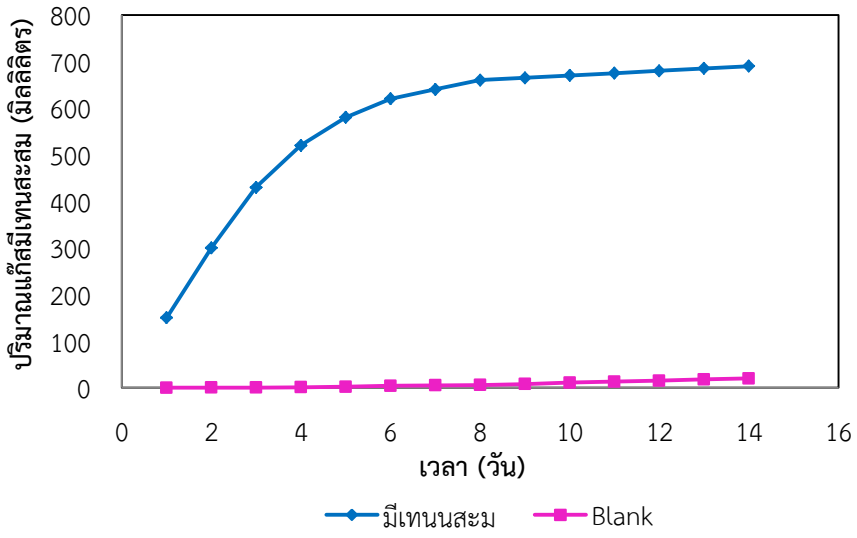
การจะนำระบบบำบัดแบบไร้อากาศไปใช้กับน้ำเสียจากกิจกรรมใดๆ ควรจะต้องทำการทดสอบค่า BMP เพื่อประเมินความเป็นไปได้หรือศักยภาพของระบบรวมทั้งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียก่อน โดยการหาค่า BMP เป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของของเสียที่นำมาบำบัดด้วยระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงในรูปของปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัม COD ของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป หรือกรัม VS ของเสียที่ป้อนเข้าไป ค่า BMP ที่ได้โดยไม่คำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย ซึ่งจะแสดงถึงศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดของของเสีย

การทดลอง BMP ทำได้โดยนำของเสียมาผสมกับตะกอนแอนแอโรบิคแบคทีเรียในขวดแล้วไล่แก๊สออกซิเจนออกให้หมดก่อนจึงปิดขวดให้สนิท จากนั้นทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) คือไม่มีแก๊สเกิดเพิ่มขึ้น จากนั้นวิเคราะห์สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพและคำนวณปริมาตรของแก๊สมีเทนในช่วงเวลาต่างๆ ที่วัดได้

การวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์หาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของของเสีย โดยอาศัยปริมาณแก๊สมีเทนที่วัดได้แต่ละวัน นำมาพล็อตกราฟแสดงปริมาณแก๊สมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลองดังแสดงในภาพที่ 2-18 และนำค่าปริมาณแก๊สมีเทนสะสมทั้งหมด ลบปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่เกิดจากเชื้อตั้งต้นเพียงอย่างเดียว เพื่อนำปริมาณแก๊สมีเทนที่

เกิดขึ้นจริงมาคำนวณหาค่า Total specific methane yield ของของเสีย ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนผสมในขวดทดลองเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบดังสมการต่อไปนี้

$$\text{BMP} = \frac{\text{ปริมาตรของแก๊สมีเทนสะสมทั้งหมด (มล.)}}{\text{กรัม COD ที่ย่อยสลายไป หรือ กรัม VS ของเสียที่ป้อนเข้าระบบ}}$$



ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างการสร้างกราฟปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลอง BMP

2.8.4 การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้เริ่มพัฒนามาจากระบบ CSTR (Completely Stirred Tank Reactor) (Tong *et al.*, 2006) โดยเป็นการหมักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์แบบไร้ออกซิเจนแบบปิด (Closed Anaerobic Tank System) โดยจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอยและสารละลาย ได้ออกมาเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งมีส่วนประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยที่แก๊สชีวภาพนี้จะถูกส่งไปใช้ประโยชน์ โดยสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันเตา แก๊สหุงต้ม หรือนำมาผลิตไฟฟ้าได้ โดย ผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานเองหรือขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็ก ในปัจจุบันพบว่าได้มีการพัฒนาการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในหลายระบบเช่น Anaerobic Filter (AF) Upflow anaerobic sludge blanker (UASB) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2-13

ปัญหาในด้านประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบส่วนใหญ่เกิดจากการควบคุมคุณภาพของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบแก๊สซึ่งพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการควบคุณภาพก่อนเข้าสู่ระบบได้แก่ อุณหภูมิ (<50 °C) pH (> 4) oil and grease (<8,000) SS (20,000-30,000 mg/L) และ COD (50,000-80,000 mg/L)

ตารางที่ 2-13 การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Types of reactor	Operating OLR range (Kg COD/m^3/day)	COD removal efficiency (%)	Methane Composition (%)	Reference
UASB	1.8-13.9	63.0-81.0	54.0-67.0	Kalyuzhnyi *et al.,* 1998
AF	1.4	80	54.4	Perez *et al.,* 2001
AF	2.16	80.7	36	Yacop *et al.,* 2006
UASB	11.58	97	71.9	Najafpour *et al.,* 2006
CSTR	3.33	80	62.5	Tong *et al.,* 2006

2.9 การเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

การปรับสภาพน้ำเสียหรือการ Pretreatment เป็นกระบานการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตแก๊สให้มีความเหมาะสมและง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ให้ได้มากที่สุด (Fernandez *et al.,* 2009) ซึ่งหากสารอาหารถูกใช้ไปได้มากนอกจากจะมีประโยชน์ในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตชีวภาพ แล้ว ยังเป็นการช่วยให้ลดความสกปรกในน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการดังกล่าวได้อีกด้วย (Hendriks and Zecman, 2009) กระบวนการในการ pretreatment มีหลายรูปแบบ ได้แก่ Biochemical pretreatments เช่น microbial pretreatments enzymatic pretreatments Chemical pretreatments เช่น caustic pretreatments acid pretreatments Physical pretreatments เช่น mechanical pretreatments thermal pretreatments และCombined processes เช่น thermal-chemical pretreatments thermo-mechanical pretreatments

กระบวนการใน pretreatment ที่ได้รับความนิยมเพื่อเป็นการช่วยส่งเสริมระบบผลิตชีวภาพที่ใช้เวลาน้อย ประหยัดเวลา สามารถควบคุมคุณภาพได้ดี ไม่มีการเพิ่มเติมสารเคมีเข้าไปในระบบและให้ผลในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีคือกระบวนการ บำบัดขั้นต้นทางกายภาพ (physical pre-treatments) (Brumi, 2010; Carrère *et al.,* 2010; González-Fernández *et al.,* 2008) ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่ามีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาทดลองกระบวนการในการ pretreatment ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวภาพซึ่งได้รวบรวมและแสดงไว้ในตารางที่ 2-14 และ 2-15

ตารางที่ 2-14 การใช้ Thermal pretreatment เพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

Sludge	Pretreatment conditions	Operating conditions	Result	Reference
Activated sludge	160 °C	CSTR, HRT: 15 days	Increase of biogas production (60%)	Fjordside, 2001
Digested mixed sludge	170 °C, 60 s, 0.8 MPa	Batch, 20 days	Increase of biogas production (49%)	Dohanyos *et al.,* 2004
	170 °C, 60 min	Batch, 24 days, 35 °C	Increase of biogas production (45%)	
Activated sludge	170 °C, 60 min	CSTR, HRT: 20 days, 35 °C	Increase of CH_4 production (61%)	Valo *et al.,* 2004
	170 °C, 30 min	Batch, 24 days, 35 °C	Increase of CH_4 production (76%)	
Activated sludge	170 °C, 30 min	CSTR, HRT: 20 days, 35 °C	Increase of CH_4 production (51%)	Bougrier *et al.,* 2006
Activated sludge	170 °C, 30 min	7 bar, Batch	Increase of CH_4 production (50%)	Fernandez *et al.,* 2009
	170 °C, 30 min, 7 bar	Continuous, HRT: 12 days	Increase of biogas production (40-50%)	

ตารางที่ 2-15 การใช้ Ozonation pretreatment เพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

Sludeg	Pretreatment conditions	Operating conditions	Results	Reference
Mixed sludge	0.1 g $O_3.g^{-1}$ COD	Batch, 30 days, 33 °C	Increase of CH_4 biogas production (100%)	Paul *et al.,* 2005
Activated sludge	0.15 g O_3.g-1 TS	Batch, 18 days, 35 °C	Increase of biogas production (145%)	Bougrier *et al.,* 2007
Activated sludge	H_2O_2: 150 $mmol.L^{-1}$ $FeSO_4$: 5 $mmol.L^{-1}$	Batch, 24 days, 35 °C	Increase of biogas production (16%)	Valo *et al.,* 2004

สำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีลักษณะเด่นในเรื่องของภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ในปริมาณสูงและปัจจุบันมีความนิยมติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งจะทำการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าระบบ ด้วยการปรับสภาพน้ำในลักษณะของการเก็บกวาดชั้นไขมันและน้ำมัน การกวนผสมและทิ้งระยะเวลาเพื่อให้อุณหภูมิลดลง (<50 °C) ก่อนนำเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพ อย่างไรก็ดีน้ำเสียหลังผ่านการย่อยแบบไร้อากาศดังกล่าวแล้วยังคงมีสารอินทรีย์ในระดับที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรรม ดังนั้นการค้นหาวิธีการใช้ประโยชน์จากสารอินทรีย์ที่ยังคงหลงเหลืออยู่นี้ให้ได้มากยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งทั้งในแง่ของเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

Singhal และคณะ (2012) พบว่าผลของการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตาโซนิคก่อนเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สให้ได้มากขึ้นและเป็นไปได้ที่จะมีปริมาณไฟฟ้ามากพอในการดำเนินการระบบของอัลตราโซนิคได้เองโดยไม่รบกวนกำลังการผลิตเดิม ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่ม yield ของระบบผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่า 25% กับน้ำเสียของอุตสาหกรรมการเกษตร และด้วยจุดมุ่งหมายในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในการศึกษานี้จึงสนใจในการนำวิธีทางกานภาพได้แก่ Dissolved air flotation (DAF) โคอะเลสเซอร์ และอัลตราโซนิคมาประยุกต์ใช้ในระบบ

2.9.1 การเตรียมน้ำเสียก่อนเข้าระบบแบบไร้อากาศ

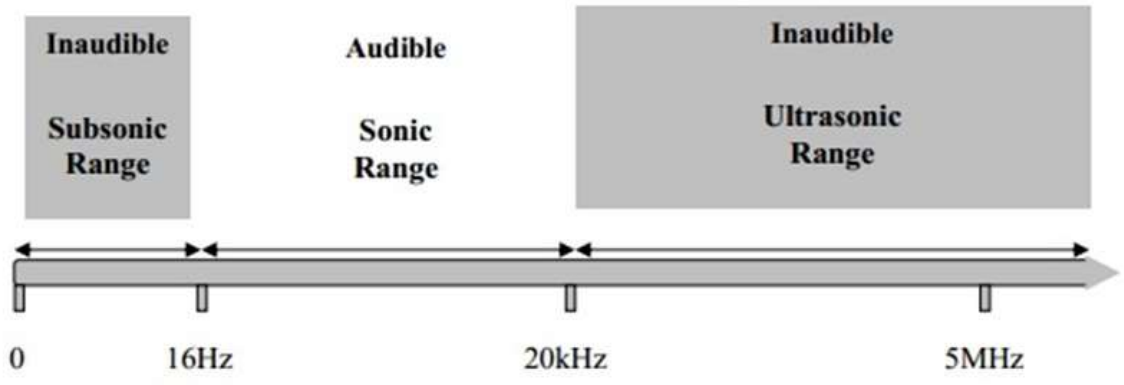
ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะมีส่วนประกอบของ น้ำมัน ของแข็ง สารแขวนลอยและน้ำผสมกันอยู่ ซึ่งการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียนั้น สามารถแยกออกได้โดยวิธีการต่างๆ เช่น การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการแยกส่วนของอนุภาคของแข็งหรือพวกคอลลอยด์ ออกจากของเหลวโดยวิธีแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นการอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของของแข็งกับน้ำ โดยของแข็งจะตกลงสู่ด้านล่างจะเร็วหรือช้า ขึ้นกับความหนืดของน้ำและขนาดของแข็งชนิดของการตกตะกอน ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใช้วิธีการตกตะกอนแบบอิสระ (Discrete, free setting) เป็นการตกตะกอนของอนุภาคของแข็งที่ไม่มีการรวมตัวกับอนุภาคของแข็งข้างเคียง ใช้กับพวกมีความเข้มข้นต่ำ มักเป็นพวกสารอนินทรีย์ เช่น หิน ทราย เป็นต้น การตกตะกอนแบบอิสระนี้ในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียในบ่อดักน้ำเสียรวม

เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่าของ บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และปริมาณน้ำมันสูง ประกอบพวกสารแขวนลอยไม่สามารถแยกโดยวิธีตกจมตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นในส่วนของการบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ผลดีเมื่อมีการแยกน้ำมันและสารแขวนลอยออกก่อน จากการศึกษาของ PORIM/RRIM สรุปได้ว่า ควรมี physical หรือ chemical treatments น้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่บ่อบำบัด (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์, 2533) เป็นการช่วยลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียและยังได้น้ำมันกลับมาเพิ่มขึ้นด้วย

2.10 อัลตราโซนิค pretreatment

2.10.1 อัลตราโซนิค (Ultrasonic)

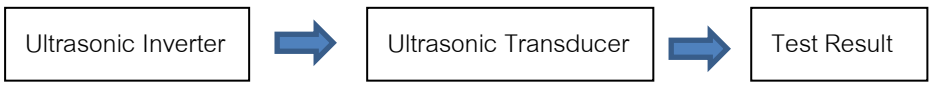
อัลตราโซนิค หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป (Asakura *et al.,* 2008) ซึ่งสูงเกินกว่าที่หูมนุษย์โดยทั่วไปจะได้ยินซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-19 Ultrasonic นั้นมีหลักการทำงานคือ ส่งคลื่นความถี่สูงลงสู่สารละลาย ส่งผลให้โมเลกุลของของเหลวเกิดการบีบอัดและคลายตัวเป็นจังหวะ เป็นผลให้มีฟองอากาศสูญญากาศเล็ก ๆ จำนวนมากผุดขึ้นเรียกลักษณะดังกล่าวว่ากระบวนการกดอัดของเหลว (Cavitation) (Sun *et al.,* 2004) แต่เนื่องจากฟองอากาศดังกล่าวไม่ใช่ฟองอากาศที่เกิดจากการตีน้ำธรรมดา แต่เกิดจากคลื่นความถี่สูงเพราะฉนั้นฟองอากาศเล็กๆ ดังกล่าวจึงมีพลังงานแฝงอยู่ และสามารถเข้าซอกซอนในทุกซอกมุมเล็กๆได้ เครื่องที่สามารถผลิตคลื่นความถี่ได้สูงเท่าไร มีผลให้เกิดฟองอากาศดังกล่าวได้มากและพลังแฝงมากขึ้นด้วย (Yuan *et al.,* 2010)



ภาพที่ 2-19 ช่วงความถี่คลื่นอัลตราโซนิค

ที่มา: ดัดแปลงจาก http://www.pall.com/main/fuels-and-chemicals/product.page?lid=gri78lm8#

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นทีมีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตรา-โซนิค มีใช้ทั้งในรูแบบ prove และ water bath ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยสังเกต เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้นๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (10^9 Hz) ก็ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับตัวกลางที่ไม่ใช่อากาศ (Iskalieva *et al.,* 2012)



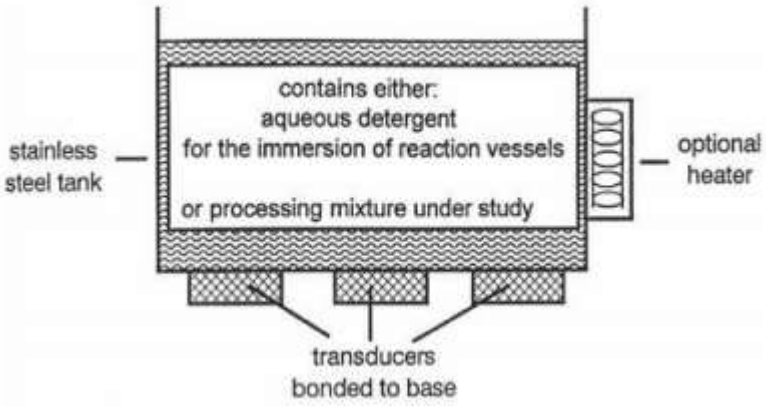
ภาพที่ 2-20 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ

2.10.2 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic reactor)

เครื่องอัลตราโซนิคที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1) อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic baths)

อ่างอัลตราโซนิคเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบ โดยทั่วไปทรานส์ดิวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างของอ่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ ประมาณ 40 kHz อ่างอัลตราโซนิคมีลักษณะดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 อ่างอัลตราโซนิค

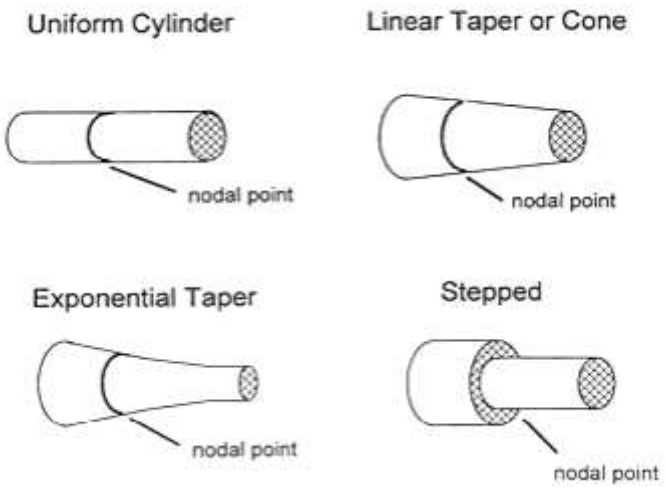
ที่มา : Mason and Peter, 2002

พลังงานสูงสุดที่สร้างได้สำหรับอ่างอัลตราโซนิคนั้นพจะอยู่ตรงบริเวณระดับความสูงค่าหนึ่ง ตลอดความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อน)Reflection) ของคลื่นอัลตราซาวน์ที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่า กับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง ส)ำหรับน้ำ มีค่า λ = 37 มิลลิเมตรที่ ความถี่ 40 kHz) ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลท าให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้

อ่างอัลตราโซนิคอาจมีอุปกรณ์เสริมประเภทต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกาทำงานให้ดีขึ้นเช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Thermostatically controlled heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (frequency sweeps) ที่ทำให้แคปติเวชันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงาน สวิทซ์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตราโซนิคโดยทั่วไปมักจะให้พลังงานต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแคปวิเตชันที่เกิดขั้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างมักมีปริมาณมาก ทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง

2) อัลตราโซนิคแบบโพรบ (Ultrasonic probe)

ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากทรานส์ดิวเซอร์นั้น โดยทั่วไปจะนำทรานส์ดิวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (Horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 2-22 แอมพลิจูดที่สร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Uniform cylinder) นั้น แอมพลิจูดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (Amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าตัดในฮอร์นระหว่างสองพื้นที่คือ Driven face (D) และ Emitting face (d) ตัวอย่างเช่นในฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น Exponential หรือ Linear tapered (cone) (ภาพที่ 2-22 บนขวาหรือล่างซ้าย) จะมีอัตราส่วน เท่ากับ D/d ในขณะที่ฮอร์นที่มีลักษณะเป็น Stepped (ภาพที่ 2-22 ล่างขวา) จะมีอัตราส่วน เท่ากับ $(D/d)^2$



ภาพที่ 2-22 ลักษณะของฮอร์นชนิดต่างๆ
ที่มา : Mason and Peter, 2002

จะเห็นว่าฮอร์นแบบ Stepped จะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่าเสมอ แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัตถุ (Internal stress) อัตราส่วนระหว่าง D/d จะต้องมีค่าไม่สูงจนเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานสูงสุดที่ได้จาก แหล่งกำเนิดพลังงานนั้น

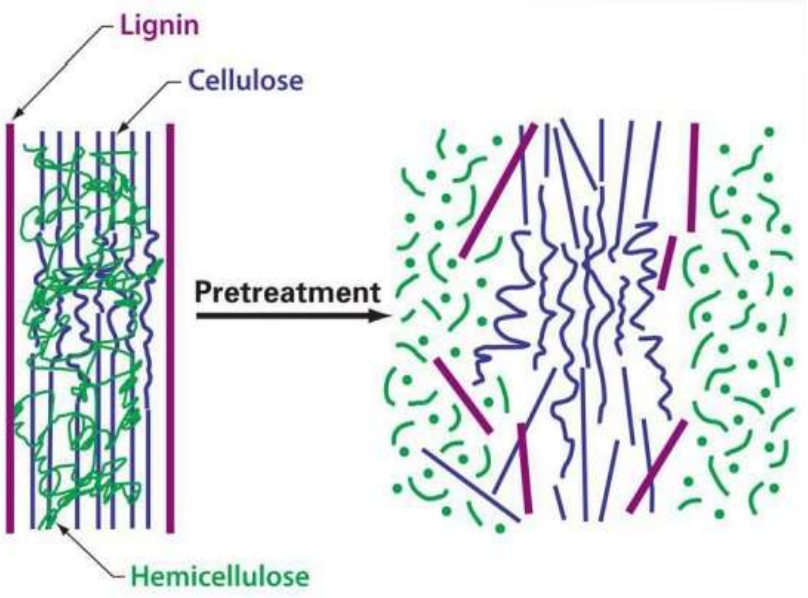
ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของวัตถุที่ใช้ในการผลิต ทรานส์ดิวเซอร์และพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น (Emitting surface) ในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตทรานส์ดิวเซอร์ นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดและคืนตัวกลับได้ดีเช่นไทเทเนียม (Titanium) หรือ อะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium alloy) ซึ่งวัตถุทั้งสองชนิดมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล แต่อะลูมิเนียมอัลลอยนั้นไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาแคปติเวชันเนื่องจากถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงควรใช้วัตถุพวกไทเทเนียมอัลลอยแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ที่แอมพลิจูดสูงจะมีข้อจำกัดเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาแคปวิเตชันจะรบกวนการส่งถ่ายของพลังงานไปยังของเหลว

2.10.3 Ultrasonic pretreatment

การปรับสภาพน้ำเสียด้วยอัลตราโซนิคเป็นวิธีการที่ได้มีการทดสอบมาแล้วทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ ระดับ pilot-scale และ full-scale ซึ่งจากรายงานการวิจัยต่างพบว่าสามารถลดขนาดของ floc-size (Chu *et al.,*2002) เนื่องจากทำให้เกิดการสลายของเซล์ (Tiehm *et al.,* 1997; Chu *et al.,* 2002; Brown *et al.,* 2003) ส่งผลให้ความเข้มข้นของ soluble chemical oxygen demand (sCOD) เพิ่มขึ้น (Tiehm *et al.,* 1997; Chu *et al.,* 2002; Brown *et al.,* 2003;) และทำให้ปริมาณของ volatile solids (VS) ลดลง (Tiehm *et al.,* 1997, 2001; Brown *et al.,* 2003; Salsabil *et al.,* 2009) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้อัลตราโซนิคในการ pretreatment สลัดจ์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-16

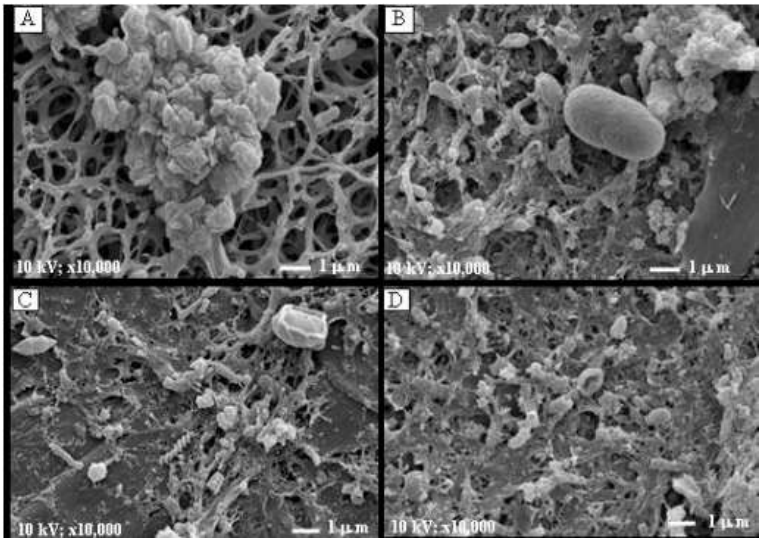
Tiehm และคณะ (2001) พบว่าที่ความถี่ 20 kHz เป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการสลายโครงสร้างของสลัดจ์ (ภาพประกอบที่ 2-18) และส่งเสริมให้การผลิตแก๊ซชีวภาพเพิ่มขึ้น Chu *et al.,* 2002; Salsabil *et al.,* 2009; Brown *et al.,* 2003; González-Fernández *et al.,* 2008) ดังแสดงในตารางที่ 2-17

วิธีการอัลตราโซนิค สามารถแตกไฟเบอร์ ส่วนประกอบของเซลลูโลสให้เป็นอนุภาคที่เล็กลง (Li *et al.,* 2012) และแตกผนังของโครงสร้างเซลล์ (Mosier *et al.,* 2005) ซึ่งจะทำให้ส่วนประกอบพิเศษของเซลล์ เช่น แป้งหรือน้ำตาลกลายเป็นของเหลว (Asakura, 2008) รวมทั้งทำให้ผนังเซลล์แตกออกเป็นส่วนเล็กๆ (Jun *et al.,* 2009) ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมัก การย่อยและยังเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสเอนไซม์ระหว่างการเกิดเป็นของเหลวหรือการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล (Sun and Tomkinson, 2002) ซึ่งทำให้เพิ่มความเร็วในการหมัก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ เช่นเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอธานอลจากชีวภาพ (Yuan *et al.,* 2010) นอกจากนี้คลื่นอัลตราโซนิคยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสกัดสารที่สนใจออกจากตัวอย่าง โดยส่วนมากจะใช้สกัดสารกึ่งระเหย (Semi-volatile) และสารระเหยยาก (Non-valatile Organic Compounds) จากตัวอย่างของแข็ง ตัวอย่างชีวภาพ หรือของเหลวอื่นๆ (Gerath *et al.,* 2008)



ภาพที่ 2-23 การแตกของเซลลูโลส
ที่มา : Elvira *et al*., 2009

Navaneethan (2007) ได้นำอัลตราโซนิคมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดกากสลัดจ์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการ sonicstion เพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างของสลัดจ์ตัวอย่างแตกตัว ดังแสดงในภาพที่ 2-23 ภาพที่ 2-24 ซึ่งจากการทบทวนเอกสารและการศึกษาทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่าอัลตราโซนิคสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการบำบัดน้ำเสียที่มีสิ่งปนเปื้อนที่เป็น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนดังที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ ซึ่งอาจใช้ในลักษณะเป็น Pre-treatment ก่อนเข้าสู่การ anaerobic digestion ในขั้นต่อไป (Xu *et al.,* 2011)



ภาพที่ 2-24 แสดงโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของสลัดจ์จากการเพิ่มเวลาในการ sonication
A) 0 นาที B) 2 นาที C) 10 นาที D) 30 นาที
ที่มา : Navaneethan (2007)

ตารางที่ 2-16 การทดลอง Ultrasonic pretreatment เพื่อการลดปริมาณสลัดจ์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

Scale input	sCOD	VS reduction	Biogas production	Frequency (kHz)	Power input	Treatment time	Energy	Reference
Pilot	2270 mg/L	50.3 %	None	31	3.6 kW	64 s	0.064 kWh	Tiehm *et al.,* (1997)
Lab	N/A	20 %	None	20	0.33W/mL	120 min	560 kWh/m^3	Chu *et al.,* (2002)
Lab	N/A	33.7 %	None	20	0.33W/mL	20 min	110 kWh/m^3	Tiehm *et al.,* (2001)
Lab	N/A	54 %	None	20	23 0.47W/mL	90 s	12 kWh/m^3	Trouqu´e and Forster (2002)
Full	N/A	78.7 %	+25–50 %	20	5·3 kW	1.5 s	150 kWh/m^3	Rooksby (2001)
Full	340 mL/g VS	N/A	550 mL/g VS	20	5·3 kW	1.5 s	150 kWh/m^3	Brown *et al.*, (2003)

ตารางที่ 2-17 การใช้ Ultrasonic pretreatment เพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

Sludge	**Pretreatment conditions**	**Operating conditions**	**Results**	**Reference**
Activated sludge (TS 3.5%)	8.4 kWh/m^3, 400 W, 6 min	Semi-continues	Increase of gas production (13%)	Anders, 2005
Mixed sludge	20 kHz, 180 W, 60 s	Batch, 28 days, 35 °C	Increase of biogas production (24%)	Bien *et al.,* 2004
Activated sludge (27 g TS L^{-1})	20 kHz, 7,000 and 15,000 kJ.kg^{-1}TS	Batch, 16 days, 35-37 °C	Increase of biogas production (40%)	Bougrier *et al.,* 2005
Activated sludge	5,000 kJ.kg^{-1}TS	Semi-continues, HRT: 20 days	Increase of biogas production (36%)	Braguglia *et al.,* 2008
Activated sludge (17.1 g TS L^{-1})	20 kHz, 108,000 kJ.kg^{-1}TS	Batch, 50 days, 37 °C	Increase of biogas production (84%)	Salsabil *et al.,* 2009
Activated sludge (2.14% TS)	20 kHz, 9690 kJ.kg-1TS	Batch, 35 days, 36 °C	Increase of biogas production (44%)	Erden and Filibeli, 2009
Activated sludge	30 kWh.m^{-3} sludge	Batch	Increase of biogas production (42%)	Perez-Elvira *et al.,* 2009
	30 kWh.m^{-3} sludge	Continuous HRT: 20 days	Increase of biogas production (37%)	

2.11 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุน

การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนเป็นวิธีการหนึ่งในการแสดงให้เห็นถึงการใช้ทรัพยากรไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการวิเคราะห์จะมีการประเมินถึงผลตอบแทน (Benefit) และค่าใช้จ่าย (Cost) ต่างๆ ซึ่งถ้าหากผลตอบแทนมีมากกว่าค่าใช้จ่าย โครงการนั้นเป็นโครงการที่ให้ผลตอบแทนคุ้มค่า การวิเคราะห์จึงมีส่วนช่วยในการตัดสินใจที่จะใช้ทรัพยากรไปอย่างมีประสิทธิภาพตามหลักวิชาการ

จุดประสงค์สำคัญในการศึกษาด้านการเงินคือต้องการทราบว่าโครงการลงทุนมีความหมาะสมด้านการเงินอย่างไร โดยพิจารณาจากผลตอบแทนการลงทุนว่าเป็นอย่างไร ผลการดำเนินงานสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลากี่ปี

ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายของโครงการแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost) ต้นทุนหรือกระแสเงินสดจ่าย มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

ต้นทุนรวม = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน + ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

Total Cost = Investment Cost + Operation Cost

2.12.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน หมายถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนในคราวแรก และไม่ต้องลงทุนเพิ่มในช่วงอายุของโครงการ เช่น

1) ค่าก่อสร้างอาคาร

2) ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่ใช้ในการดำเนินงาน

2.12.2 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost)

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเช่น

1) เงินเดือนพนักงาน

2) ค่าโทรศัพท์

3) ค่าไฟฟ้าค่าวัตถุดิบในการผลิตแก๊ส

4) ค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น

2.12.3 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุน มีอยู่ 2 เกณฑ์คือ

1) เกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่มีการปรับค่าของเวลา ซึ่งก็คือระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback Period) หมายถึงระยะเวลาการดำเนินงานที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิจากโครงการมีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนพอดีวิธีการหาระยะเวลาคืนทุนหรือจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนคุ้มกับเงินที่ลงทุนสามารถคำนวณได้ดังนี้

ระยะเวลาคืนทุน = ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก / ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี

2) เกณฑ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่าของเวลา มี 3 เกณฑ์ดังนี้

2.1) มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value: NPV)

มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิของโครงการลงทุน คือผลรวมของผลตอบแทนสุทธิที่ได้ปรับค่าเวลาของโครงการแล้ว ซึ่งมุ่งเพื่อวัดว่าโครงการที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น จะได้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าหรือไม่ เป็นการเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับกับ กระแสเงินสดจ่ายของโครงการ โดยคิดอัตราคิดลด ซึ่งส่วนใหญ่ใช้อัตราดอกเบี้ย (อัตราดอกเบี้ย) เงินกู้จากสถาบันการเงิน สูตรในการคำนวณคือ

NPV = มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ – มูลค่าปัจจุบันของต้นทุน

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ได้จากการนำค่ากระแสเงินสดสุทธิของแต่ละปี มาเทียบให้เป็นมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิโดยใช้อัตราส่วนลดที่กำหนดขึ้น กระแสเงินสดสุทธิที่จะนำมาเทียบเป็นมูลค่าปัจจุบันจะคำนวณตั้งแต่ปีที่คาดว่าจะเริ่มดำเนินการ โดยคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{i=1}^{n}(NCF_i \times a_i) \qquad (3)$$

$NPV = (NCF_1 x a_1) + (NCF_2 x a_2) + (NCF_3 x a_3) + \ldots + (NCF_n x a_n)$

โดยที่ NCF_i = กระแสเงินสดสุทธิของโครงการ ในปีที่ 1, 2, 3,...n

a_i = แฟกเตอร์ส่วนลด ในปีที่ 1, 2, 3,...n

การคิดมูลค่าปัจจุบันจะคิดตลอดอายุโครงการ ซึ่งในทางปฏิบัติจะกำหนดอายุโครงการให้เท่ากับอายุการใช้งานของสินทรัพย์ถาวรที่คิดว่าจะเป็นส่วนสำคัญของโครงการซึ่งในโรงงานก็คือเครื่องจักรนั่นเอง เกณฑ์ในการตัดสินใจคือ กรณีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ แสดงว่าโครงการนั้นไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ถ้ากรณีที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 0 หรือมากกว่า จะรับโครงการลงทุนนั้นหรือกว่างได้ว่าจะรับโครงการลงทุนที่มีมูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับเท่ากับหรือมากว่ามูลค่าปัจจุบันขิงเงินสดจ่าย

2.2) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ หมายถึง อัตราส่วนลดที่จะทำให้มูลค่าปัจจุบัน

ของกระแสผลตอบแทนที่จะได้รับ ในอนาคตเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินลงทุนนั้นพอดีหรือเป็นการพิจารณาว่าอัตราส่วนลด ไหนที่จะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นศูนย์

r ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลได้ – มูลค่าปัจจุบันของต้นทุน =0

อัตราผลตอบแทนการลงทุนเป็นอัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสดรับเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดจ่าย หรือ IRR เป็นอัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของรายรับจากโครงการเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของการลงทุน ดังนั้นมูลค่าปัจจุบันสุทธิจึงเท่ากับ 0 ซึ่งในการคำนวณ IRR ใช้สูตรคำนวณเดียวกับ NPV แต่แทนที่จะกำหนดอัตราดอกเบี้ยขึ้นมา เราจำหาอัตราดอกเบี้ยที่ทำให้ NPV เป็นศูนย์ อัตราส่วนลดตัวนี้เรียกว่า IRR และจะเป็นตัวเลขที่บอกผลกำไรของโครงการ การคำนวณหาน IRR นี้จะใช้วิธี trial and error โดยการเลือดอัตราส่วยลดอัตราหนึ่งมาคำนวณ

2.3) อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio: B/C Ratio) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนเปรียบเทียบกับ มูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุนตลอดอายุของโครงการภายใต้อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ พิจารณา

$$\text{B/C Ratio} = \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทน}}{\text{มูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุน}}$$

ในการลงทุนใดๆ ก็ตามผู้ลงทุนต่างก็คาดหวังว่าจะได้รับผลตอบแทนคุ้มค่ากับทุนที่ได้ลง แต่เหตุการณ์ในอนาคตเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน สามารถผันแปรไปในทิศทางต่างๆ ได้ทั้งในด้านพึงประสงค์หรือไม่พึงประสงค์ ถ้าเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นโอกาสได้รับผลตอบแทนน้อยกว่าที่คาดหวังไว้ก็อาจเปลี่ยนไปซึ่งอาจไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

บทที่ 3
อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์การทดลองและสารเคมี

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1) น้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ของบริษัทพิทักษ์ปาล์มออยล์ จำกัด ดังภาพที่ 3-1

2) ตะกอนจุลินทรีย์ใช้เป็นหัวเชื้อในกระบวนการหมัก ทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำเสีย ภายในระบบผลิตแก๊สชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มพิทักษ์ปาล์มออยล์ จำกัด ดังภาพที่ 3-2

3) น้ำกลั่น

3.1.2 สารเคมี

1. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ COD เป็นสารเคมีระดับ AR grade
2. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ BOD_5 เป็นสารเคมีระดับ AR grade
3. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันและไขมัน เป็นสารเคมีระดับ AR grade
4. สารเคมีในการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ

3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง

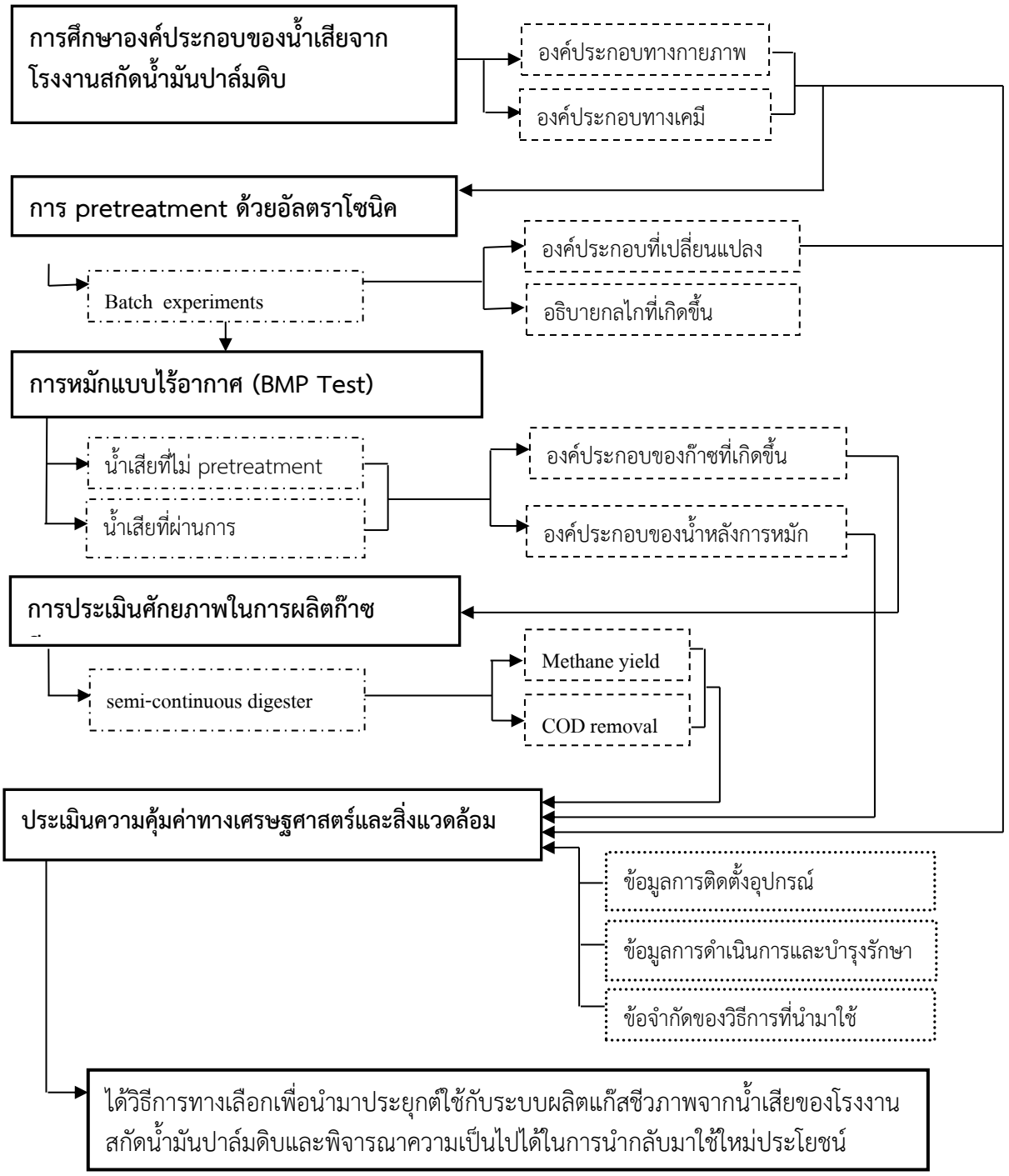
1. ชุดอุปกรณ์การทดลองอัลตราโซนิค ดังแสดงในภาพที่ 3-3
2. ชุดอุปกรณ์การกรองด้วยเมมเบรน ดังแสดงในภาพที่ 3-4
3. Hot plate ยี่ห้อ PNP รุ่น C-MAG-HS7 ประเทศที่ผลิต USA
4. ซีโอดี reactor ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 839800 ประเทศที่ผลิต Romania
5. เครื่องชั่ง
   - เครื่องชั่งแบบละเอียด 0.01 กรัม รุ่น PG5002-5 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ประเทศที่ผลิต Switzerland
   - เครื่องชั่งแบบละเอียด 0.001 กรัม รุ่น PG410 ยี่ห้อ OHAUS ประเทศที่ผลิต USA
6. pH meter รุ่น RL150 ยี่ห้อ Russell ประเทศที่ผลิต USA
7. ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert ประเทศที่ผลิต Germany
8. Incubator ควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C รุ่น 2020 ยี่ห้อ SHEL-LAB
9. ถังพลาสติกความจุ 20 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 นิ้ว

ภาพที่ 3-1 น้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ภาพที่ 3-2 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นหัวเชื้อในกระบวนการหมัก

ภาพที่ 3-3 ชุดทดลองอัลตราโซนิค

3.2 ภาพรวมของวิธีดำเนินการวิจัย



3.2.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมน้ำเสีย

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยเก็บจากบ่อก่อนเข้าระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่ ด้วยการเก็บแบบจ้วง (Grab sample) แล้วทำการเก็บรักษาโดยการแช่เย็นที่ 4°C เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียในการทำการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมน้ำเสียตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง ทำโดยการตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมันและไขมันตามธรรมชาติโดยเฉลี่ยจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นแยกไขมันที่ลอยตัวอยู่ด้านบนออกจากน้ำเสียส่วนล่าง (ภาพที่ 3-4) น้ำเสียส่วนล่างนี้จะถูกนำมาใช้ในการทำการทดลองในขั้นตอนถัดไป

ภาพที่ 3-4 แสดงการแยกชั้นไขมันในขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียตั้งต้น

3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของน้ำเสีย

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียรวมและน้ำเสียส่วนล่างที่ได้แยกชั้นไขมันออกแล้ว โดยจะนำมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น pH TS SS VS BOD_5 COD Oil & Grease และสี โดยวิธีตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22th Edition (APHA, AWWA and WEF, 2005) และ World Environment Center (2540) ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการด้านสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 3-1 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	Parameters	Method
1.	พีเอช (pH)	pH Meter
2.	บีโอดี (BOD_5)	5-Day BOD Test
3.	ซีโอดี (COD)	Close Reflux , Titration Method
4.	ของแข็งทั้งหมด (TS)	Gravimetric Method
5.	ของแข็งแขวนลอย (SS)	Gravimetric Method
6.	ของแข็งระเหยง่าย (VS)	Gravimetric Method
7.	น้ำมันและไขมัน	Soxhlet Method
8.	สี	ADMI Weighted Ordinate Spectrophotometric Method
9.	น้ำตาลรีดิวซ์	Dinitrosalicylic acid (DNS) method

ที่มา: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22th Edition (APHA, AWWA and WEF, 2012)

3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

น้ำเสียที่ผ่านการเตรียมตามขั้นตอนที่ 3.2.1 จะนำมาทำการวิเคราะห์หาค่าของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟีนอล แทนนินและลิกนิน ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน วิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 วิธีการวิเคราะห์ สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และลิกนิน

Chemicals in POME	Method	Reference
Total phenolic	Folin-Ciocaiteau Method (Spectrophotometer 765 nm)	Ergul *et* al., 2011
Phenols	Spectrophotometer 500 nm (Colorimetric method)	Standard method (APHA, AWWA, and WEF, 2012)
Tannin and Lignin	Spectrophotometer 700 nm (Colorimetric method)	Standard method (APHA, AWWA, and WEF, 2012)
Flovanoind	Spectrophotometer, 415 nm (Dowd method)	Ramamoorthy and Bono (2007) และ Meda *et al.,* (2005)
Anthocyanin	Spectrophotometer 520-700 (pH differential method)	Huang *et al.,* (2009)

3.2.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (โดยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) method)

วิธีการนี้ สามารถใช้ตรวจหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีปริมาณอยู่ในช่วงระหว่าง 5–500 ไมโครกรัมของน้ำตาลกลูโคส โดยการต้มน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายด่างที่มีกรดไดไนโตรซาลิไซลิค (3,5-dinitrosalicylic acid) อยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้สารละลายมีสีเข้มขึ้นและสามารถดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 500–550 นาโนเมตร ซึ่งเชื่อว่าสีของผลิตภัณฑ์นั้นเกิดจากกระบวนการรีดักชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของ 3,5-dinitrosalicylic acid ไปเป็น 3-amino-5-nitrosalicylic acid ซึ่งปฏิกิริยานี้ จะดำเนินไปจนกว่าสารตั้งต้นคือน้ำตาลรีดิซ์จะหมด

อุปกรณ์และสารเคมี

1. KNa tartrate
2. Na_2Co_3 anhydrous
3. $Cu_2SO_4.5H_2O$
4. Na_2SO_4
5. $NaHCO_3$
6. Ammonium molybdate
7. H_2So_4 (96%)
8. $Na_2HAsO_4.7H_2O$
9. สารละลายกลูโคสมาตรฐาน 200 ppm
10. Volumetric flask
11. ขวดสีชา

วิธีการหา

<u>การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (calibration curves of reducing sugar)</u>

1. เตรียมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก 2 กรัม ฟีนอล 0.4 กรัม โซเดียมซัลไฟต์ 0.1 กรัม และโซเดียมโพแทสเซียมทาร์เทรต 40 กรัม ลงไปผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 200 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายมาตรฐานกลูโคสที่เตรียมไว้ใน มาวิเคราะห์หา ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคสแต่ละความเข้มข้น (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จาก stock solution ของสารละลายมาตรฐานกลูโคส) มา 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิด
3. เติมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก ที่เตรียมไว้ในข้อ 1) จำนวน 2 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้สารผสมกันประมาณ 2 นาที นำสารละลายที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่

อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลายในหลอดทดลองไปหล่อเย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำแข็ง

4. นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วย เครื่อง UV-Visible spectrophotometer
5. สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยการสร้าง กราฟเส้นตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสง (แกน Y) และความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐานกลูโคส (แกน X) วิเคราะห์หาสมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2)

<u>การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar analysis)</u>

1. ปิเปตสารตัวอย่างที่ต้องการทำการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มา 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิด เติมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก ที่เตรียมไว้จำนวน 2 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองข้างต้น จากนั้นเขย่าให้สารผสมกันประมาณ 2 นาที นำสารละลายที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้ว นำสารละลายในหลอดทดลองไปหล่อเย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำแข็ง
2. นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วย เครื่อง UV-Visible spectrophotometer
3. คำนวณและวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ จากกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ดังแสดงในภาคผนวก ก ภาพประกอบ ก-1

3.2.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีโนลิกทั้งหมด โดยใช้ วิธี Folin-Ciocalteu colorimetric (Ergul *et* al., 2011)

นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ โดยถ้าสารละลายขุ่นนำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมา

1. วิเคราะห์เจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนที่ต้องการ ปริมาตร 0.30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดสีชาขนาดเล็ก

2. เติมสารละลาย 10% (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) Folin-Ciocalteu Reagent ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 7.5% Na_2 CO_3 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ในน้ำกลั่น ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้ สารละลายผสมกัน และตั้งไว้ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที (ถ้าสารละลายขุ่นนำไปปั่นเหวี่ยงและนำเอา สารละลายใสมาวิเคราะห์)

3. เมื่อเกิดปฏิกิริยาสารละลาย จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดค่า การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด จากกราฟมาตรฐานปริมาณกรดแกลลิก ในช่วง 50–200 ไมโครกรัม โดยหน่วยที่ได้จะเป็นไมโครกรัมกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรของตัวอย่าง

3.2.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (Ramamoorthy and Bono (2007)

1. เตรียมตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์

2. ปิเปตสารละลายปริมาตร 25 µl ผสมกับ 95% ethanol ปริมาตร 75 µl ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติม 10% Aluminium Chloride ปริมาตร 5 µl กับ 1M potassium acetate ปริมาตร 5 µl และน้ำกลั่น ปริมาตร 140 µl ผสมให้เข้ากัน

3. ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm.

4. นำค่าที่ได้มาคำนวณปริมาณ จากกราฟมาตรฐาน รายงานผลเป็นปริมาณ (mg/L catechin equivalent, CE)

3.2.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินรวม โดยใช้ วิธี pH differential method (Huang *et al.,* 2009)

1. เตรียม pH 1.0 buffer ด้วย 0.025 M KCl และ pH 4.5 buffer ด้วย 0.4 M CH_3COONa

2. นำสารละลายที่เตรียมไว้ไปเขย่า ปรับ pH 1 และ pH 4.5 แล้วค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 nm และ 700 nm

3. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานิน ซึ่งจะแสดงในรูปของ cyanidin-glucoside โดยนำมาหักลบกัน เพื่อกำจัดการดูดกลืนแสงจากสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่แอนโทไซยานิน และการวัด ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร เพื่อหักลบค่าความขุ่นที่อาจเกิดขึ้น เมื่อได้ค่าทั้งหมด นำไปหาปริมาณแอนโทไซยานิน ตามสมการ

$$\text{TA content} = (A \times Mw \times \text{dilution factor} \times 100)/(\boldsymbol{\varepsilon})$$

โดยที่ ; $A = (A_{510}-A_{700})_{pH\ 1.0} - (A_{510}-A_{700})_{pH\ 4.5}$

$Mw = 449.2$ g mol,

$\boldsymbol{\varepsilon} = 26{,}900$ M cm

A คือ (ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น สูงสุดของตัวอย่างที่ใส่สารละลาย บัฟเฟอร์ pH 1.0 – ค่าการดูดกลืนี่ความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ของตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0) – (ค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่นสูงสุดของตัวอย่างที่ ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.5 – ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ของตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.5)

MW คือ มวลโมเลกุล

ε คือ โมลาร์แอบซอบติวิตี้)Molar absorptivity) ค่านี้จะขึ้นกับชนิดของแอนโท-ไซยานินและตัวทำละลาย โดยใช้ค่าของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (Cyanidin-3-glucoside) ในสาร ละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0 ซึ่งเท่ากับ 26,900 M-1 cm^{-1}

3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัลตราโซนิค pretreatment

ทำการศึกษาผลของ Power density โดยใช้เครื่อง ultrasonic probe กำลัง 750 วัตต์ ความถี่ 20 kHz เส้นผ่านศูนย์กลาง probe ขนาด 1 นิ้ว น้ำตัวอย่างปริมาตร 250 มิลลิลิตร ความลึก probe ในตัวอย่าง 2 เซนติเมตร คำนวณค่ากำลังงานในหน่วยวัตต์ที่ให้แก่น้ำตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตร (W/ml) ได้ดังสมการที่ (1) ทำการปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ Amplitude ของคลื่น Ultrasound จะได้ค่า Power density ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3-3

$$\text{Power density} = \frac{P}{V} \quad (1)$$

โดยที่ P = Ultrasonic power (W)

V = Volume of sonicated wastewater (ml)

ตารางที่ 3-3 Ultrasonic density เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Amplitude (%)

Amplitude (%)	Ultrasonic Power (W)	Power density (W/ml)
20	15	0.060
30	25	0.100
40	38	0.152
50	54	0.216
60	64	0.256
70	68	0.272
80	78	0.312
90	110	0.440

ทำการศึกษาผลของ Ultrasonic dose โดยคำนวณค่าพลังงานที่ให้แก่น้ำตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตร (J/ml) ได้ดังสมการที่ (2) ทำการปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์ Amplitude ของคลื่น Ultrasound จะได้ค่า Ultrasonic dose ที่แตกต่างกัน

$$\text{Ultrasonic dose} = \frac{Pxt}{V} \quad (2)$$

โดยที่ t = Ultrasonic duration (min)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคาเบื้องต้นก่อนนำไปผลิตแก๊สชีวภาพคือนี้คือ SCOD BOD และน้ำตาลรีดิวซ์ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนคือ power input (W/ml) และsonication duration (min) ดังตารางที่ 3-4

ตาราง 3-4 สภาวะในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำ pretreatment น้ำเสียตัวอย่าง

พารามิเตอร์	**ช่วงค่า**	**หมายเหตุ**
Frequency (kHz)	20	คงที่
Probe immersed (cm)	2	คงที่
Volume (mL)	250	คงที่
Power input (W)	0.06-0.44	ปรับเปลี่ยน
Sonication duration (min)	0-180	ปรับเปลี่ยน

3.2.5 ศึกษาการหมักแบบไม่ใช้อากาศระดับหองปฏิบัติการ

3.2.5.1 ถังปฏิกรณแบบกะ

ในระบบหมักไมใชอากาศโดยใช้ขวดแก้ว ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตรการหมัก (working volume) 200 มิลลิลิตร ปดปากขวดดวยจุกยาง (septum) พันทับดวยแผนพาราฟน ทำการหมักภายใตอุณหภูมิ 35 °C เปนเวลา 16 วัน กวนผสมโดย magnetic stirrer ตลอดระยะเวลาการหมัก ทำการเก็บแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในขวดหมักทุก 12 ชั่วโมง และวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยแก๊สจะถูกสงผานสายยางซิลิโคนไปยังขวดแก้วบรรจุน้ำเพื่อแทนที่น้ำ (fluid displacement method) น้ำที่ถูกแทนที่จะไหลลงสูภาชนะรองรับน้ำ ปริมาตรน้ำที่แทนที่ดังกลาว เปนปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแตละวัน (ภาพ 3-5 และ 3-6) เก็บแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะหองคประกอบของแก๊สต่อไปดวยเครื่อง Gas chromatography (GC) โดยนำเปอรเซ็นมีเทนที่วัดไดในแตละชวงไปคูณกับแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเพื่อคำนวณหาปริมาณแก๊สมีเทนในแตละวัน เพื่อประเมินความเป็นไปได้และศักยภาพของหัวเชื้อและสารอาหาร

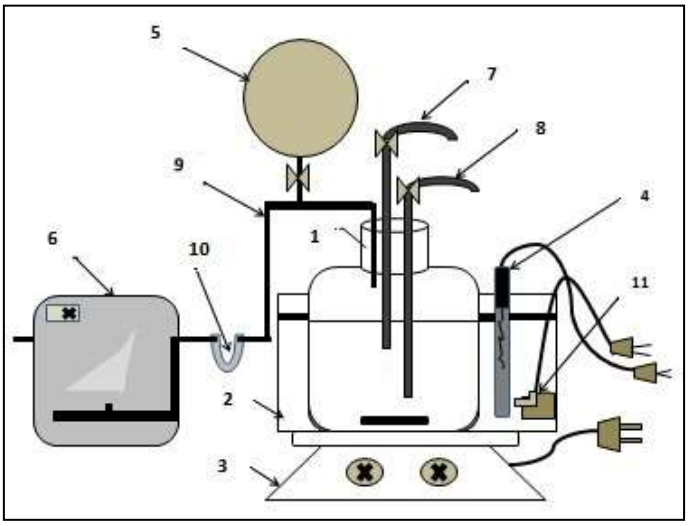
ภาพที่ 3-6 การหมักด้วยปฏิกรณ์แบบกะ (Batch)

ภาพที่ 3-7 การวัดปริมาณแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการแทนที่น้ำ

3.2.5.2 ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งตอเนื่อง

การทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไมใช่อากาศโดยการทดลองในระบบ CSTR (completely stirred tank reactor) แบบ semi-continuous การประกอบชุดถังปฏิกรณ์ดังแสดงในภาพ 3-7 และ 3-8 โดยควบคุมสภาวะการทดลองสำหรับการหมักแบบไมใชอากาศที่อุณหภูมิ 35± 1 ºC ควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำเพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิให่คงที่ กำหนดค่าorganic loading ในการหมักของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 2 g $VS_{substrate}$ g^{-1} VS_{seed} ในถัง

ปฏิกรณ์ขนาด 2.5 l โดยการปรับเปลี่ยนระยะเวลากักพัก (Retention time) ต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 3-5 ซึ่งมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์อยู่ในชวง 1.0-6.3 gVS/L /day



ภาพที่ 3-7 แบบจำลอง semi-continuous stirred digester ที่ใช้ในการทดลอง (1) reactor 3L; (2) water bath; (3) stirrer; (4) heater (35°C); (5) gas collection balloon; (6) gas counter; (7) feed port; (8) sampling port; (9) gas port ; (10) septum and U-tube ; (11) submerge pump

ภาพที่ 3-8 การทดลองระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบCSTR

ตารางที่ 3-5 ระยะเวลากักเก็บ และปริมาตรของเสียที่เติม-ออกในแต่ละวันในการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง semi-continuous stirred digester

ชนิดการ pretreatment	**ปริมาตรของเหลวในการหมัก (ml)**	**ระยะเวลากักเก็บ (HRT)**	**ปริมาตรของเสียที่เติม-ออกในแต่ละวัน**
Sedimentation (SE)	2000	32	63
	2000	16	125
	2000	8	250
SE+Ultrasonic	2000	32	63
	2000	16	125
	2000	8	250

3.2.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด

ทำการหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดทดลอง โดยคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ E = Removal efficiency (%)

C_i = Influent concentration (mg/L)

C_e = Effluent concentration (mg/L)

ในการทดลองนี้จะใช้ค่า ซีโอดี และ น้ำมันและไขมัน เป็นตัวแทนของปริมาณน้ำมันในเฟสน้ำ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี closed reflux และ soxhlet extraction meth0ds ตามลำดับ

3.2.6 ศึกษาความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

กิจกรรมนี้จะแสดงการประเมินความคุ้มค่าในทางเทคนิคและปัจจัยอื่นๆ เพื่อประกอบการตัดสินใจ เช่น ราคาและความยากง่ายในการดำเนินการ การบำรุงรักษาและประสิทธิภาพการบำบัดในระยะยาว เป็นต้น รวมถึงการประเมินทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการขยายผลในระดับ pilot scale เพื่อใช้เป็นข้อมูลทางด้านวิศวกรรมสำหรับออกแบบในระดับในโรงงาน

1. รวบรวมข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งราคาอุปกรณ์ที่จำเป็น ค่าติดตั้งและการดำเนินการ

2. เชื่อมโยงโดยนำผล optimize อัลตราโซนิคมาใช้ในการประเมินเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายของโครงการแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost) ต้นทุนหรือกระแสเงินสดจ่าย มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

ต้นทุนรวม = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน + ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

Total Cost = Investment Cost + Operation Cost

3.2.6.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน หมายถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนในคราวแรก และไม่ต้องลงทุนเพิ่มในช่วงอายุของโครงการ เช่น

1) ค่าก่อสร้างอาคาร

2) ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่ใช้ในการดำเนินงาน

3.2.6..2 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost)

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเช่น

1) เงินเดือนพนักงาน

2) ค่าโทรศัพท์

3) ค่าไฟฟ้าค่าวัตถุดิบในการผลิตก๊าซ

4) ค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น

3.2.6..3 เกณฑ์การตัดสินใจเพื่อการลงทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

ซึ่งจากกิจกรรมการทดลองและข้อมูลจากการรวบรวมทั้งหมดจะทำให้ทราบค่าการลงทุนเบื้องต้น ระยะเวลาคืนทุน เพื่อใช้ในการตัดสินใจนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการบำบัดที่มีอยู่ได้

3.2.7 พิจารณาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ประโยชน์

พิจารณาความเป็นไปได้ในการนำน้ำหลังผ่านการบำบัดตามที่เสนอมาใช้ประโยชน์ หรือพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำขั้นสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือปล่อยทิ้งตามกฎหมายเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของน้ำทิ้งสุดท้ายหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบที่เสนอตามโครงการ

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

4.1.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสีย (Wastewater Characteristics)

ตัวอย่างน้ำเสียที่เลือกนำมาศึกษาครั้งนี้เก็บจากบ่อพักน้ำเสียรวมก่อนเข้าระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งน้ำในส่วนนี้ได้ผ่านบ่อ Oil skimming มาแล้วขั้นตอนหนึ่งเพื่อเก็บกวาดน้ำมันที่เกิดการแยกชั้นขึ้นเองตามธรรมชาติและลอยตัวขึ้นสู่พื้นผิวของบ่อ น้ำเสียจะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ เช่น pH BOD_5 COD TSS SS และปริมาณน้ำมัน ทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างโดยวิธีตาม Standard Methods (APHA, 2012) รายละเอียดผลการวิเคราะห์ในรูปค่าเฉลี่ยดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4-1 อธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	น้ำเสียรวม	น้ำเสียเมื่อผ่านการแยกชั้นไขมันออก
pH	4.85±0.50	5.43±0.50
TS (g/L)	70.14±0.30	42.01±0.10
VS (g/L)	49.10±0.20	29.31±0.10
SS (g/L)	21.74±0.20	12.78±0.10
VSS (g/L)	15.22±0.10	8.97±0.10
Oil&Grease (g/L)	10.16±0.50	8.27±0.50
TCOD (g/L)	98.52±1.10	88.08±1.20
SCOD (g/L)	19.53±0.20	21.42±0.20
BOD_5 (g/L)	52.48±1.30	49.02±1.20
Reducing sugar (g/L)	4.36±0.02	4.30±0.02
Color (ADMI)	3,250±10.00	2,989±9.00

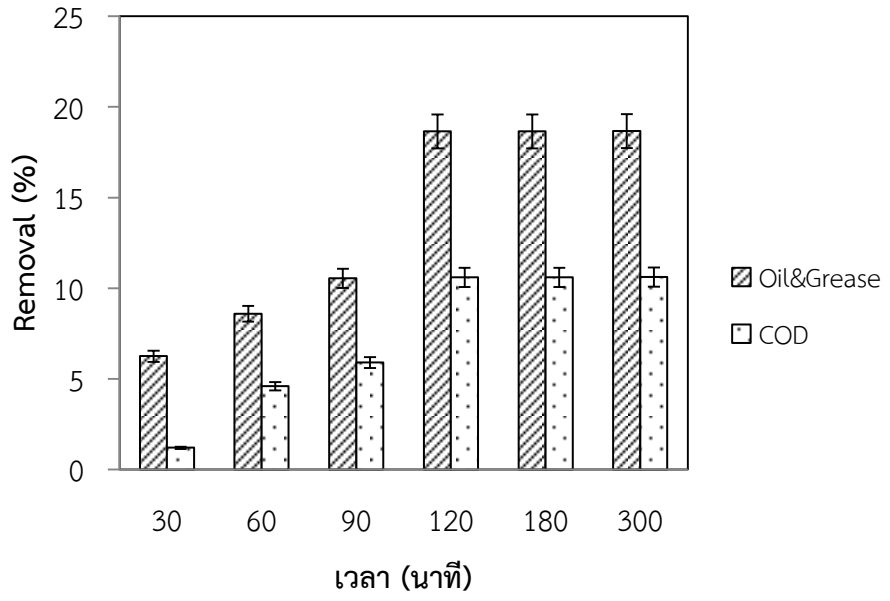
ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโดยรวมพบว่า มีค่า pH ต่ำโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.85 ปริมาณของแข็งแขวนลอย 21,740 mg/L ปริมาณของแข็งทั้งหมด 70,140 mg/L ซีโอดี เท่ากับ 98,520 mg/L BOD_5 เท่ากับ 52,480 mg/L และปริมาณน้ำมันและไขมัน 10,160 mg/L ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนี้น้ำเสียมีค่า ซีโอดี ปริมาณน้ำมันและไขมันสูง แสดงว่ามีการสูญเสียน้ำมันไปกับน้ำเสียปริมาณหนึ่ง จึง

เป็นสิ่งจำเป็นที่ทางโรงงานพยายามนำน้ำมันที่สูญเสียเหล่านั้นกลับมาขายเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าได้ แม้ว่าจะได้ราคาที่ถูกกว่าน้ำมันปาล์มดิบเกรดที่ผลิตได้ก็ตาม เป็นการลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง และอีกประการหนึ่งคือเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบลดลง (Igwe and Onyegbado., 2007)

4.1.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการตั้งไว้ให้แยกชั้นตามธรรมชาติ

การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการตั้งไว้ให้แยกชั้นตามธรรมชาติเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในปัจจุบันที่ทางโรงงานเลือกใช้โดยมักเรียกว่า ถังแยกน้ำมันหรือถังตกจม เป็นลักษณะของการทิ้งให้ไขมันหรือน้ำมันแยกชั้นออกจากน้ำตามธรรมชาติ โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะมีระยะเวลากักเก็บอยู่ที่ 5 ถึง 12 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการผลิตและขนาดของถังพักเพื่อให้เกิดการแยกชั้นที่ดี (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ และพิสุทธิ์ เพียรมนกุล, 2554)

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาระยะเวลาการแยกน้ำมันด้วยการตั้งไว้ให้แยกชั้นตามธรรมชาติที่ระยะเวลา 0.5 ถึง 5 ชั่วโมง ลักษณะน้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียรวม เมื่อตั้งไว้ให้แยกชั้นตามธรรมชาติที่ระยะเวลาต่างกัน พบว่าต้องใช้เวลานานจึงค่อยๆเกิดการแยกชั้นขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการลดลงของ ซีโอดี และ น้ำมันและไขมัน พบว่าจะเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ที่ระยะเวลากักพัก 2 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.59 และ 18.60 ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ประสิทธิภาพการลดลงของน้ำมันและไขมัน และซีโอดี ที่ระยะเวลา 0.5 ถึง 5 ชั่วโมง

4.1.3 ลักษณะของน้ำมันหลังการแยกชั้นตามธรรมชาติ

จากการศึกษาลักษณะของน้ำมันในตัวอย่างน้ำหลังการตั้งให้เกิดการแยกชั้นเองตามธรรมชาติด้วยกล้องจุลทรรศน์ Microscope (ภาพที่ 4-2) ซึ่งบริเวณ Stage micrometer จะมีขีดแบ่งไว้ 100 ช่อง แต่ละช่องกว้าง 0.01 มิลลิเมตร มีขีดยาวทุก 10 ช่อง แต่ไม่มีตัวเลขกำกับ ลักษณะของน้ำมันในตัวอย่างพบว่ามีขนาดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.01 มิลลิเมตร - 0.1 มิลลิเมตร กระจายอยู่ทั่วไป แสดงให้เห็นว่าน้ำมันส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างนี้มีเสถียรภาพ เนื่องจากขนาดของน้ำมันที่ต่ำกว่า 10 ไมครอน หรือ 0.01 มิลลิเมตร จัดว่าเป็นน้ำมันที่มีความคงตัว (สุดสิริ ฐิตสุภวัฒน์ และ พิสุทธิ์ เพียรนกูล, 2554)

ภาพที่ 4-2 ลักษณะของน้ำมันในน้ำเสียตัวอย่างส่วนล่างหลังการตั้งให้เกิดการแยกชั้นเองตามธรรมชาติ (กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 100 เท่า)

น้ำเสียลักษณะเช่นนี้หากต้องการแยกน้ำมันให้ได้มากจะต้องการเวลานาน ส่งผลให้ขนาดของถังพักแยกน้ำมันต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถใช้กระบวนการทางกายภาพเคมีเช่น การลอยตะกอน (Dissolved air flotation;DAF) โคอะเลสเซอร์ หรืออัลตราโซนิเคชัน เพื่อเร่งการแยกน้ำมันให้เร็วและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ ซึ่งอาศัยกระบวนการทางกายภาพเพื่อแยกน้ำมันในน้ำให้แยกตัวออกจากน้ำ จึงไม่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและชีวภาพของปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ปนกับน้ำมันแต่อย่างใด

4.1.4 สัดส่วนโดยประมาณองค์ประกอบในน้ำเสีย

ในการทดลองนี้พบว่าน้ำเสียเริ่มต้นมีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนอยู่ร้อยละ 1.02 (W/V) ดังแสดงในตารางที่ 4-2 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamed และคณะ (2012) เกี่ยวกับองค์ประกอบน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในมาเลเซีย พบว่าจะมีองค์ประกอบของน้ำมันอยู่ประมาณร้อยละ 0.5-2.0 และมีของแข็งทั้งหมดอยู่ร้อยละ 7.01 (W/V) เมื่อตั้งไว้ให้แยกชั้นตามธรรมชาติที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าน้ำเสียมีสัดส่วนขององค์ประกอบของของแข็ง และน้ำมันและไขมัน ที่เปลี่ยนไปโดยมีค่าการปนเปื้อนอยู่ที่ร้อยละ 4.20 และ 0.83 (W/V) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 สัดส่วนโดยประมาณองค์ประกอบในน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบในน้ำเสีย	**เปอร์เซ็นต์ (W/V)**	
	น้ำเสียรวม	**น้ำเสียเมื่อผ่านการแยกชั้นไขมันออก**
Water	91.97	94.97
Total solids	7.01	4.20
Oil and grease	1.02	0.83

ดังนั้นจากลักษณะของน้ำเสียตัวอย่างซึ่งมีการปนเปื้อนของมลสารอื่นๆอีก หลังจากผ่านการแยกน้ำมันแล้วซึ่งจะต้องมีการบำบัดขั้นต่อไป เช่น บ่อบำบัดแบบไร้อากาศ บ่อเติมอากาศ เป็นต้น เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์หรือของแข็งแขวนลอยให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง

4.1.5 สารประกอบอินทรีย์และกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

สารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างของสารอินทรีย์ต่างๆ ในผลปาล์มอันเนื่องจากการให้ความร้อนในขั้นตอนการนึ่งปาล์มและการแตกตัวขององค์ประกอบจากขั้นตอนการหีบอัด โดยสารอินทรีย์และรงควัตถุที่มีอยู่ในผลปาล์มจะถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำเนื่องจากเซลล์ของผลปาล์มถูกทำลาย (พูนสุข ประเสริฐสรรพ์ และคณะ, 2544) โดยสารที่พบว่ามีรายงานการปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนินและลิกนิน ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน ซึ่งการตรวจวิเคราะห์เพื่อทราบองค์ประกอบและปริมาณของสารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ และการเลือกวิธีการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพในขั้นตอนต่อไป

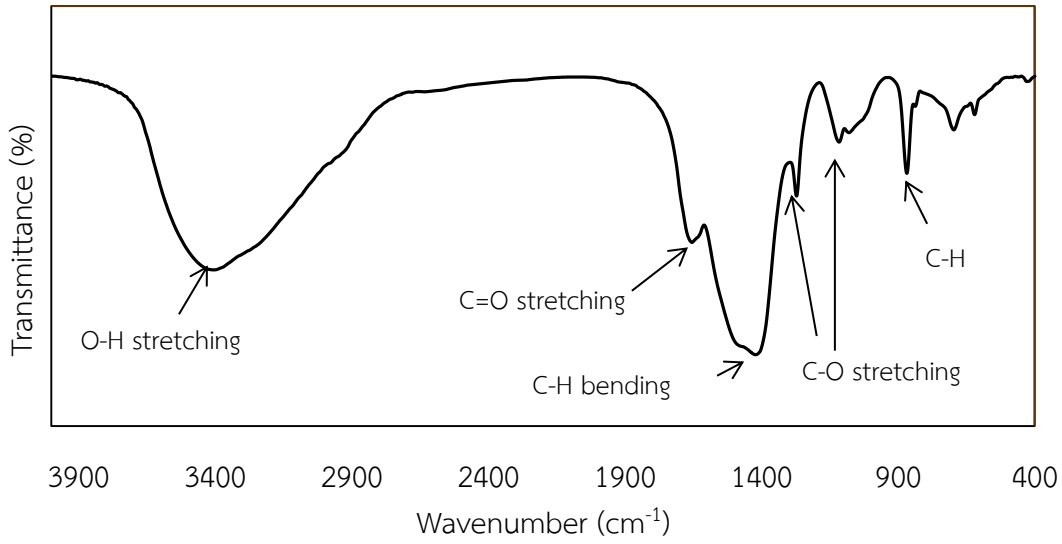
ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Ergul *et* al., 2011) แทนนินและลิกนิน (APHA, 2012) ฟลาโวนอยด์ (Ramamoorthy and Bono, 2007) และแอนโทไซยานิน (Huang *et al.,* 2009) ในน้ำเสียที่ผ่านการแยกชั้นไขมันออกแล้วของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ดังแสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าปริมาณสารที่ตรวจพบมีค่าเท่ากับ 4.84 g/L 0.30 g/L 0.87 g/L 1.518 g/L และ 0.03 g/L ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนินและลิกนิน ฟลาโวนอยด์ และแอนโท-ไซยานินในน้ำเสียตัวอย่าง

องค์ประกอบสารอินทรีย์ในน้ำเสีย	**ความเข้มข้น**
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (g/L Gallic acid equivalent)	4.839±0.020
สารประกอบฟีนอล (g/L phenol equivalent)	0.308±0.030
แทนนินและลิกนิน (g/L Tannic acid equivalent)	0.879±0.022
ฟลาโวนอยด์ (g/L Catechin equivalent)	1.518±0.015
แอนโทไซยานิน (g/L cyanidin-3-glucoside equivalent)	0.031±0.002

นอกจากนี้ยังได้ตรวจวัดค่า Humic substances พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.99 g/L ซึ่งการแปรสภาพของสารอินทรีย์ไปเป็นสารฮิวมิคเป็นกระบวนการที่มีหลายขั้นตอนรวมกัน และมีการเกิดได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สภาพแวดล้อม และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง กระบวนการเกิดสารฮิวมิคพอสรุปได้ 4 กระบวนการดังนี้คือ 1) เกิดจากลิกนิน ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ 2) ลิกนินสลายตัวเป็นควิโนน (Quinone) แล้วจึงรวมกับโปรตีนให้ กรดฮิวมิค 3) เซลลูโลสซึ่งสลายตัวเช่นเดียวกับกระบวนการที่ 2 เป็น ควิโนน แล้ว จึงรวมกับโปรตีนให้กรดฮิวมิค 4) เกิดจากน้ำตาลรวมกับโปรตีนให้กรดฮิวมิค

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จะพบหมู่ฟังก์ชันทั้ง aromatic และ aliphatic เช่นกัน คือตรวจพบที่ความถี่ 3,400 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group (O-H stretching) ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H aliphatic bending ความถี่ 1,080, 1,116 และ 1,272 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching พวกอีเทอร์และเอสเทอร์ และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงใน ภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

โดยหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบในน้ำทิ้งนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถพบได้ในลิกนิน โพลีแซคคาไรด์ โปรตีนจากพืช และเฮมิเซลลูโลส ที่ส่งผลทำให้เกิดสีในน้ำทิ้งได้ (Ahmad *et al*., 2008; Limkhuansuwan and Chaiprasert, 2010; Rakamthong and Prasertsan, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Alriols *et al*. (2009) โดยทำการวิเคราะห์ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจากทะลายปาล์มเปล่า ซึ่งในลิกนินตรวจพบความถี่ 1,600 1,515 และ 1,425 cm^{-1} ที่จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic phenyl propane ความถี่ 3,400 และ 1,030 cm^{-1} จัดเป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic และ aliphatic hydroxyl ความถี่ 2,925 2,850 และ 1,460 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H aliphatic bonds ความถี่ 1,450 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม aromatic methyl ความถี่ 1,365 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม phenolic hydroxyl และ ความถี่ 1,715 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม non-conjugated carbonyl ส่วนเฮมิเซลลูโลส ตรวจพบความถี่ 3,400 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม O-H ความถี่ 2,920 และ 1,470 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-H stretching ของ methyl หรือ methylene ความถี่ 1,740 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม acetyl และ

uronic ester ความถี่ 1,640 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C=O stretching และความถี่ 1,200-1,000 cm^{-1} จัดเป็นกลุ่ม C-OH และ C-O-C

หมู่ฟังก์ชันที่ทำการการตรวจพบ ได้แก่ O-H C-H C-O C=O แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของสารชีวโมเลกุลประเภท คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน โดยคาร์โบไฮเดรตเป็นสารอินทร์ที่มีหมู่คาร์บอกซาลดีไฮด์ (C-OH) และหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) เป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น น้ำตาลกลูโคส กาแลกโตส และไรโบส เป็นต้น หรือมีหมู่คาร์บอนิล (C-O) และหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) เป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น น้ำตาลฟรุ๊กโตส

โมโนแซ็กคาไรด์ที่เกิดในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีจำนวนคาร์บอน 5-6 อะตอม ยกตัวอย่างเช่น กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 180 กรัมต่อโมล อย่างไรก็ตามสารคาร์โบไฮเดรตในธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสใดๆ ส่วนใหญ่จะยังคงมีสภาพอยู่ในรูปของแข็ง เนื่องจากการมีโมโนแซ็กคาไรด์จำนวนมากมายต่อรวมกันตั้งแต่ 2-50,000 โมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ ทำให้มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นเส้นใยไม่ละลายน้ำ

การเรียงสลับระหว่างพันธะคู่กับพันธะเดี่ยวโดยเฉพาะเมื่อจำนวนพันธะคู่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้โมเลกุลดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นยาวขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า red shift คือระดับพลังงานสภาวะของอิเล็กตรอนเข้าใกล้กันมากขึ้น เป็นผลให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอนจาก bonding orbital ไปยัง antibonding orbital มีค่าลดลง จึงทำให้ความเข้มข้นของการดูดกลืนรังสีจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการจำแนกหมู่ฟังก์ชันของน้ำเสียด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันกลุ่มที่เป็นพันธะคู่อยู่ จึงเป็นที่มาของสีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

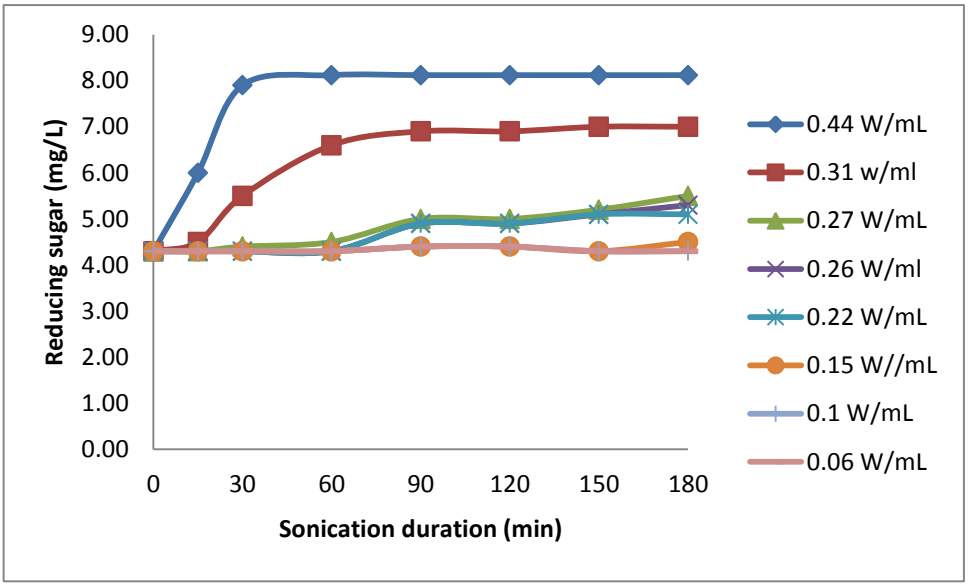
4.2 ศึกษาสภาวะในการทำ Ultrasonic pretreatment

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคาเบื้องต้นก่อนนำไปผลิตแก๊สชีวภาพคือนี้คือ SCOD BOD และน้ำตาลรีดิวซ์ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนคือ power input (W/ml) และsonication duration (min) น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาทำการศึกษามีสภาวะเริ่มต้นที่ SCOD เท่ากับ 21.44 g/L BOD5 เท่ากับ 49.02 g/L และน้ำตาลรีดิวซ์ 4.30 g/L

จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ คือ SCOD BOD และน้ำตาลรีดิวซ์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำโซนิเคชัน และเมื่อเพิ่ม power input ที่ให้กับน้ำตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ SCOD BOD_5 และน้ำตาลรีดิวซ์ ก็จะแปลผันตามเช่นกัน ทั้งนี้วิธีการ ultrasonic pretreatment ตามที่เสนอเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะในขั้นตอนของกระบวนการไฮโดรลิซิสซึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่หรือโมเลกุลเชิงซ้อน ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงหรือโมเลกุลเชิงเดี่ยว จากการทดลอง pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค พบว่าเมื่อพิจารณาจากพารามิเตอร์ SCOD BOD_5 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น และจะเห็นการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 reducing sugar ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration

Power Input (W/ml)	reducing sugar (g/L)							
	t = 0	t = 15	t = 30	t = 60	t = 90	t = 120	t = 150	t = 180
0.06	4.30	4.30	4.30	4.30	4.40	4.40	4.30	4.30
0.10	4.30	4.30	4.30	4.30	4.40	4.40	4.30	4.30
0.15	4.30	4.30	4.30	4.30	4.40	4.40	4.30	4.50
0.22	4.30	4.30	4.30	4.30	4.90	4.90	5.10	5.10
0.26	4.30	4.30	4.30	4.30	4.90	4.90	5.10	5.30
0.27	4.30	4.30	4.40	4.50	5.00	5.00	5.20	5.50
0.31	4.30	4.50	5.50	6.60	6.90	6.90	7.00	7.00
0.44	4.30	6.00	7.90	8.12	8.12	8.12	8.12	8.12

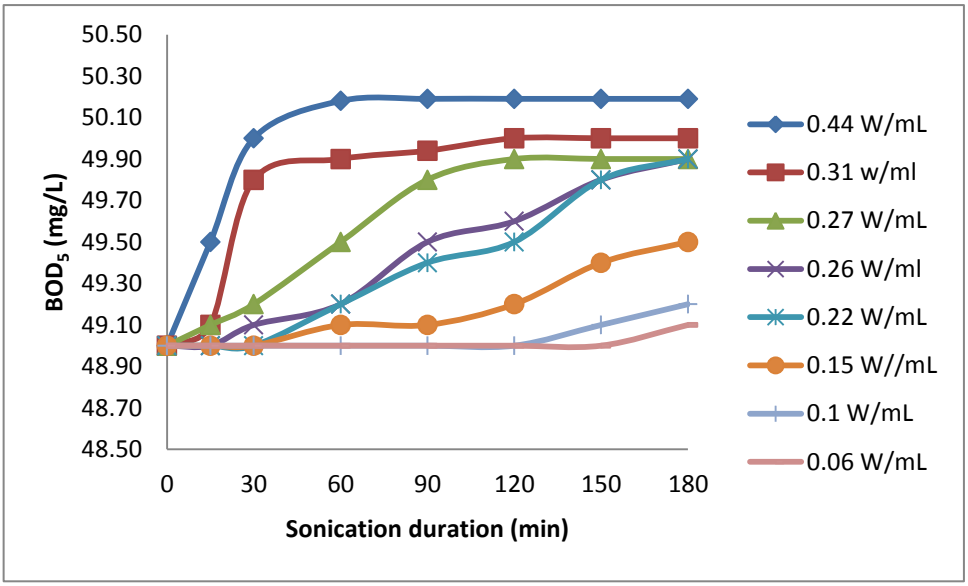


ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication duration กับปริมาณ reducing sugar ที่วัดได้เมื่อpretreatment ด้วยอัลตราโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml

ผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่มีความโดดเด่นโดยมีปริมาณที่วัดได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากปริมาณเริ่มต้นคือน้ำตาลรีดิวซ์ โดยพบว่าเพิ่มขึ้นจาก 4.36 g/L เป็น 8.12 g/L ที่ power input 0.44 W/ml sonication durationที่ 30 นาทีเป็นต้นไป และในสภาวะนี้วัดค่าพารามิเตอร์ SCOD และ BOD_5 ได้สูงสุดเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ที่ 21.44 และ 50.19 g/L ตามลำดับ SCOD และ BOD_5 ที่ power input ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ถึง ตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-5 BOD_5 ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration

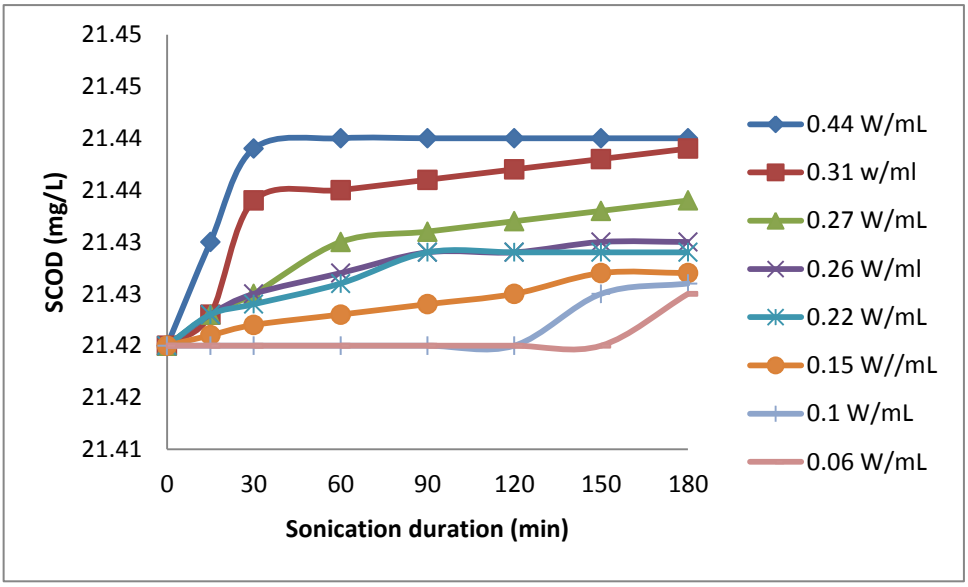
Powe Input (W/ml)	BOD_5 (g/L)							
	t = 0	t = 15	t = 30	t = 60	t = 90	t = 120	t = 150	t = 180
0.06	49.00	49.00	49.00	49.00	49.00	49.00	49.00	49.10
0.10	49.00	49.00	49.00	49.00	49.00	49.00	49.10	49.20
0.15	49.00	49.00	49.00	49.10	49.10	49.20	49.40	49.50
0.22	49.00	49.00	49.00	49.20	49.40	49.50	49.80	49.90
0.26	49.00	49.00	49.10	49.20	49.50	49.60	49.80	49.90
0.27	49.00	49.10	49.20	49.50	49.80	49.90	49.90	49.90
0.31	49.00	49.10	49.80	49.90	49.94	50.00	50.00	50.00
0.44	49.00	49.50	50.00	50.18	50.19	50.19	50.19	50.19



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication duration กับปริมาณ BOD_5 ที่วัดได้เมื่อ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml

ตารางที่ 4-6 SCOD ที่วัดได้เมื่อ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน Power Input และ sonication duration

Powe Input (W/ml)	SCOD (g/L)							
	t = 0	t = 15	t = 30	t = 60	t = 90	t = 120	t = 150	t = 180
0.06	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.43
0.10	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.43	21.43
0.15	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.43	21.43	21.43
0.22	21.42	21.42	21.42	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43
0.26	21.42	21.42	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43
0.27	21.42	21.42	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43
0.31	21.42	21.42	21.43	21.44	21.44	21.44	21.44	21.44
0.44	21.42	21.43	21.44	21.44	21.44	21.44	21.44	21.44



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง sonication time กับปริมาณ SCOD ที่วัดได้เมื่อ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคโดยใช้ power input ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.44 W/ml

จากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกราฟตามภาพที่ 4-4 ถึง ภาพที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าที่ สภาวะที่ sonication duration 30 ถึง 90 นาที power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml เป็นช่วงเวลาที่ค่าน้ำตาลรีดิวซ์ SCOD และ BOD_5 ที่วัดได้เริ่มมีค่าคงที่ ดังนั้นที่ช่วงเวลา 0 ถึง 90 นาที และ power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml จึงเป็น ช่วงสภาวะที่ใช้ในการพิจารณาระยะเวลาในการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค และ power input ที่เหมาะสม ในขั้นตอนต่อไปในการศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค

4.2.1 คุณสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค

น้ำเสียที่ผ่านการแยกไขมันชั้นบนออก (SE) ตามที่ได้รายงานในหัวข้อที่ 4.1.2 ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของกระบวนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค โดยนำน้ำเสียดังกล่าวมาทำการตรวจวิเคราะห์ก่อนและหลังผ่านเข้าสู่กระบวนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค พบว่าน้ำเสียก่อนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค มีค่าซีโอดี และ น้ำมันและไขมัน เฉลี่ยเท่ากับ 88,080±15 และ 8,270±10 mg/L ตามลำดับ ปรับ pH เท่ากับ 7 เพื่อใช้ในการดำเนินการทดลอง pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml ผลของลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ดังแสดงในตารางที่ 4-7 ถึง ตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-7 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค power input 0.27 W/ml

Parameter	Pretreated POME			
	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
pH	5.43±0.50	5.03±0.50	5.10±0.50	5.10±0.50
TS (g/L)	42.01±0.10	41.77±0.10	41.71±0.10	41.65±0.10
VS (g/L)	29.31±0.10	28.75±0.10	28.99±0.10	28.95±0.10
SS (g/L)	12.78±0.10	11.98±0.10	11.87±0.10	11.67±0.10
VSS (g/L)	8.97±0.10	7.20±0.10	7.21±0.10	7.21±0.10
Oil&Grease (g/L)	8.27±0.05	7.05±0.05	7.06±0.05	7.05±0.05
TCOD (g/L)	88.08±0.20	88.04±0.20	88.10±0.20	88.06±0.20
SCOD (g/L)	21.42±0.20	21.43±0.20	21.43±0.20	21.43±0.20
BOD_5 (g/L)	49.02±0.20	49.20±0.20	49.50±0.20	49.80±0.20
Reducing sugar (g/L)	4.30±0.02	4.40±0.02	4.50±0.02	5.00±0.02
Color (ADMI)	2,989±9.00	2,950±7.00	2,945±7.00	2,960±7.00

หมายเหตุ SE = การแยกชั้นตามธรรมชาติ
SE+US = การแยกชั้นตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค

ตารางที่ 4-8 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค power input 0.31 W/ml

Parameter	Pretreated POME			
	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
pH	5.43±0.50	5.33±0.50	5.31±0.50	5.12±0.50
TS (g/L)	42.01±0.10	41.60±0.10	41.75±0.10	41.66±0.10
VS (g/L)	29.31±0.10	28.95±0.10	28.79±0.10	28.78±0.10
SS (g/L)	12.78±0.10	11.08±0.10	11.05±0.10	11.10±0.10
VSS (g/L)	8.97±0.10	7.20±0.10	7.20±0.10	7.20±0.10
Oil&Grease (g/L)	8.27±0.05	6.44±0.05	6.45±0.05	6.55±0.05
TCOD (g/L)	88.08±0.20	85.44±0.20	85.61±0.20	85.64±0.20

Parameter	Pretreated POME			
	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
SCOD (g/L)	21.42±0.20	21.43±0.20	21.44±0.20	21.44±0.20
BOD_5 (g/L)	49.02±0.20	49.80±0.20	49.92±0.20	49.94±0.20
Reducing sugar (g/L)	4.30±0.02	5.50±0.02	6.62±0.02	6.95±0.02
Color (ADMI)	2,989±9.00	2,815±7.00	2,720±7.00	2,650±7.00

หมายเหตุ SE = การแยกชั้นตามธรรมชาติ
SE+US = การแยกชั้นตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค

ตารางที่ 4-9 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค power input 0.44 W/ml

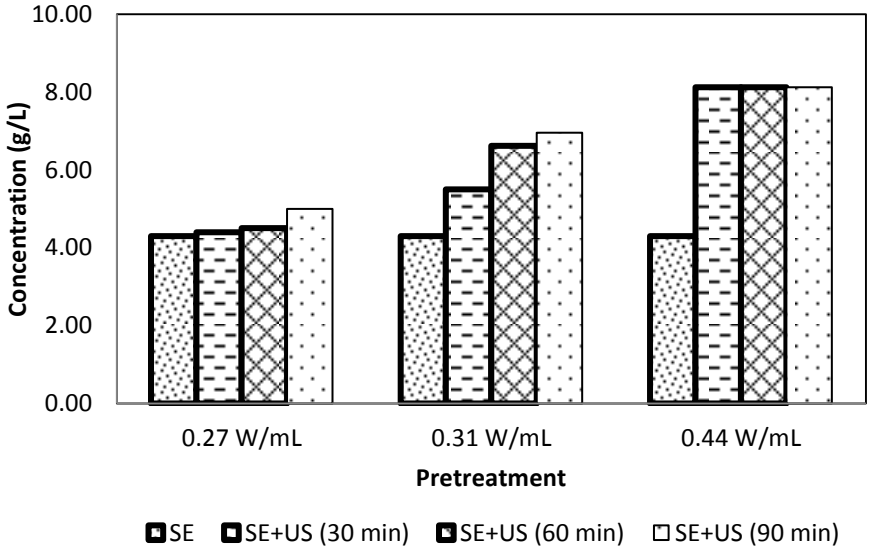
Parameter	Pretreated POME			
	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
pH	5.43±0.50	5.03±0.50	5.05±0.50	5.03±0.50
TS (g/L)	42.01±0.10	41.07±0.10	41.05±0.10	41.06±0.10
VS (g/L)	29.31±0.10	28.75±0.10	28.85±0.10	28.98±0.10
SS (g/L)	12.78±0.10	10.18±0.10	10.18±0.10	10.18±0.10
VSS (g/L)	8.97±0.10	7.20±0.10	7.10±0.10	7.10±0.10
Oil&Grease (g/L)	8.27±0.05	5.05±0.05	5.00±0.05	5.01±0.05
TCOD (g/L)	88.08±0.20	83.64±0.20	85.64±0.20	86.64±0.20
SCOD (g/L)	21.42±0.20	21.44±0.20	21.45±0.20	21.45±0.20
BOD_5 (g/L)	49.02±0.20	50.19±0.20	50.18±0.20	50.10±0.20
Reducing sugar (g/L)	4.30±0.02	8.12±0.02	8.12±0.02	8.12±0.02
Color (ADMI)	2,989±9.00	2,506±7.00	2,525±7.00	2,512±7.00

หมายเหตุ SE = การแยกชั้นตามธรรมชาติ
SE+US = การแยกชั้นตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค

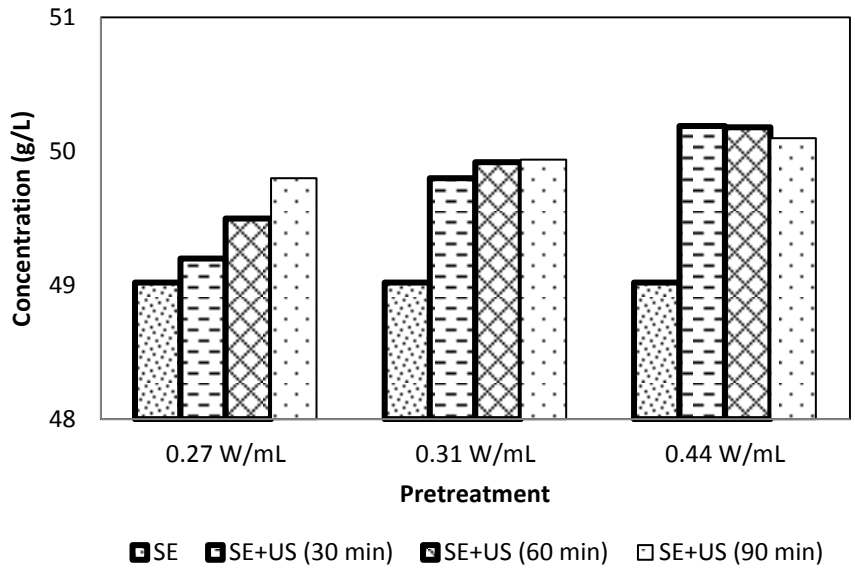
หลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค พบว่าพารามิเตอร์ pH TS VS VSS Oil&Grease TCOD และสี มีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีผลมาจากการ dilution ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ ส่วนพารามิเตอร์ SCOD และ BOD5 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 21.42 g/L เป็น 21.44 g/L และ 49.02 g/L เป็น 50.19 g/L ตามลำดับ ยกเว้นพารามิเตอร์ reducing sugar ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.36 g/L เป็น 8.12 g/L โดยการเพิ่มขึ้นของ reducing sugar จากการผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค มีความสัมพันธ์กับงานวิจัยของ Aguilar *et al.,* (2012) ที่ทำการศึกษาลิกโนเซลลูสเพื่อเป็นสาดุสำหรับการหมัก รายงานว่าการใช้กระบวนการ pretreatment ทางกล เช่น การบด ปั่น การใช้คลื่นกระแทก มีผลทำให้เซลของพืชแตก รวมถึงเกิดการแตกหรือเสียหายลิกโนเซลลูส ซึ่งจะปลดปล่อยโพลิเมอร์ขอน้ำตาลออกมา จึงอนุมานได้ว่าปริมาณ reducing sugar ที่เพิ่มขึ้นนี้มาจากการที่กระบวนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคทำให้ลิกโนเซลลูสที่ปะปนอยู่ในน้ำตัวอย่างแตกตัวออกและปลดปล่อยน้ำตาลออกมา

4.2.2 เปรียบเทียบการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคด้วย power input ที่แตกต่างกัน

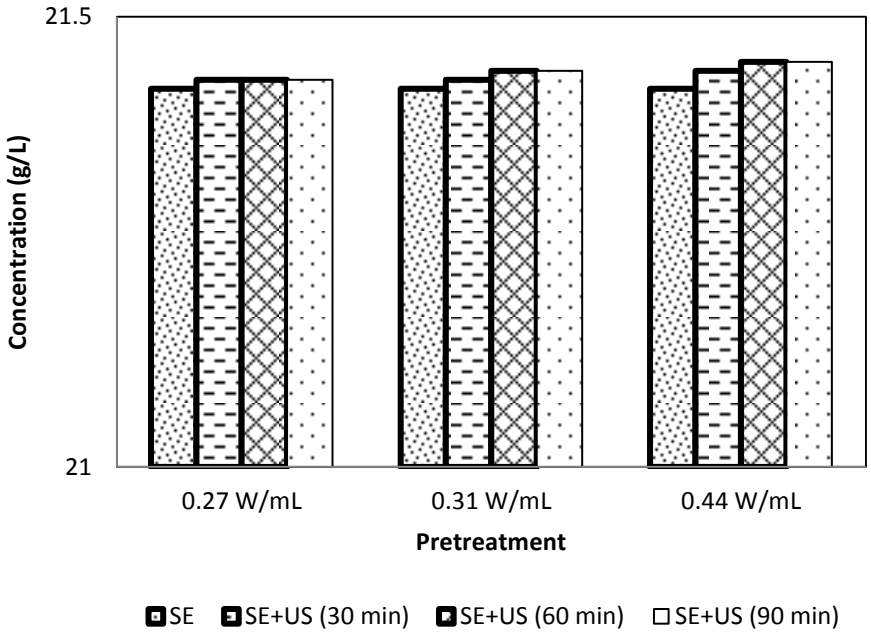
การให้ power input ที่แตกต่างกันกับน้ำตัวอย่างเพื่อศึกษาผลของการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ในหัวข้อที่ 4.2 ทำให้ทราบในเบื้องต้นได้ว่า power input ที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดการละลายของพารามิเตอร์ที่ส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพคือ power input ที่ 0.27 ถึง 0.44 W/ml เมื่อพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ได้แก่ น้ำตาลรีดิวซ์ BOD_5 และSCOD (ภาพที่ 4-7 ถึง 4-9) พบว่า



ภาพที่ 4-7 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml



ภาพที่ 4-8 ความเข้มข้นของ BOD_5 เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml



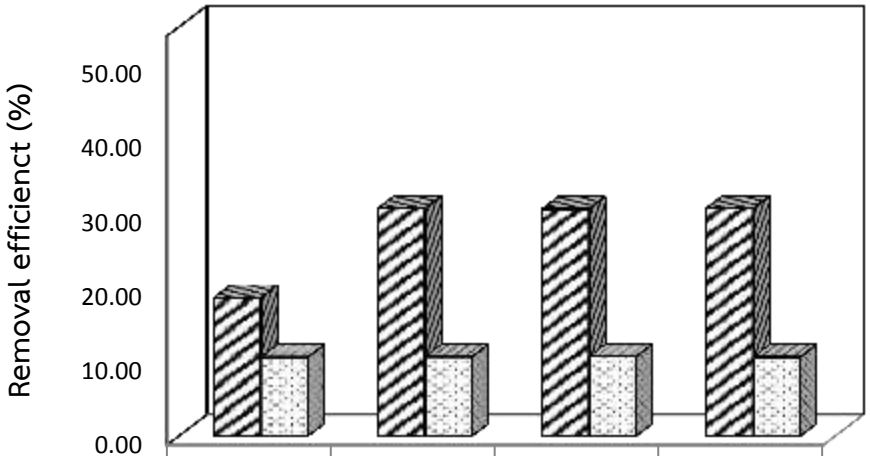
ภาพที่ 4-9 ความเข้มข้นของ SCOD เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่เวลาต่างๆ ด้วย power input 0.27 ถึง 0.44 W/ml

พารามิเตอร์ น้ำตาลรีดิวซ์ BOD_5 และSCOD ละลายหรือถูกปลดปล่อยออกมาได้สูงสุดที่ power input 0.44 W/ml และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่เวลา 30 นาทีเป็นต้นไป

4.2.3 เปรียบเทียบอัลตราโซนิค pretreatment ด้วย sonication time ที่แตกต่างกัน

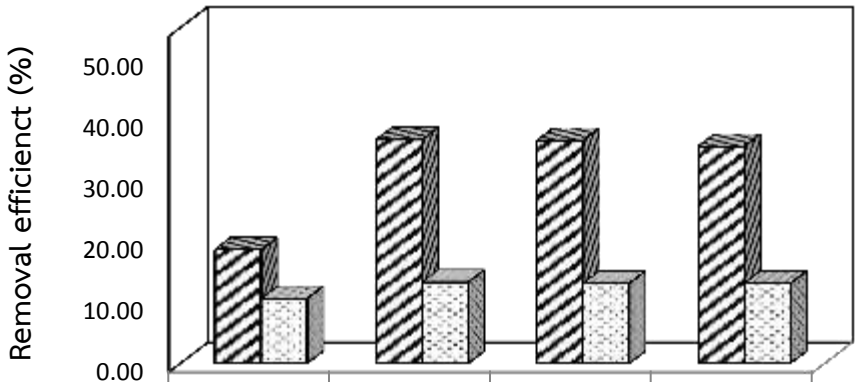
ผลจากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ประสิทธิภาพการลด ของ ซีโอดี และน้ำมันและไขมัน ที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านการ pretreatment ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ถึง ภาพที่ 4-12

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การ pretreatment โดยใช้อัลตราโซนิคร่วมกับการตกจมตามธรรมชาติ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน และมีผลทำให้ค่า TCOD ในน้ำเสียลดลงด้วย โดยประสิทธิภาพการลดลงของน้ำมันและไขมันมีค่าสูงสุดเมื่อ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่ power input 0.44 W/ml ที่ 90 นาที มีค่าเท่ากับ 14.09 % (ภาพที่ 12) โดยลดลงจาก 10.16 g/L เป็น 5.01 g/L และประสิทธิภาพการลดลงของ TCOD มีค่าเท่ากับ 15.1 % โดยลดลงจาก 98.52 g/L เป็น 86.64 g/L น้ำมันที่เกิดการแยกขึ้นในส่วนนี้สามารถนำกลับไปผลิตเป็นน้ำมันเกรดบีได้หรือแยกแล้วนำกลับสู่กระบวนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ และผลจากการลดลงของค่าน้ำมันและไขมันนี้ยังส่งผลให้ลักษณะสมบัติของน้ำเสียมีใกล้เคียงกับค่าแนะนำของน้ำเสียเริ่มต้นสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยวิธีบำบัดแบบไร้อากาศซึ่งไม่ควรมีค่าเกิน 8.0 g/L สำหรับน้ำมันและไขมัน และมีค่าระหว่าง 50 g/L ถึง 80 g/L สำหรับ TCOD



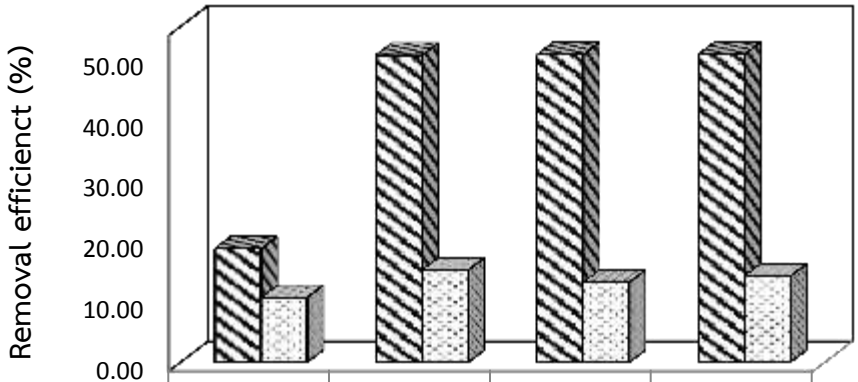
	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
Oil&Grease	18.60	30.61	30.51	30.61
TCOD	10.60	10.64	10.67	10.62

ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่ power input 0.27 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที



	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
Oil&Grease	18.60	36.61	36.52	35.53
TCOD	10.60	13.28	13.10	13.07

ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่ power input 0.31 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที



	SE	SE+US (30 min)	SE+US (60 min)	SE+US (90 min)
Oil&Grease	18.60	50.30	50.39	50.39
TCOD	10.60	15.10	13.07	14.09

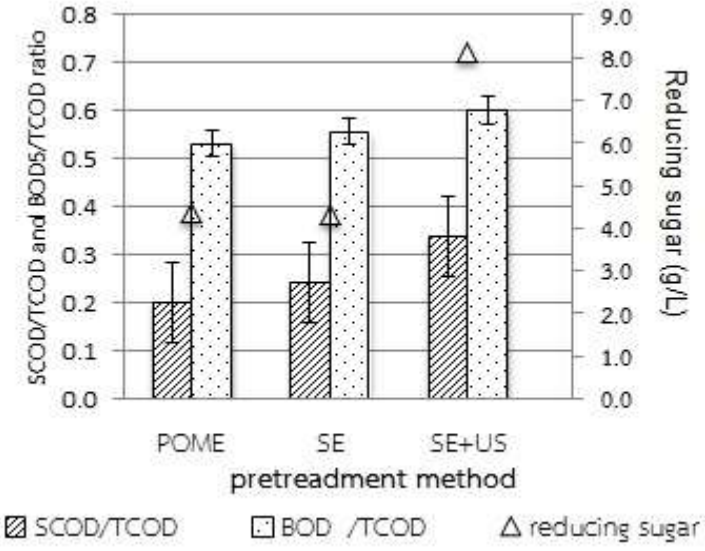
ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพการลด ซีโอดี น้ำมันและไขมัน เมื่อผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคที่ power input 0.44 W/ml ที่ sonication time 30 60 และ 90 นาที

การ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค สามารถทำให้ค่า TCOD และน้ำมันและไขมัน ของน้ำเสียตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพได้ ในขณะเดียวกันก็ทำให้แยกน้ำมันที่ปะปนมาในน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้เพิ่มขึ้นด้วย

ถึงแม้ว่าน้ำมันและไขมันจะเป็นหนึ่งในสารอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศ แต่ระหว่างการย่อยสลายน้ำมันและไขมันนี้จะเกิดผลพลอยได้ที่สามารถยับยั้งการผลิตแก๊สมีเทนได้ เช่น เกิดการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันขึ้น ซึ่งจะขัดขวางการย่อยในขั้นถัดไปของการผลิตมีเทน (Ji *et al.,* 2009; Li *et al,* 2012) และความเข้มข้นของน้ำมันและไขมันที่มีค่าสูงเกินกว่า 10 g/L ก็อาจจะเป็นตัวแปรที่ยับยั้งการย่อยอาหารแบบไม่ใช้อากาศได้เช่นกัน (Lam *et al.,* 2009) ในขั้นตอนการวิจัยก่อนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค จึงได้ตั้งให้เกิดการแยกชั้นตามธรรมชาติแล้วทำการแยกไขมันและน้ำมันที่ลอยออกในขั้นเตรียม

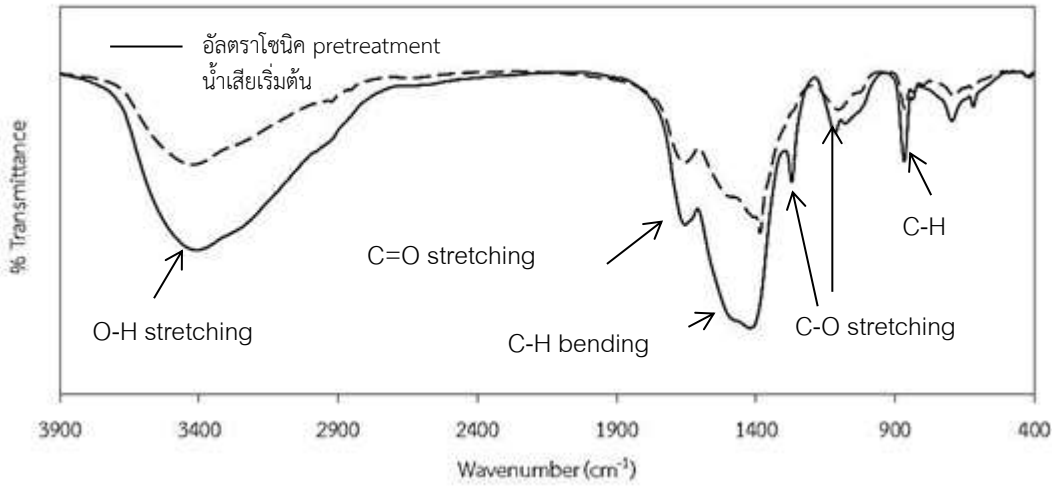
4.2.4 Biodegradability หลังผ่านการ Pretreatment

พิจารณาสัดส่วนของ BOD_5/TCOD SCOD/TCOD และ reducing sugar ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 90 นาที (ภาพที่ 4-13) โดยค่าสัดส่วนของ BOD_5/TCOD ส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย ในการบำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งค่าสัดส่วนของ BOD_5/TCOD จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.8 (Samudro and Mangkoedihardjo, 2010) ซึ่ง Larson และคณะ ในปี 2000 พบว่าถ้าสัดส่วนของ BOD_5/TCOD มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่สามารถเกิดการย่อยลายทางชีวภาพได้ และถ้ามีค่าไม่เกิน 0.1 แสดงว่ามีความ สามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ หากมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.6 จะเป็นช่วงที่สามารถย่อยสลายได้โดยต้องการปริมาณจุลินทรีย์ที่มากขึ้น และหากมีค่ามากกว่า 0.6 ขึ้นไปแสดงว่าอยู่ในช่วงที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี ผลการวิเคราะห์สัดส่วน BOD_5/TCOD ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมเพียงอย่างเดียว (SE) และการตกจมร่วมกับอัลตราโซนิค (SE+US) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.53 และ 0.60 ดังแสดงในภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 สัดส่วนของ BOD_5/TCOD SCOD/TCOD และ reducing sugar ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 90 นาที

การเพิ่มขึ้นของปริมาณ reducing sugar มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายสารอาหาร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคสามารถเพิ่มปริมาณ reducing sugar ได้จาก 4.36 g/L เป็น 8.12 g/L ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จะพบหมู่ฟังก์ชันทั้ง aromatic และ aliphatic เช่นกัน คือตรวจพบที่ความถี่ 3,400 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน aromatic hydroxyl group (O-H stretching) ความถี่ 1,654 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ความถี่ 1,422 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H aliphatic bending ความถี่ 1,080, 1,116 และ 1,272 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching พวกอีเทอร์และเอสเทอร์ และความถี่ 869 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน C-H ของพวก aromatic ดังแสดงในภาพที่ 4-14 ซึ่งพบว่าการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิคจากการทดลองนี้เมื่อใช้เทคนิค FTIR พบว่าทำให้หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเปลี่ยนไปโดยเฉพาะตรงตำแหน่งพีคที่ความถี่ประมาณ 1,000-2,000 cm^{-1} บ่งบอกว่ามีการลดลงของลิกนิน เฮมิเซลลูโลสและไขมัน หลังผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค สอดคล้องกับการศึกษาของ ทศพร ศรีวรกุล และคณะ (2559) โดยศึกษาการปรับปรุงผิวเส้นใยมะพร้าวที่ แล้วใช้เทคนิค ATR-FTIR พบว่าปรากฏพีคที่ 3340 cm-1 แสดงการสั่นของพันธะ O-H stretch ซึ่งแสดงถึงว่าเส้นใยมีลิกนิน และเซลลูโลส และปรากฏพีคที่ 1728 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C=O stretch มีพีคที่เด่นชัดคือพีคที่ 1034 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงการสั่นของพันธะ C-O stretch ซึ่งไม่พบในเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ดังนั้นผลจึงยืนยันว่าได้ว่าลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และไขมันถูกกำจัดออกไปเมื่อปรับปรุง



ภาพที่ 4-14 การจำแนกหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเทียบกับน้ำทิ้งที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 90 นาที

4.3 การผลิตแก๊สชีวภาพและศักยภาพการเกิดมีเทน

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการอัลตราโซนิค เป็นสารตั้งต้นในระบบการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากโรงงานที่ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง สำหรับลักษณะสมบัติทางกายภาพ-เคมีของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ-เคมีของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

พารามิเตอร์	หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์
pH	6.88±0.2
TS (g/L)	50.92±1.25
TSS (g/L)	41.21±0.99
VS (g/L)	28.55±0.87
VSS (g/L)	26.32±1.21
TKN (g/L)	3.28±0.2
Alkalinity (g/L)	3.51±0.6

ลักษณะหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นของเหลวสีดำข้นและมีตะกอน ปริมาณ VS เท่ากับ 28.55 mg/l กำหนดปริมาณของอัตราส่วนของสารอาหาร (Substrate) ต่อหัวเชื้อ (Inoculums) เท่ากับ 2:1 อ้างอิงจากค่า VS

4.3.1 การหมักด้วยระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกะ (Batch)

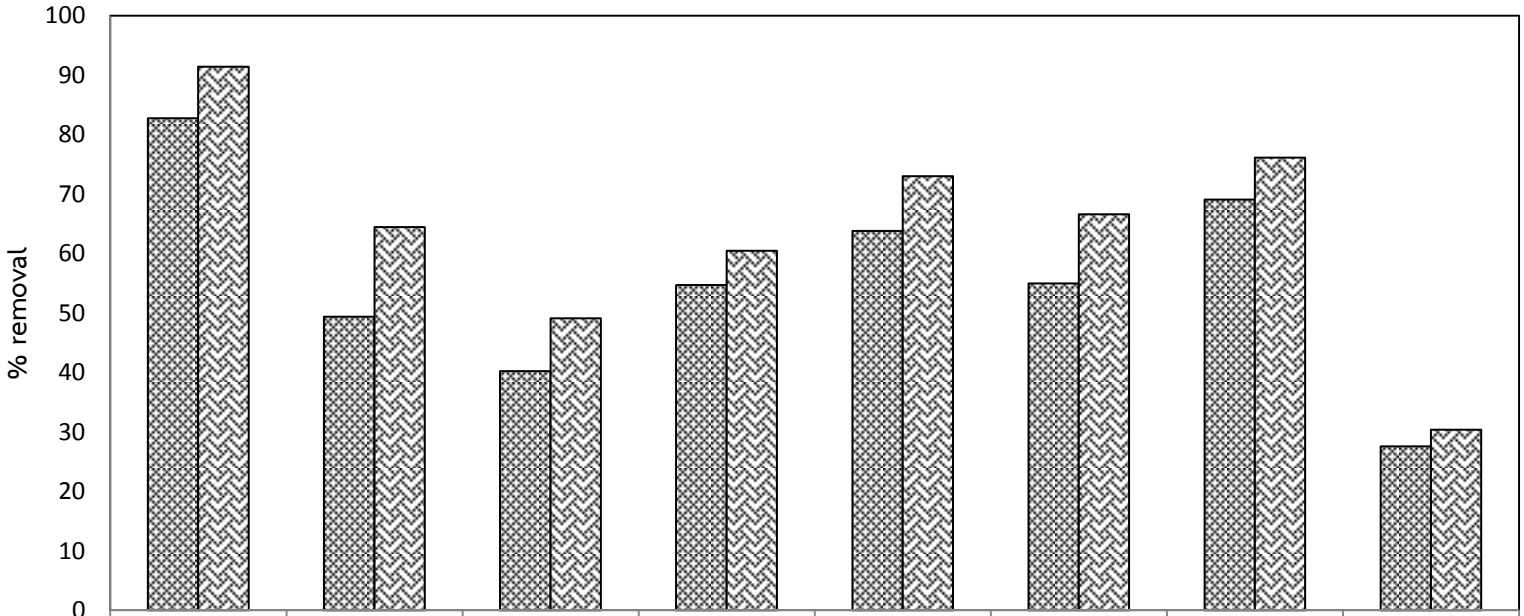
การจะนำระบบบำบัดแบบไร้อากาศไปใช้กับน้ำเสียจากกิจกรรมใดๆ ควรจะต้องทำการทดสอบค่า BMP (Biochemical Methane Potential) เพื่อประเมินความเป็นไปได้หรือศักยภาพของระบบรวมทั้งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเสียก่อน การทดลองในส่วนนี้จะนำน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบตั้งต้น (POME) ที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการอัลตราโซนิค มาทำ BMP test เพื่อหาค่าศักยภาพดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหมักแบบไร้อากาศต่อจากการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค โดยเลือกสภาวะที่ดีที่สุดในการเพิ่มการละลายของ SCOD และน้ำตาลรีดิวซ์เป็นหลัก ในการเลือกมาศึกษาต่อด้วยการหมักแบบไร้อากาศ

4.3.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลังการหมักด้วยระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกะ (Batch)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตมีเทนและศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ที่อุณหภูมิ 35 °c ของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค ทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศ ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วย อัลตราโซนิค เมื่อเทียบกับชุดที่ไม่ผ่าน pretreatment ด้วย อัลตราโซนิค พิจารณาในรูปของ BOD_5 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น 49.12 % และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น 64.45 % สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและการกำจัดสีในหน่วย ADMI มีค่าเพิ่มขึ้น 91.42 % และ 30.39 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในรูปอื่น ๆ หลังผ่านการหมักแบบไร้อากาศ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิคก่อนการหมักแบบไร้อากาศ สามารถกำจัดสารกลุ่มประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และลิกนิน ได้ 60.44 % 71.10 % 73.00และ 66.57 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดที่ไม่ผ่าน pretreatment ด้วย อัลตราโซนิค ดังแสดงในภาพที่ 4-15



	SS	SCOD	BOD_5	Total Phenolics	Anthocyanin	Tannin&Lignin	Flavonoid	Color
SE	82.74	49.39	40.20	54.70	63.81	54.97	69.06	27.55
SE+US	91.42	64.45	49.12	60.44	73.00	66.57	76.10	30.39

ภาพที่ 4-15 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลังการหมักด้วยระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกะ (Batch) ของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ power input 0.44 W/ml sonication 30 นาที

ตารางที่ 4-11 ลักษณะสมบัติของของน้ำเสียก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศแบบกะ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

Parameter	SE		SE+US (0.27 W/ml)		SE+US (0.31 W/ml)		SE+US (0.44 W/ml)	
	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก
pH	5.45	5.65	5.03	4.60	5.03	4.65	5.03	4.50
SS (g/L)	12.78	2.21	10.18	1.88	10.18	1.27	10.18	0.87
SCOD (g/L)	21.42	10.84	21.44	8.42	21.44	8.86	21.44	7.62
BOD_5 (g/L)	49.02	29.31	50.19	26.50	50.19	26.44	50.19	25.54
Total Phenolics (g/L gallic acid equivalent, GAE)	4.83	2.19	4.83	2.01	4.83	1.98	4.83	1.91
Anthocyanin (g/L cyanidin-3-glucoside, equivalent)	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01
Tannin&Lignin (g/L tannic acid equivalent, TAE)	0.87	0.39	0.87	0.35	0.87	0.32	0.87	0.29
Flavonoid (g/L catechin equivalent, CE)	1.51	0.47	1.51	0.40	1.51	0.38	1.51	0.36
Color (ADMI)	2,989	2,166	2,506	1997.90	2,506	1841.56	2,506	1741.92

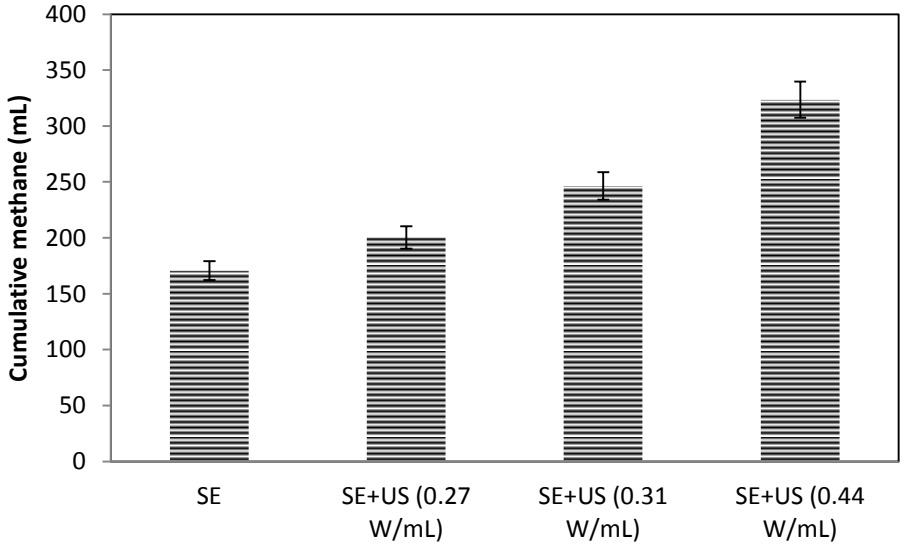
4.3.1.2 ศักยภาพการเกิดมีเทนของระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกะ (Batch)

ผลการทดลองพบว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วย อัลตราโซนิค ทำให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 29.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 539.1 mL CH_4/g $COD_{removal}$ มีสัดส่วนแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 65% ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-12 ปริมาณแก๊สชีวภาพ และแก๊สมีเทนของการหมักแบบไร้อากาศแบบกะ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

Sample	Biogas (ml)	Methane (%)	Methane (ml)	Methane yield mL CH_4/g $COD_{removal}$
Seed	20.2	40	8.08	-
SE	355.5	48	170.64	243.8
SE+US (0.27 W/mL)	400.4	50	200.20	286.0
SE+US (0.31 W/mL)	410.7	60	246.42	352.0
SE+US (0.44 W/mL)	497.6	65	323.44	539.1

หมายเหตุ : Methane (ml) คำนวณจาก % Methane ใน Biogas



ภาพที่ 4-16 ปริมาณแก๊สมีเทนสะสมจากการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกะ ของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

จากผลการทดลองแบบกะ พบว่าการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที ผลของ power input ที่ดีที่สุดในการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสัดน้ำมันปาล์มดิบคือ ที่ power input 0.44 W/ml ดังแสดงในภาพที่ 4-16

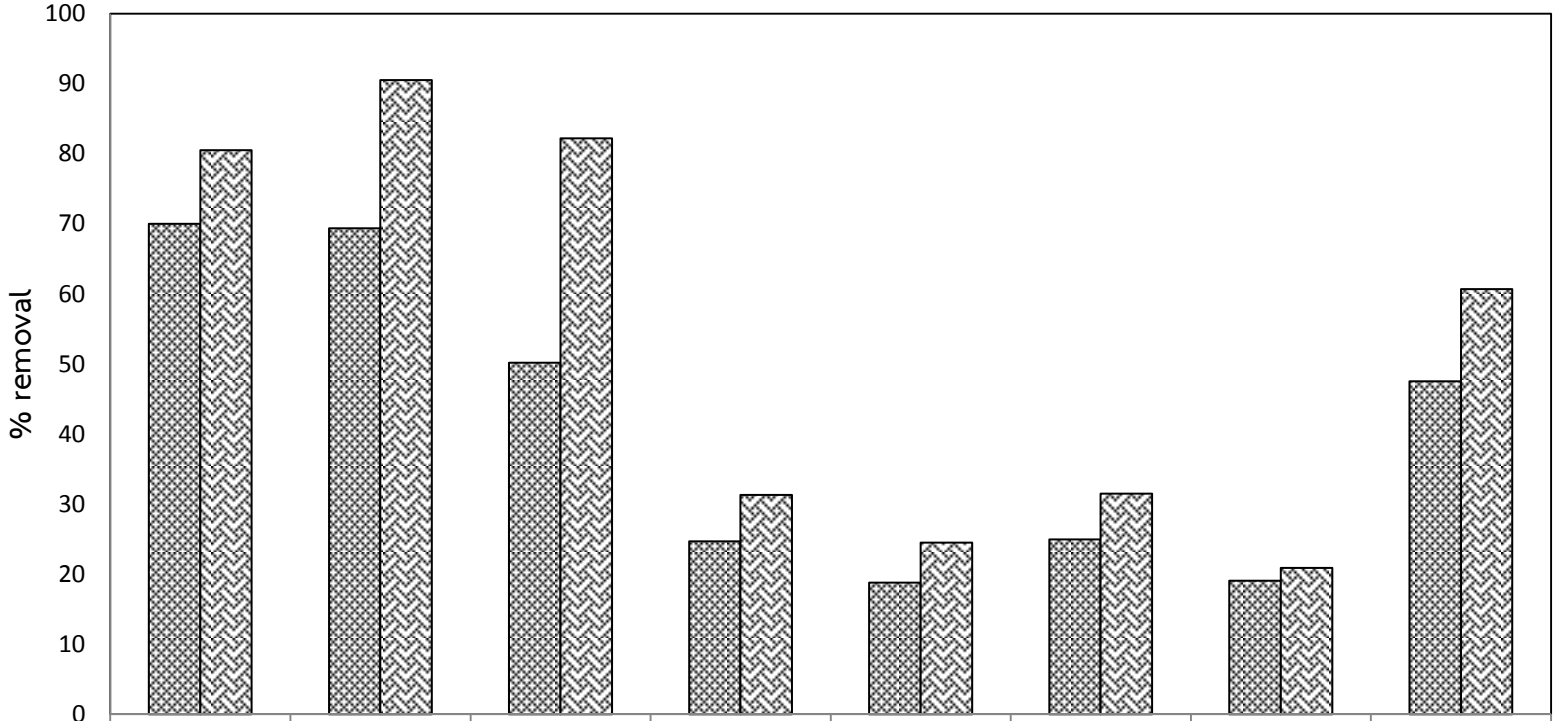
ในการทดลองส่วนถัดไปเป็นการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง จะใช้การ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที ผลของ power input 0.44 W/ml ซึ่งได้ผลผลิตแก๊สชีวภาพและเปอร์เซ็นต์มีเทนที่ดีในการทดลองผลิตแบบกะ

4.3.2 การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.3.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลังการหมักด้วยระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง

ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตมีเทนและศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการแบบดึ่งต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 35 °c ของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที ผลของ power input 0.44 W/ml พารามิเตอร์ที่จะทำการปรับเปลี่ยนคือ HRT ที่ 8 16 และ 32 วัน ทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศ ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค หลังผ่านระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องในรูปของบีโอดีมีค่าเท่ากับ 82.2 % และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเท่ากับ 90.5 % สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและการกำจัดสีในหน่วย ADMI มีค่าเท่ากับ 80.5 % และ 60.7 % ตามลำดับ ส่วนสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และลิกนินแทนนิน หลังผ่านการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิคมีประสิทธิภาพกำจัด 31.3 % 20.9 % 24.5 % 31.5 % และ 35.2 % ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-12



	SS	SCOD	BOD_5	Total Phenolics	Anthocyanin	Tannin&Lignin	Flavonoid	Color
SE	70.00	69.38	50.20	24.70	18.81	24.97	19.06	47.55
SE+US	80.50	90.50	82.20	31.30	24.50	31.50	20.90	60.70

ภาพที่ 4-17 ประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อผ่านการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง ของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.44 W/ml

ตารางที่ 4-13 ลักษณะสมบัติของของน้ำเสียก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

Parameter	SE		SE+US (0.27 W/ml)		SE+US (0.31 W/ml)		SE+US (0.44 W/ml)	
	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก	ก่อนหมัก	หลังหมัก
pH	5.45	5.65	5.03	4.6	5.03	4.5	5.33	4.7
SS (g/L)	12.78	2.49	10.18	5.02	10.18	4.02	10.18	3.05
SCOD (g/L)	21.42	7.73	21.44	2.02	21.44	2.03	21.44	2.04
BOD_5 (g/L)	49.02	23.53	50.19	8.9	50.19	8.91	50.19	8.93
Total Phenolics (g/L gallic acid equivalent, GAE)	4.83	3.64	4.83	3.34	4.83	3.33	4.83	3.32
Anthocyanin (g/L cyanidin-3-glucoside, equivalent)	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
Tannin&Lignin (g/L tannic acid equivalent, TAE)	0.87	0.65	0.87	0.64	0.87	0.64	0.87	0.60
Flavonoid (g/L catechin equivalent, CE)	1.51	1.22	1.51	1.22	1.51	1.2	1.51	1.19
Color (ADMI)	2,989	2,215	2,506	1741.92	2,506	1700.92	2,506	1,624

4.3.2.2 ศักยภาพการเกิดมีเทนของระบบการหมักไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง

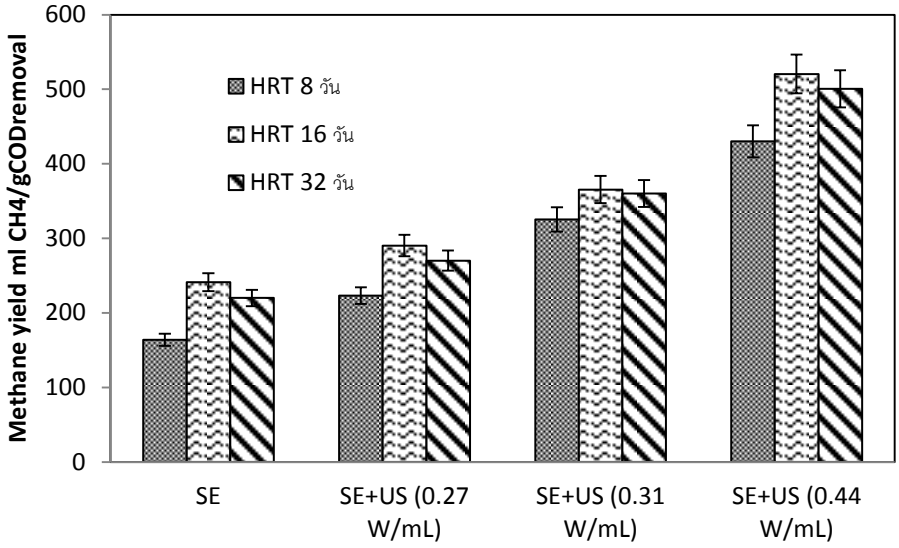
การทดลองในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ℃ และระยะเวลากักเก็บ 8 16 และ 32 วัน (OLR 1.00-6.30 gVS/L/day) ผลการทดลองพบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดสำหรับเท่ากับ 3.21 L CH_4/Lน้ำเสีย ที่ระยะเวลากักเก็บ 16 วัน (ภาพที่ 4-18) โดยให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 30.2 % เมื่อเทียบกับชุดควบคุม

ตารางที่ 4-14 ปริมาณแก๊สชีวภาพ และแก๊สมีเทนของการหมักแบบไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

pretreatment	**HRT (วัน)**	Biogas เฉลี่ยต่อวัน (ml)	Methane (%)	Methane (ml)	Methane yield mL CH_4/g $COD_{removal}$
SE	8	290.5	48	139.4	163.7
	16	325.5	47	152.9	241.2
	32	311.4	47	146.3	220.0
SE+US	8	375.5	52	195.2	223.1
(0.27 W/mL)	16	400.4	55	220.2	290.3
	32	396.8	56	222.2	270.5
SE+US	8	400.0	59	236.0	325.3
(0.31 W/mL)	16	415.7	59	245.2	365.5
	32	411.1	58	238.4	360.1
SE+US	8	533.5	65	346.7	430.1
(0.44 W/mL)	16	547.3	71	388.5	520.5
	32	435.6	68	296.2	500.5

หมายเหตุ : Methane (ml) คำนวณจาก % Methane ใน Biogas

ผลการทดลองในการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร จะเห็นได้ว่าการทำ ultrasonic pretreatment สามารถเพิ่มผลลิตแก๊สชีวภาพขึ้นได้สูงสุดถึง 60 % จากเดิมเฉลี่ยที่ 325.5 ml/วัน เป็น 547.3 ml/วัน สภาวะที่ sonication time 30 นาที power input 0.44 W/ml และส่งผลให้ methane yield เพิ่มขึ้นเป็น



ภาพที่ 4-18 การผลิตมีเทนของน้ำเสียที่ผ่านการ pretreatment ด้วยการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องของตัวอย่างที่ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค ที่ sonication time 30 นาที power input 0.27 0.31 และ 0.44 W/ml

4.3.2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค

ในงานวิจัยนี้ได้นำน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย อัลตราโซนิค มาเป็นสารตั้งต้นในระบบการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากโรงงานที่ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง ทดลองเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (CSTR) ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพนี้ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรควบคุมได้แก่ อุณหภูมิในกรเดินระบบ ความเป็นกรด-ด่าง และการกวนผสม เพื่อทดสอบผลที่เกิดขึ้นโดยจะทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บ (HRT) ซึ่งการปรับเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บจะส่งผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบซึ่งเป็นสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ในการผลิตแก๊สชีวภาพ ปริมาณของแข็งและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของระบบ โดยระยะเวลากักเก็บที่สูงกว่าจะมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบที่มากกว่า ซึ่งทำให้ปริมาณของแข็งและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของระบบสูงขึ้นด้วย

สำหรับระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่มีการใช้ อัลตราโซนิค pretreatment และการตกจมตามธรรมชาติร่วมด้วย พบว่าในการดำเนินงานวิจัยได้ทำการเดินระบบแบบ CSTR โดยปรับค่า pH เริ่มต้นของระบบเท่ากับ 7 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C มีการกวนผสมตลอดเวลาด้วยแมกเนติกบาร์ และทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บ 8 16 และ 32 วัน ปรับเปลี่ยน power input และ sonication

duration พบว่าน้ำเสียที่ผ่านอัลตราโซนิค pretreatment ด้วย power input ที่เพิ่มขึ้นทำให้การผลิตแก๊สชีวภาพให้ผลดีขึ้นด้วย โดยพบว่า power input ที่สูงสุดจากการทดลองคือ 0.44 W/ml sonication time 30 นาที ให้ผลิตแก๊สชีวภาพที่ดีที่สุด ส่วนการปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการทำ sonication พบว่า การใช้ power input ที่ต่ำจำต้องใช้เวลาในการทำ pretreatment ที่นานเพื่อให้ได้สารอินทรีย์ในรูปที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยส่งเสริมการผลิตแก๊สชีวภาพ ดังนั้นสำหรับการทำ pretreatment ด้วยอัลตราโซนิค การการผลิตแก๊สชีวภาพจึงควรเลือกช่วง power input ที่สูง เพื่อประโยชน์ในด้านการลดของเวลาในการเตรียมก่อนขู่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งในการทดลองนี้พบว่า power input 0.44 W/ml เริ่มให้ค่าการละลายของสารอินทรีย์ในรูปที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วง 30 นาที

ผลจากการทดลองนี้พบว่าที่ระยะเวลากักเก็บที่ 16 วัน ให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุมทุกชุดการทดลอง จะเห็นได้ว่าระยะเวลากับเก็บของระบบมีผลอย่างมากต่อการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งหากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบอื่นๆที่มีระบบบำบัดน้ำเสียและระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่แตกต่างไป ในการดำเนินการก็อาจมีตัวแปรที่ต้องควบคุมและตัวแปรที่ต้องปรับเปลี่ยนต่างไปจากนี้

4.3.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

จากการตรวจติดตามการบำบัดในระบบบำบัดจริงของโรงงานที่เข้าทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างมาทำการศึกษา ทำการเก็บตัวอย่างจำนวนสามครั้งในเดือนกุมภาพันธ์ มิถุนายน และตุลาคม 2557 ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที 4-10

การบำบัดขั้นต้นด้วย อัลตราโซนิค ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากนำไปใช้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียจะมีการบำบัดในขั้นตอนต่อไปหลังจากผ่านระบบหมักแก๊สชีวภาพแล้วคือระบบบ่อปรับเสถียรหลายบ่อต่อเนื่องกันก่อนที่จะเข้าสู่บ่อน้ำทิ้งสุดท้ายซึ่งค่าของสีและสารอินทรีย์จะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที 4-10 พบว่าน้ำหลังออกจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพของโรงงานที่การเก็บตัวอย่างมาทำการศึกษาพบว่าใช้เวลาในการถ่ายเทมาถึงบ่อสุดท้ายเป็นเวลา 90 ถึง 120 วัน ดังนั้นหากมีการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการทางกายภาพเคมีก่อนทำการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งจากการทดลองพบว่าทำให้ได้ปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้น อีกทั้งหลังน้ำผ่านการหมักก็มีคุณภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาก่อน ดังนั้นหากนำไปผ่านระบบบ่อปรับเสถียรหลังระบบหมักตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเช่นเดียวกับในระบบจริง จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้น้ำในบ่อสุดท้ายมีค่าสีและสารอินทรีย์ลดลงเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในส่วนของการตรวจติดตามนี้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าในห้องปฏิบัติการได้โดยตรง เนื่องจากสภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกันดังที่กล่าวข้างต้น โดยผลจาก

การทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการใช้อัลตราโซนิค pretreatment พบว่ามีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุมในการทดลองในห้องปฏิบัติการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่กำหนด

ตารางที่ 4-10 คุณสมบัติของน้ำเสียบ่อแรก บ่อหลังผลิตก๊าซชีวภาพ และบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Parameter	Raw POME	After biogas production pond	Final pond
pH	5.45±4	7.52±3	7.5±5
SS (mg/L)	21,740±20	2,790±20	155±5
TCOD (mg/L)	98,520±20	3,880±10	1,855±5
BOD_5 (mg/L)	52,480±30	2,320±20	195.9±4
Color (ADMI)	3,250±10	2,989±9	1,690±4
Total Phenolics (mg/L gallic acid equivalent, GAE)	3,580±6	2,382±5	1,650±4
Anthocyanin (mg/L cyanidin-3-glucoside, equivalent)	31±2	31±1	12±2
Tannin&Lignin (mg/L tannic acid equivalent, TAE)	844±4	734±2	435±2
Flavonoid (mg/L catechin equivalent, CE)	1,483±5	1,380±4	584±3
Humic substances (mg/L)	4,010±7	3,200±7	1,690±3

*ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัด

บ่อปรับเสถียรเป็นการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีลักษณะการทำงานคือรับน้ำเสียจากบ่อแอนแอโรบิค โดยบ่อแรกหลังออกจากระบบ (บ่อแฟคคัลเททีฟ) ภายในจะมีการทำงานแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนบนของบ่อเป็นแอโรบิคได้รับออกซิเจนจากการถ่ายเทอากาศที่บรอเวณผิวน้ำ ส่วนล่างของบ่อที่มีความลึกอยู่ในสภาพแอนแอโรบิค สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สเช่นเดียวกับบ่อแอนแอโรบิค แต่แก๊สที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้ไม่เกิดกลิ่นเหม็นเป็นการทำความสะอาดตัวเองอีกขั้นตอนหนึ่ง จากนั้นจะทำการไหลไปยังบ่อแอโรบิคที่มีความลึกไม่มากนักเพื่อให้ออกซิเจนกระจายทั่งทั้งบ่อและมีสภาพแอโรบิคตลอดความลึก และยังฆ่าเชื้อโรคได้ส่วนหนึ่งโดยอาศัยแสดงแดดอีกด้วย ในบ่อส่วนท้ายของระบบจะเป็นบ่อบ่มใช้รองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อฟอกน้ำทิ้งให้มีคุณภาพดีขึ้นก่อนระบายสู่สิ่งแวดล้อม

สำหรับอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบพบว่าน้ำในบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียยังคงมีสีเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จึงไม่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ หากต้องการกำจัดสารสีในน้ำทิ้งสุดท้ายที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก สำหรับวิธีการที่นิยมคือการรวมหรือแยกสารสีออกจากน้ำ เช่น การรวมตะกอนด้วยเคมี กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีและเทคโนโลยีเมมเบรน เป็นต้น

สารย่อยสลายยากได้แก่ สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนิน และสารฮิวมิค หลังผ่านระบบผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่า ยังคงหลงเหลืออยู่และเป็นรงควัตถุสำคัญในการทำให้เกิดสีในน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการบำบัดน้ำทิ้งที่ย่อยสลายยากเหล่านี้ได้แก่ การรวมตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) (ธนกฤต พรหมทอง และคณะ, 2553) และเทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology) (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนั้นหากต้องการทำการบำบัดต่อไปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ เพื่อให้สามารถเลือกใช้วิธีบำบัดอย่างถูกต้องและเหมาะสมในการนำไปปฏิบัติทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

4.4.1 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการศึกษาจะทำการจัดทำประมาณการของรายได้และรายจ่ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล และคำนวณหาค่าต่างๆ ในด้านการเงินเพื่อวัดอัตราผลตอบแทนและความคุ้มค่าของ การลงทุน

ข้อมูลตัวเลขที่ทำประมาณการนี้ได้มาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่เข้าไปเก็บตัวอย่างมาศึกษา มีขนาด 45 ตัน ทะลายปาล์มสดต่อชั่วโมง จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งสามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000,000 kWh ต่อปี ในการคำนวณจะเทียบกับบ่อ 1 บ่อ ขนาด 1,000 ลูกบาศก์เมตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1.1 โครงสร้างต้นทุนการผลิตก๊าซชีวภาพ

เป็นค่าที่ได้จากการประมาณการ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น (Investment Cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost) มีรายละเอียดดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น ดังแสดงในตาราง 4-11 ประกอบด้วย

- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างบ่อหมักแก๊สชีวภาพ ประมาณ 2,600,000 บาท/บ่อขนาด 1,000 ลูกบาศก์เมตร

- ค่าใช้จ่ายในการปูผืนพลาสติก HDPE เพื่อคลุมบ่อในการกักเก็บแก๊ส ประมาณ 50,000 บาท/ผืน
- ค่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ ประมาณ เครื่องละ 320,000 บาท
- ค่าระบบอุปกรณ์ในการส่งแก๊ส ประมาณ 30,000 บาท
- ค่าติดตั้งเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบควบคุมไฟฟ้า ประมาณ 30,000 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการ Test Run ระบบ ประมาณ 30,000 บาท

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ดังแสดงในตาราง 4-12 ประกอบด้วย

- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาบ่อ ประมาณ 96,000 บาท/ปี
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประมาณ 84,000 บาท/ปี
- ค่าแรงงานดูแลระบบ 6 คน (6,000 บาท/คน/เดือน) ประมาณ 432,000 บาท/ปี
- ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด ประมาณ 36,000 บาท/ปี

4.4.1.2 สมมุติฐานในการจัดทำข้อมูล

- อัตราการสึกหรอของเครื่องยนต์ เพิ่มขึ้น 3% ทุกปี
- อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำทำความสะอาดโรงเรือน เท่ากับ 3% ทุกปี
- ค่าเสื่อมราคาของบ่อ เครื่องจักร ที่ 20% ต่อปีตลอดอายุโครงการ
- อายุโครงการ 15 ปี
- ต้นทุนของเงินทุนของโครงการเท่ากับ Minimum Retail Rate (MRR)+2% ต่อปี (เงินกู้ MRR 6.45% ต่อปี)

ตาราง 4-16 เงินลงทุนเริ่มต้นของบ่อหมักแก๊สชีวภาพ

	สินทรัพย์ถาวร	**จำนวนเงิน (บาท)**
1	ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างบ่อหมักแก๊สชีวภาพขนาด 1,000 ลูกบาศก์เมตร	2,600,000
2	ค่าใช้จ่ายในการปูผืนพลาสติก HDPE	50,000
3	ค่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์	320,000
4	ค่าระบบอุปกรณ์ในการส่งแก๊ส	30,000
5	ค่าติดตั้งเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบควบคุมไฟฟ้า	30,000
	รวมเงินลงทุนทรัพย์ถาวร	3,030,000
6	ค่าใช้จ่ายในการ Test Run ระบบ	30,000
	รวมเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด	**3,060,000**
	ระบบที่มีการเพิ่ม ultrasonic pretreatment	

	สินทรัพย์ถาวร	จำนวนเงิน (บาท)
8	เครื่อง Ultrasonic รุ่น DR600	250,000
	รวมเงินลงทุน	**3,280,000**

ตาราง 4-17 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานการผลิตแก๊สชีวภาพ

รายการ	ต่อเดือน	หน่วย	จำนวนเงิน/ปี
ค่าซ่อมบำรุงบ่อ	8,000	บาท/เดือน	96,000
ค่าซ่อมบำรุงgเครื่องยนต์ เครื่องกำเนิดไฟ	7,000	บาท/เดือน	84,000
ค่าแรงงานดูแลระบบ 6 คน	6,000	บาท/คน/เดือน	432,000
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	36,000	บาท/เดือน	36,000
		รวมค่าใช้จ่าย	**648,000**

4.4.1.3 ผลตอบแทนของการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพได้ผลตอบแทนจากพลังงาน คือ ผลตอบแทนจากการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ระบบผลิตแก๊สชีวภาพ จากบ่อหมักขนาด 1,000 ลูกบาศก์เมตร ได้แก๊สประมาณ 1,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน ซึ่งสามารถทดแทนพลังงานได้ดังนี้

- ผลิตกระแสไฟได้ 1,200 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน
- ก๊าซหุงต้ม 552 กิโลกรัม/วัน

ผลตอบแทนจากการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า

โดยทั่วไปโรงงานมีความจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าประมาณเดือนละ 130,000 บาท เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าใช้เองจากแก๊สชีวภาพ จะประหยัดค่าไฟฟ้าได้ดังนี้ โดยใช้แก๊สชีวภาพ 80% เพื่อผลิตไฟฟ้า ค่าไฟฟ้าราคา 2.60 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง

- ดังนั้นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้คือ 1,200x0.8x2.6x30 = 74,880 บาท/เดือน
- 74,880 บาท/เดือน หรือ 898,560 บาท/ปี

4.4.1.4 ความคุ้มค่าต่อเงินลงทุน

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ระยะเวลาการดำเนินงานที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิจาก โครงการมีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนพอดีวิธีการหาระยะเวลาคืนทุนหรือจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนคุ้มกับเงินที่ลงทุน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

ระยะเวลาคืนทุน = 3,280,000

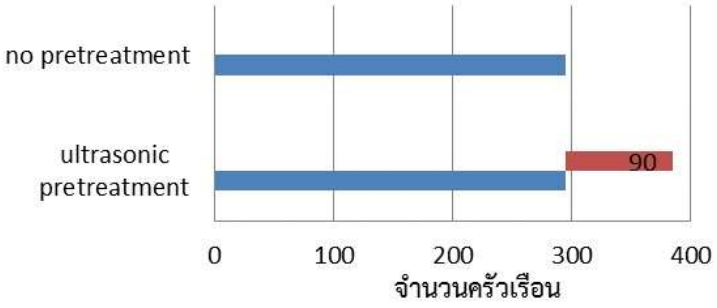
898,560

ระยะเวลาคืนทุน = 3.6 ปี

คำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ที่อัตราคิดลด 8.45% มีค่าเท่ากับ 1,162,152 บาท และได้อัตราผลตอบแทนตลอดอายุโครงการคือประมาณ 16% ซึ่งมากกว่าต้นทุนของเงินทุนของโครงการและสูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังที่ตั้งไว้ที่ 15% และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 3 ปี 6 เดือน สรุปได้ว่าโครงการนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุน เพราะผลการ ศึกษาผลตอบแทนพบว่ามีค่า NPV เป็นบวกและมีค่า IRR มากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ แสดงว่าโครงการนี้ให้ผลตอบแทนมากกว่าค่าลงทุน ดังนั้นสำหรับงานวิจัยฉบับนี้จึงสรุปได้ ว่าสมควรแก่การลงทุน

4.4.1.5 ผลได้เมื่อเทียบกับการทดแทนการใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีขนาด 45 ตัน ทะลายปาล์มสดต่อชั่วโมง จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งสามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000,000 kWh ต่อปี และจากรายงานของสำนักงานสถิติแห่งชาติพบว่าครัวเรือนไทยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนเฉลี่ยเท่า 6,780 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ดังนั้นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีกำลังการผลิตดังกล่าวจึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับครัวเรือนได้ ประมาณ 295 ครัวเรือน จากผลการทดลองวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด (การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค) สามารถทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นได้ 30. 2 % (ประมาณ 610,000 kWh ต่อปี) โดยคาดว่าการผลิตได้เพิ่มนี้จะสามารถรองรับการบริโภคพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นราว 90 ครัวเรือน ดังแสดงในภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 ไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ในครัวเรือน

เนื่องจากลักษณะน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าความสกปรกโดยเฉพาะในรูปของสารอินทรีย์ที่วัดเป็นค่าบีโอดี ซีโอดีค่อนข้างสูงทำให้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพจำเป็นต้องมีในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยเฉพาะระบบผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อนำมาผลิตกระแสไปฟ้าใช้ในโรงงานและขายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลการศึกษาตามโครงการนี้พบว่า การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ 11.1 % ถึง 60.2 % ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มในการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยคาดว่าการผลิตได้เพิ่มนี้จะสามารถรองรับการบริโภคพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นราว 30-90 ครัวเรือนต่อปี

4.4.2 ด้านสิ่งแวดล้อม

ปัญหาของสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดังที่ได้มีการศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมถึงในการศึกษานี้ที่ได้ใช้อัลตราโซนิคในการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าสามารถทำให้น้ำเสียหลังผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีสารอินทรีย์และสีที่ลดลงได้ แต่ก็ยังมีความยุ่งยากในการเพิ่มขั้นตอนของการ pretreatment และค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการลงทุนซึ่งยังไม่สามารถได้น้ำที่มีคุณภาพดี ที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ แต่เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ข้อดีของกระบวนการนี้เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆคือ เป็นกระบวนการที่สะอาดเนื่องจากไม่ต้องมีการเติมสารเคมีอื่นใดในกระบวนการ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 61% โดยการทดลองแบบ CSTR ซึ่งเมื่อนำส่วนประโยชน์ที่ได้รับด้านผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นและลดสารอินทรีย์ในระบบบำบัดหลังผ่านระบบก๊าซชีวภาพที่ลดลง จะเห็นได้ว่ามีผลดีทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

4.5 การพิจารณาความเป็นได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่

จากการตรวจวัดค่าของน้ำเสียบ่อแรกหลังผ่านระบบผลิตแก๊สชีวภาพในระบบจริงเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วนำมาทดลองหมักแบบไร้อากาศในห้องปฏิบัติการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่ได้ทำการศึกษานั้นสามารถกำจัดสีในหน่วย ADMI เท่ากับ 48.5 % ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย มีค่าเท่ากับ 77.01 % 82.2 % และ 75.4 % ตามลำดับ ส่วนสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนิน และสารฮิวมิค หลังผ่านระบบผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่ามีประสิทธิภาพกำจัด 22.3 % 15.7 % 19.8 % 27.2 % และ 28.5 % ตามลำดับ ส่วนการบำบัดขั้นต้นก่อนการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถกำจัดสีในหน่วย ADMI เท่ากับ 60.7 % ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย มีค่าเท่ากับ 82.2 % 90.5 % และ 80.5 % ตามลำดับ ส่วนสารอินทรีย์ในรูปของ

สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนิน และสารฮิวมิค หลังผ่านระบบผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่ามีประสิทธิภาพกำจัด 31.3 % 20.9 % 24.5 % 31.5 % และ 35.2 % ตามลำดับ จึงจะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนนำไปผลิตแก๊สชีวภาพส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในรูปต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากนำไปใช้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียจะมีการบำบัดในขั้นต่อไปหลังจากผ่านระบบหมักแก๊สชีวภาพแล้วคือระบบบ่อปรับเสถียรจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้น้ำบ่อสุดท้ายในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานมีค่าสีและสารอินทรีย์ลดลงด้วย

การนำไปใช้ประโยชน์ Koning และคณะ 2008 อาจจำแนกได้ได้เป็น 3 ประเภท คือ การใช้เพื่ออุตสาหกรรม ชุมชน (ครัวเรือน/ชลประทาน) และการเกษตร โดยสัมพันธ์กับการแบ่งระดับของกระบวนการปรับปรุงลักษณะภาพน้ำ อย่างไรก็ตาม น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นตามที่เสนอในงานวิจัยนี้ น้ำสุดท้ายหลังผ่านการหมักและตั้งทิ้งไว้ในระยะเวลา 90-120 วันก็ยังไม่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ การใช้ประโยชน์ในระดับการบำบัดนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เพื่อการเกษตรมากกว่าการปล่อยสู่แหล่งน้ำ สำหรับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

องค์ประกอบของน้ำ	**มาตรฐานที่กำหนด**			
	กรมควบคุมมลพิษ	**กรมโรงงานอุตสาหกรรม**	**GTZ* (for the Palm Oil Industry, Thailand)**	**กระทรวงอุตสาหกรรม มาเลเซีย**
pH	5.5 - 9.0	5.5 - 9.0	5.0 – 9.0[1]	5.0 – 9.0[2]
BOD_5	<20 mg/L	<20 mg/L	<100 mg/L[1]	<100 mg/L[2]
COD	<120 mg/L	<120 mg/L	<1,000 mg/L [1]	-
SS	<50 mg/L	<50 mg/L	<150 mg/L[1]	<400 mg/L[2]
TKN	<100 mg/L	<120 mg/L	<50 mg/L[1]	<200 mg/L[3]
Oil & Grease	<5 mg/L	<5 mg/L	<25 mg/L[1]	<50 mg/L[3]
Temperature	<40 °C	<40 °C	<40 °C[1]	<45 °C[3]

ที่มา: [1]GTZ (1997) [2]Hameed *et al*. (2003) [3]Rupani *et al*. (2010)

*GTZ = German Technical Cooperation

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประยุกต์การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันในน้ำเสียได้ 50.3 % 53.1 % และ 68.2% ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าไขมันในน้ำเสียลดลงอยู่ในช่วงของค่าแนะนำในการเดินระบบแบบไม่ใช้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (น้อยกว่า 10 g/L)

2. จากการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตมีเทนและศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์หลังผ่านการหมักในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ที่อุณหภูมิ 35 °c ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคทำให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 29.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 539.1 L CH_4/g COD นอกจากนี้พบว่าการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิคมีผลทำให้น้ำตาลรีดิวซ์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้นถึง 76 % ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อเทียบกับชุดที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในรูปของบีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น 22.2 % และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น 30.5 % สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและการกำจัดสีในหน่วย ADMI มีค่าเพิ่มขึ้น 10.5 % และ 10.7 % ตามลำดับ

3. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค หลังผ่านการหมักแบบไร้อากาศ พบว่า สามารถกำจัดสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนิน และสารฮิวมิค ได้เพิ่มขึ้น 10.5 % 10.2 % 14.4 % 21.1 % และ 21.5 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม

4. หลังจากนั้นทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และระยะเวลากักเก็บ 8 16 และ 32 วัน (OLR 1.00-6.30 gVS/L/day) ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 520.5 L CH_4/ g COD ที่ระยะเวลากักเก็บ 16 วัน โดยให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 60.2 % เมื่อเทียบกับชุดควบคุม

5. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หลังผ่านระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องในรูปของบีโอดีมีค่าเท่ากับ 82.2 % และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าเท่ากับ 90.5 % สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและการกำจัดสีในหน่วย ADMI มีค่าเท่ากับ 80.5 % และ 60.7 % ส่วนสารอินทรีย์ในรูปของสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน ลิกนิน และสารฮิวมิค หลังผ่านการหมัก

แบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการตกจมตามธรรมชาติร่วมกับอัลตราโซนิค มีประสิทธิภาพกำจัด 31.3 % 20.9 % 24.5 % 31.5 % และ 35.2 % ตามลำดับ

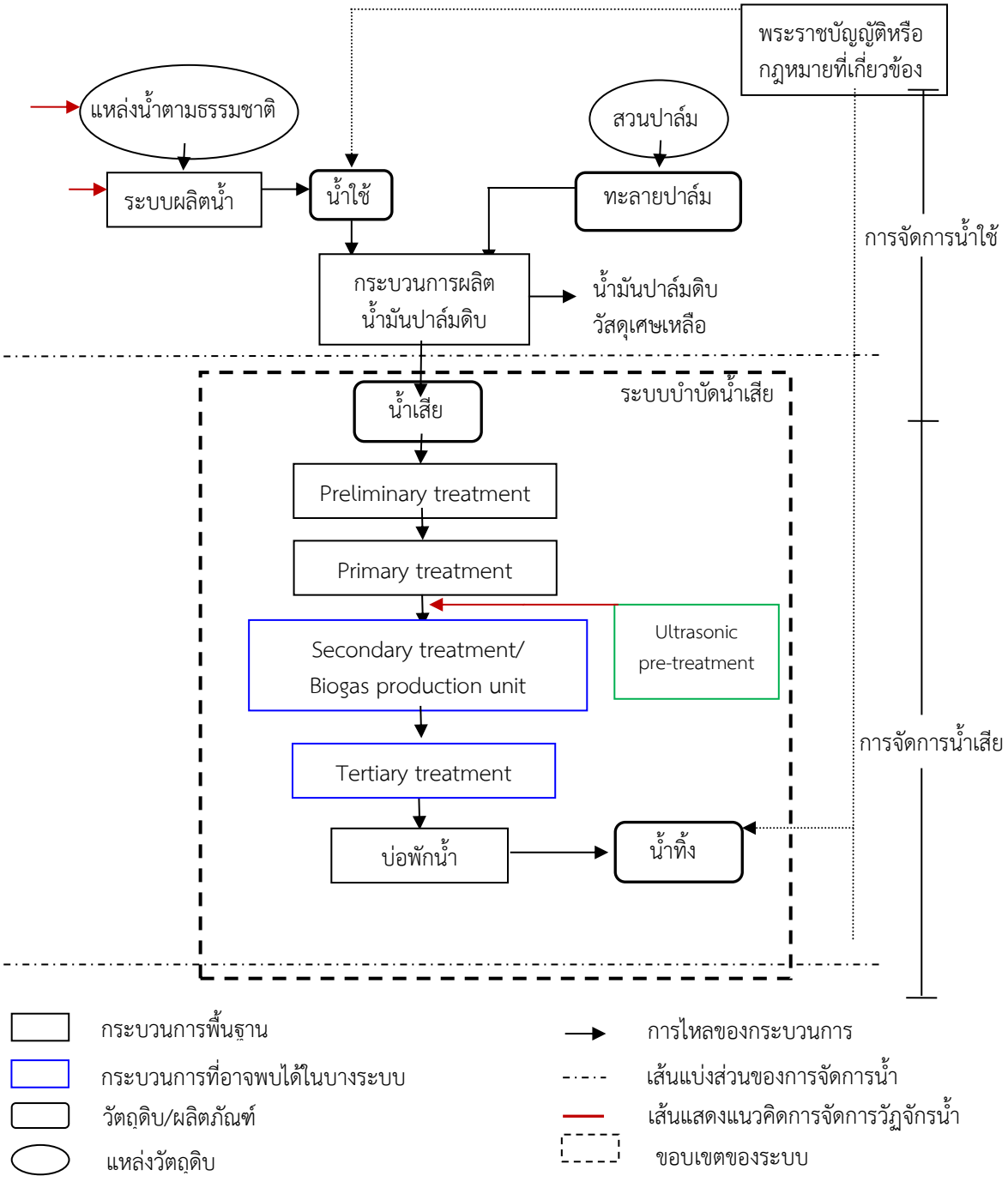
6. คำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ที่อัตราคิดลด 8.45% มีค่าเท่ากับ 1,162,152 บาท และได้อัตราผลตอบแทนตลอดอายุโครงการคือประมาณ 16% ซึ่งมากกว่าต้นทุนของเงินทุนของโครงการและสูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังที่ตั้งไว้ที่ 15% และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 3 ปี 6 เดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการศึกษาทดลองพบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดตามที่เสนอยังคงมีสารอินทรีย์และสีปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม การใช้ประโยชน์จากการบำบัดระดับในนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เพื่อการเกษตรมากกว่าการปล่อยสู่แหล่งน้ำ แนวทางหนึ่งในการจัดการน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (water reclamation) คือการนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม (direct reuse) เช่นใช้รดสวนปาล์มของโรงงาน ส่วนหนึ่งปล่อยให้ซึมลงสู่ใต้ดินและปล่อยให้มีการระเหยตามธรรมชาติ

2. ในด้านเศรษฐศาสตร์โครงการให้อัตราผลตอบแทนที่มากกว่าต้นทุนเงินทุนของโครงการและอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังที่ตั้งไว้ที่ 15% เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งทำให้โครงการมีความอ่อนไหวและความเสี่ยงค่อนข้างสูง โดยถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราคิดลดหรือต้นทุนเงินทุนของโครงการเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้โครงการมีผลตอบแทนที่ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จำนวนเงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการที่มีการลงทุนที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะต้นทุนของ การสร้างบ่อที่สูงถึง 3.2 ล้านบาท เมื่อเทียบกับผลตอบแทนที่จะได้จากการประหยัดค่าไฟฟ้าที่ไม่ได้สูงมากนัก ซึ่งอาจทำให้โครงการขาดความน่าสนใจ ผลตอบแทนที่ได้รับจากการประหยัดค่าไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจึงมีความสำคัญต่อผลตอบแทนที่จะได้รับจากโครงการ ซึ่งถ้าระบบผลิตแก๊สเกิดมีปัญหาไม่สามารถผลิตแก๊สได้ตามที่ต้องการ จะทำให้ความเป็นไปได้ของโครงการต่ำและไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

3. การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิค pretreatment เป็นการบำบัดขั้นต้นให้กับน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบการหมัก (ภาพประกอบที่ 5-1) ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพได้ ซึ่งทำให้น้ำเสียหลังผ่านออกจากระบบมีคุณภาพที่ดีขึ้นด้วย เมื่อน้ำเสียหลังผ่านระบบผลิตแก๊สชีวภาพมีคุณภาพดีขึ้นแล้ว จำนวนบ่อพักที่ต้องใช้รองรับน้ำเสียด้วยระบบบ่อผึ่งจากเดิมที่มีจำนวนหลายบ่อ (5-13 บ่อ) วิธีนี้อาจช่วยลดจำนวนบ่อพักหรือพื้นที่ที่ต้องใช้ในการพักน้ำเสียหลังผ่านการหมักแก๊สชีวภาพลงได้ เป็นการประหยัดค่าพื้นที่ที่ต้องลงทุนในอนาคต ซึ่งควรมีการศึกษาต่อยอดในประเด็นนี้



ภาพที่ 5-1 แนวคิดการประยุกต์ใช้ Ultrasonic pretreatment
ในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

บรรณานุกรม

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และ สมาคมอุทกธรณีวิทยาไทย. (2555). น้ำบาดาลกับความมั่นคงทางการเกษตร. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. http://www.dgr.go.th/isdgr/farmland/ farmland_security_with_groundwater.pdf. (สืบค้นเมื่อ 12 ธันวาคม 2555).

กรมการค้าภายใน. (2554). สถานการณ์และแนวโน้ม: น้ำมันปาล์ม. ฝ่ายวิจัยธุรกิจ. กระทรวงพาณิชย์. http://www.exim.go.th/doc/newsCenter/11248.pdf. (สืบค้นเมื่อ 1 มกราคม 2556).

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). แนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=job. (สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2555).

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2556). โรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงสถิติโรงงานที่ได้รับอนุญาตฯ รายเดือน และรายปี ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. http://userdb.diw.go.th/results1.asp. (สืบค้นเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2556).

เนตรนภา เมยกลาง และ เฉลิม เรื่องวิริยะชัย. (2557). วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 14 (4) : ตุลาคม - ธันวาคม 2557.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. (2539). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153ง. 7 มิถุนายน 2560. หน้า 11-15.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. (2554). การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. httt://www.diw.go.th/research. (สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2555).

สุภาวดี ผลประเสริฐใ (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสส าหรับการผลิตเอทานอล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 22 ฉบับที่ 5 (ฉบับพิเศษ) 2557.

อรุษา เชาวนลิขิต. (2554). การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒม. 3(6): 26-36.

Abdurahman, N. H., Rosli, Y. M., and Azhari, N. H. (2011). Development of a membrane anaerobic system (MAS) for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Desalination, 266*(1-3), 208-212. doi: 10.1016/j.desal.2010.08.028

Azmi, N. S., Yunos, K. F. M., Baharuddin, A. S., and Dom, Z. M. (2013). The Effect of Operating Parameters on Ultrafiltration and Reverse Osmosis of Palm Oil Mill Effluent for Reclamation and Reuse of Water. *Bioresources, 8*(1), 76-87.

Bernabe, G. A., Almeida, S., Ribeiro, C. A., and Crespi, M. S. (2011). Evaluation of organic molecules originated during composting process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 106*(3), 773-778. doi: 10.1007/s10973-011-1420-1

Chaiprapat, S., and Laklam, T. (2011). Enhancing digestion efficiency of POME in anaerobic sequencing batch reactor with ozonation pretreatment and cycle

time reduction. *Bioresource Technology, 102*(5), 4061-4068. doi: 10.1016/j.biortech.2010.12.033

Chong, S. H., Sen, T. K., Kayaalp, A., and Ang, H. M. (2012). The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review. *Water Research, 46*(11), 3434-3470. doi: 10.1016/j.watres.2012.03.066

Dhall, P., Siddiqi, T. O., Ahmad, A., Kumar, R., & Kumar, A. (2012). Restructuring BOD: COD Ratio of Dairy Milk Industrial Wastewaters in BOD Analysis by Formulating a Specific Microbial Seed. *Scientific World Journal*. doi: Artn 10571210.1100/2012/105712

Di Bene, C., Pellegrino, E., Debolini, M., Silvestri, N., and Bonari, E. (2013). Short- and long-term effects of olive mill wastewater land spreading on soil chemical and biological properties. *Soil Biology & Biochemistry, 56*, 21-30. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.02.019

Elaiyaraju, P., & Partha, N. (2012). Biogas Production from Sago (Tapioca) Wastewater Using Anaerobic Batch Reactor. *Energy & Environment, 23*(4), 631-645.

Esposito, G., Frunzo, L., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environmental Technology, 33*(24), 2733-2740. doi: 10.1080/09593330.2012.676077

Gusakov, A. V., Kondratyeva, E. G., & Sinitsyn, A. P. (2011). Comparison of two methods for assaying reducing sugars in the determination of carbohydrase activities. *Int J Anal Chem, 2011*, 283658. doi: 10.1155/2011/283658

Hernandez-Sancho, F., Molinos-Senante, M., and Sala-Garrido, R. (2011). Cost modelling for wastewater treatment processes. *Desalination, 268*(1-3), 1-5. doi: 10.1016/j.desal.2010.09.042

Jamal, P., Idris, Z. M., and Alam, M. Z. (2011). Effects of physicochemical parameters on the production of phenolic acids from palm oil mill effluent under liquid-state fermentation by Aspergillus niger IBS-103ZA. *Food Chemistry, 124*(4), 1595-1602. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.08.022

Ji, C. M., Eong, P. P., Ti, T. B., Seng, C. E., and Ling, C. K. (2013). Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable & Sustainable Energy Reviews, 26*, 717-726. doi: 10.1016/j.rser.2013.06.008

Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., . . . Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research, 49*, 62-82. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.066

Kullavanijaya, P. and Thongduang, P. (2012). Enhanced biogas production in anaerobic digestion of cassava wastewater though supplementation of biodiesel waste as co-substrate. *Energy International Journal of Renewable Research*, *2*(3), 510-515.

Lam, M. K., and Lee, K. T. (2011). Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. *Biotechnology Advances, 29*(1), 124-141. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.10.001

Li, M. F., Sun, S. N., Xu, F., and Sun, R. C. (2012). Ultrasound-enhanced extraction of lignin from bamboo (Neosinocalamus affinis): Characterization of the ethanol-soluble fractions. *Ultrason Sonochem, 19*(2), 243-249. doi: 10.1016/j.ultsonch.2011.06.018

Mason, T., & Peters, D. (2002). The ultrasonic probe. Practical Sonochemistry, 64–81. doi:10.1533/9781782420620.64

Mohammad, N., Alam, M. Z., Kabbashi, N. A., and Ahsan, A. (2012). Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi: A review. *Resources Conservation and Recycling, 58*, 69-78. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.10.009

Molinos-Senante, M., Hernandez-Sancho, F., and Sala-Garrido, R. (2013). Cost modeling for sludge and waste management from wastewater treatment plants: an empirical approach for Spain. *Desalination and Water Treatment, 51*(28-30), 5414-5420. doi: 10.1080/19443994.2013.770486

Mumtaz, T., Yahaya, N. A., Abd-Aziz, S., Rahman, N. A., Yee, P. L., Shirai, Y., and Hassan, M. A. (2010). Turning waste to wealth-biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates from palm oil mill effluent - a Malaysian perspective. *Journal of Cleaner Production, 18*(14), 1393-1402. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.05.01

Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R. J., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: a review. *Ultrason Sonochem, 18*(1), 1-18. doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.02.014

Rasdi, Z., Mumtaz, T., Rahman, N. A., & Hassan, M. A. (2012). Kinetic analysis of biohydrogen production from anaerobically treated POME in bioreactor under optimized condition. *International Journal of Hydrogen Energy, 37*(23), 17724-17730. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.095

Razali, W. A. W., Baharuddin, A. S., TarmezeeTalib, A., Sulaiman, A., Naim, M. N., Hassan, M. A., & Shirai, Y. (2012). Degradation of Oil Palm Empty Fruit Bunches

(Opefb) Fibre during Composting Process Using in-Vessel Composter. *Bioresources, 7*(4), 4786-4805.

Rupani, P. F., Singh, R. P., Ibrahim M. H. and Esa, N. (2010). Review of Current Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Methods: Vermicomposting as a Sustainable Practice. *World Applied Sciences Journal*, *11*(1), 70-81.

Sahad, N., Som, A. M., Baharuddin, A. S., Mokhtar, N., Busu, Z., & Sulaiman, A. (2014). Physicochemical Characterization of Oil Palm Decanter Cake (OPDC) for Residual Oil Recovery. *Bioresources, 9*(4), 6361-6372.

Silalertruksa, T., Bonnet, S., and Gheewala, S. H. (2012). Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand. *Journal of Cleaner Production, 28*, 225-232. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.07.022.

Sinnaraprasat, S., and Fongsatitkul, P. (2011). Optimal condition of fenton's reagent to enhance the alcohol production from palm oil mill effluent (POME). *EnvironmentAsia*, *4*(2), 9-16.

Singh, R. P., Ibrahim, M. H., Esa, N., and Iliyana, M. S. (2010). Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 9*(4), 331-344. doi: 10.1007/s11157-010-9199-2

Singhal, Y., Bansal, S.K. and Singh, R. (2012). Evaluation of biogas production from solid waste using pretreatment method in anaerobic condition. *International Journal of Emerging Sciences*, *2*(3), 405-414.

Trzcinski, A. P., Tian, X. B., Wang, C., Lin, L. L., & Ng, W. J. (2015). Combined ultrasonication and thermal pre-treatment of sewage sludge for increasing methane production. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 50*(2), 213-223. doi: 10.1080/10934529.2014.975561

Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., and Anuar, N. (2010). Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end-of-pipe processes. *Journal of Environmental Management, 91*(7), 1467-1490. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.02.008

Xu, H. C., He, P. J., Wang, G. Z., and Shao, L. M. (2011). Effects of activated sludge flocs and pellets seeds on aerobic granule properties. *Journal of Environmental Sciences-China, 23*(4), 537-544. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60445-7

Xu, H. C., He, P. J., Yu, G. H., and Shao, L. M. (2011). Effect of ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion and its sludge dewaterability. *Journal of*

Environmental Sciences-China, 23(9), 1472-1478. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60618-3

Yeneneh, A. M., Chong, S., Sen, T. K., Ang, H. M., & Kayaalp, A. (2013). Effect of Ultrasonic, Microwave and Combined Microwave-Ultrasonic Pretreatment of Municipal Sludge on Anaerobic Digester Performance. *Water Air and Soil Pollution, 224*(5). doi: Artn 155910.1007/S11270-013-1559-4

Yuan, T. Q., Xu, F., He, J., and Sun, R. C. (2010). Structural and physico-chemical characterization of hemicelluloses from ultrasound-assisted extractions of partially delignified fast-growing poplar wood through organic solvent and alkaline solutions. *Biotechnology Advances, 28*(5), 583-593. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.05.016

Zakaria, S., Roslan, R., Amran, U. A., Chia, C. H., & Bakaruddin, S. B. (2014). Characterization of Residue from EFB and Kenaf Core Fibres in the Liquefaction Process. *Sains Malaysiana, 43*(3), 429-435

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

1. วิธีการคำนวณหาน้ำมันและไขมัน (Fat, Oil & Grease)

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณของน้ำมันและไขมัน ทำการวิเคราะห์โดยวิธี Soxhlet Extraction Method หลักการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและไขมันในน้ำคือการสกัดน้ำมันและไขมันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ในที่นี้ใช้ n-hexane เป็นตัวทำละลาย ทำให้ตัวอย่างเป็นกรด (acidify) โดยใช้ 1:1 HCl (หรือ 1:1 H_2SO_4) จนได้ pH 2 หรือต่ำกว่า จากนั้นเก็บในตู้เย็น (ในกรณีที่ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ภายในเวลา 2 ชั่วโมง)

อุปกรณ์และสารเคมี

1. ชุดเครื่องมือที่ใช้สำหรับสกัด(soxhlet)
2. เครื่องดูดสุญญากาศ
3. Buchner funnel
4. อ่างไอน้ำ
5. ขวดสกัด (extraction flask)
6. เครื่องชั่งทศนิยมสามตำแหน่ง
7. ตู้อบ
8. Glass veads
9. เดซิเคเตอร์
10. กระดาษกรอง Whatman No.40 เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
11. ผ้ามัสลินตัดเป็นวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
12. หลอดสำหรับสกัด (paper extraction thimble)
13. กรด HCl
14. Solvent mixture, 80% n-hexane/20% MTBE (V/V)

วิธีการหา

1. เตรียมตัวอย่างโดยทำให้เป็นกรดด้วย 1:1HCl จนมี pH 2 หรือต่ำกว่า
2. เตรียมการกรองโดยการวางผ้ามัสลินบนที่กรองแล้ววางทับด้วยกระดาษกรองแล้วผ่านสารละลาย filter aid ลงไปบนที่กรองแล้วเปิดเครื่องสุญญากาศและล้างด้วยน้ำกลั่นประมาณ 1 ลิตร จนกระทั่งแห้ง
3. กรองตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้ดูจนแห้ง ใช้ปากคีมหยิบกระดาษกรองออกมา วางบนกระจกนาฬิกา เช็ดข้างๆที่กรองโดยใช้กระดาษกรองชุ่มเฮกเซนเช็ดด้านข้างของกรวยบุชเนอร์

วางกระดาษกรองนี้รวมบนกระจกนาฬิกา ม้วนกระดาษกรองเข้าด้วยกันแล้วใส่ลงในหลอดสำหรับสกัดที่ทำด้วยกระดาษกรอง (paper extraction thimble)

4. นำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ใส่เม็ดแก้วลงไปให้เต็ม ชั่งขวดที่จะใช้สกัด ใส่ thimble ลงไปในเครื่องสกัด เติม Solvent mixture ลงในขวดที่ใช้สกัด แล้วสกัดที่อัตราเร็ว 20 รอบต่อชั่วโมงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นับจากเริ่มการสกัดรอบแรก
5. จากนั้นกลั่นตัวทำละลายจากขวดสกัดในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วนำขวดที่ใช้สกัดไปทำให้แห้งโดยใช้อ่างน้ำร้อนเป็นเวลา 1 นาที
6. ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ 30 นาที ชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของขวดสกัดคือ ปริมาณน้ำมันและไขมัน

$$\text{mg/l Oil and Grease} = \frac{(B - A)}{\text{ml Sample}} \times 1000$$

เมื่อ A = น้ำหนักของขวดสกัดก่อนการทดลอง (mg)

B = น้ำหนักของขวดสกัดหลังการทดลอง (mg)

2. วิธีการคำนวณหา COD

การหา COD ทำได้โดยใช้สาร oxidant ที่สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ในตัวอย่างได้สูง ในที่นี้ใช้โพแทสเซียมไดโครเมต

อุกรณ์และสารเคมี

1. Digestion vessel ขนาด 16x100 มิลลิเมตร พร้อมด้วยฝาเกลียวปิดซึ่งภายในเป็น TFE
2. Block heater ให้ความร้อน พร้อมรูสำหรับใส่หลอด
3. test tube rack
4. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับใช้ย่อยสลาย 0.01667 M
5. สารละลาย ไทเทรนท์เฟอรัสแอมโมเนียซันเฟต (FAS) 0.1 M
6. น้ำยากรดซันฟิวริก
7. สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์

วิธีการหา

1. ใส่ตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร ลงในหลอด digestion vessel เติมสารละลายสำหรับใช้ย่อยสลาย 1.5 มิลลิลิตรและน้ำยากรดซันฟิวริก 3.5 มิลลิลิตร
2. ปิดจุกหลอดให้แน่น กลับหลอดไปมาหลายครั้งเพื่อให้เกิดการผสมอย่างสมบูรณ์
3. วางหลอดลงใน blocl digester ที่ preheat ไว้ที่ 150 องศาเซลเซียสก่อนแล้ว รีฟลักซ์ 2ชั่วโมง
4. ปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องแล้วถ่ายหลอดลงใน test tube rack
5. เติม 0.1 มิลลิลิตรของเฟอร์โรอินดิเคเตอร์แล้วคนอย่างเร็ว
6. ไทเทรตด้วย 0.1 M FAS จุดสิ้นสุดเมื่อสีเปลี่ยนจาก blue-green ไปเป็น reddish-brown
7. ทำการรีฟลักซ์และไทเทรตแบลงค์ซึ่งมีน้ำกลั่นและน้ำยาเคมีในปริมาตรเดียวกันกับตัวอย่าง

$$COD = \frac{(A-B) \times M \times 8{,}000}{ml\ (sample)}$$

เมื่อ M = molarity ของ FAS

A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้สำหรับแบลงค์ (ml)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง (ml)

8,000 = น้ำหนักมิลลิกรัมสมมูลย์ของออกซิเจน x 1,000

3. วิธีการหา BOD

อุปกรณ์และสารเคมี

1. ขวดบีโอดี ขนาด 300 mL พร้อมจุกแก้ว และฝาพลาสติกที่ปิดได้สนิท
2. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)
3. บิวเรต (burette)
4. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาดความจุ 500 mL
5. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ควบคุมอุณหภูมิที่ 20±1°C
6. ปิเปต (pipette)
7. กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 1000 mL
8. อุปกรณ์เติมอากาศ
9. น้ำกลั่น (Distilled Water : DW)
10. Sulfulic acid เข้มข้น (conc.H_2SO_4)
11. Sulfuric acid (H_2SO_4) ความเข้มข้น 1 N

    ปิเปต conc.H_2SO_4 ปริมาตร 2.8 mL ลงในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร
12. Starch solution

    ชั่งแป้ง (Soluble starch) ชนิด laboratory grade 20 g และ salicylic acid (C_7H_6O3) 2 g (เพื่อป้องกันการบูดของแป้ง) ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1000 mL
13. Manganese sulfate solution

    ชั่ง Manganese sulfate tetrahydrate ($MnSO_4.4H_2O$) 480 g หรือManganese sulfate dihydrate ($MnSO_4.2H_2O$) 400 g หรือ Manganese sulfate monohydrate ($MnSO_4.H_2O$) 364 g ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นน้าไปกรอง และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL สารละลายนี้จะต้องไม่เกิดสีกับน้ำแป้งเมื่อเติม potassium iodide solution ในสภาพที่เป็นกรด
14. Alkali-Iodide-Azide solution

    ชั่ง Sodium hydroxide (NaOH) 500 g หรือ Potassium hydroxide (KOH) 700 g และ Sodium iodide (NaI) 135 g หรือ Potassium iodide (KI) 150 g ละลายในน้ำกลั่น และเติมโซเดียมเอไซด (NaN_3) (ชั่ง NaN_3 10 g ละลายในน้ำกลั่น 40 mL) ลงในสารละลาย Alkali-Iodide และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร
15. Standard sodium thiosulfate titrant ความเข้มข้น 0.025 N

    ชั่ง Sodium thiosulfate pentahydrate ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) 6.205 g และ Sodium hydroxide (NaOH) 0.4 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร standardize กับ Standard potassium bi-iodate solution

16. Standard potassium bi-iodate solution ความเข้มข้น 0.025 N

ชั่ง Potassium bi-iodate [$KH(IO_3)_2$] 0.8124 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

17. Magnesium sulfate solution

ชั่ง Magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4.7H_2O$) 22.5 g ละลายในน้กลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

18. Calcium chloride solution

ชั่ง Calcium chloride ($CaCl_2$) 27.5 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

19. Ferric chloride solution

ชั่ง Ferric chloride hexahydrate ($FeCl_3.6H_2O$) 0.25 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

20. Phosphate buffer solution

ชั่ง Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) 8.5 g Dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4) 21.75 g และDisodium hydrogen phosphate heptahydrate ($Na_2HPO_4.7H_2O$) 33.4 g และAmmonium chloride (NH_4Cl) 1.7 g ละลายในน้ำกลั่น 500 mL และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้จะมีค่า pH เท่ากับ 7.2

21. Glucose-Glutamic acid solution

ชั่ง Glucose และ Glutamic acid ชนิด reagent grade (อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) อย่างละ 0.15 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้ง เว้นแต่จะเก็บไว้ในสภาวะที่ปลอดเชื้อ ในที่ที่มีอุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 °C

22. Sodium hydroxide (NaOH) ความเข้มข้น 1 N

ชั่ง NaOH 40 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

23. Sulfuric acid ความเข้มข้น 1 N

เติม Conc. H_2SO_4 ปริมาตร 28 mL ลงในน้ำกลั่นประมาณ 600 mL และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ในขวดปรับปริมาตร เก็บในขวดแก้วสีชาที่อุณหภูมิห้อง

24. Sodium sulfite solution

ชั่ง Sodium sulfite (Na_2SO_3) 1.575 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ในขวดปรับปริมาตร (สารละลายนี้จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง)

วิธีการหา

1) การเตรียมตัวอย่าง

1.1 นำตัวอย่างน้ำมาวัด pH ถ้าไม่อยู่ในช่วง 6.0-8.0 ให้ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 7.0-7.2 โดยการเติม 1 N H_2SO_4 หรือ 1 N NaOH โดยปริมาณของ 1 N H_2SO_4 หรือ 1 N NaOH ที่ใช้ปรับ pH ต้องไม่ทำให้ตัวอย่างน้ำมีปริมาตรเกิน 0.5% ของปริมาตรเดิม

1.2 ในกรณีที่ตัวอย่างน้ำมีคลอรีนตกค้าง (residual chlorine) จำเป็นจะต้องกำจัดออกก่อน โดยปกติคลอรีนตกค้างจะลดลงเองเมื่อตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมง แต่ในตัวอย่างที่คลอรีนตกค้างปริมาณมากๆ จะต้องก้าจัดโดยเติม Sodium sulfite solution ซึ่งปริมาณที่จะต้องเติมลงไปหาได้จากการนำตัวอย่างน้ำปริมาตร 100-1000 mL เติม H_2SO_4 1+50 (H_2SO_4 1 mL + น้ำกลั่น 50 mL) 10 mL เติม Potassium iodide solution 10 mL (ชั่ง Potassium iodide 10 g ละลายในน้ำกลั่น 100 mL) จากนั้น ไตเตรต ด้วย Standard sodium thiosulfate titrant 0.025 N โดยใช้น้ำแป้งเป็น indicator จะทราบปริมาณของ Standard sodium thiosulfate titrant ที่ต้องเติมในตัวอย่างน้ำ หลังจากเติม Sodium sulfite solution ตามปริมาณที่ค้านวณได้ในตัวอย่างน้ำแล้วกวนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 – 20 นาที (ข้อควรจำ : ปริมาณ Sodium sulfite solution ที่มากเกินไปจะทำให้ความต้องการออกซิเจน และการตอบสนองต่อ Organic chloramine compound ช้าลง ซึ่งจะส่งผลต่อการทดสอบตัวอย่าง)

1.3 ในกรณีที่ตัวอย่างน้ำมีสารพิษเจือปนอยู่ปริมาณมากจะฆ่าเชื้อแบคทีเรียตาย เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตสารเคมี เป็นต้น จะต้องศึกษาวิธีก้าจัดออกก่อน

1.4 กรณีตัวอย่างน้ำที่มีความเข้มข้นของ DO มากกว่าจุดอิ่มตัวที่ 20 °C ซึ่งสามารถพบได้ในน้ำตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำหรือในแหล่งน้ำที่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) เพื่อป้องกันการสูญเสียปริมาณออกซิเจนระหว่างการบ่มจึ่งต้องลดปริมาณ DO ลงโดยการน้าตัวอย่างไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 20±3 °C ในภาชนะปิด แล้วน้าไปเขย่า หรือเติมอากาศ จากนั้นนำไปกรอง

1.5 กรณีตัวอย่างน้ำที่มี Hydrogen peroxide ปนเปื้อน โดย Hydrogen peroxide ในน้ำเสียจะมาจากกระบวนการฟอกสีของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานกระดาษ บ่อบำบัดของโรงงานทอผ้า สำหรับการวิเคราะห์ BOD ให้นำน้ำตัวอย่างใส่ภาชนะเปิดแล้วเขย่าเพื่อให้ Hydrogen peroxide สลายตัว หลังจากนั้นให้ตรวจดูปริมาณ peroxide ที่สลายตัวไปโดยใช้ Peroxide specific test strip วัดความเข้มข้นของ DO ตลอดระยะเวลาการเขย่า ระยะเวลาการเขย่าควรอยู่ในช่วง 1-2 ชั่วโมง ทั้งนี้ต้องขึ้นกับปริมาณของ Hydrogen peroxide (ปฏิกิริยา peroxide จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อค่า DO ไม่เพิ่มขึ้นภายในช่วง 30 นาที

2) การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบตัวอย่างมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีโดยตรง (direct method) และวิธีทำให้เจือจาง (Dilution Method) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีทำให้เจือจาง

วิธีทำให้เจือจาง (Dilution Method)

ใช้ในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีความสกปรกสูง (มีค่า BOD มากกว่า 7 mg/L) จำเป็นจะต้องท้าให้ตัวอย่างน้ำมีความสกปรกเจือจางลง โดยใช้น้ำผสมเจือจาง (dilution water) และควรทำหลายๆ ความเข้มข้น (อย่างน้อย 2 ความเข้มข้น) เช่น ถ้าน้ำตัวอย่างมีการปนเปื้อนสูง สกปรก สีดำคล้ำ ให้ทดสอบตามวิธีที่ 2 และเลือกทำ dilution ที่ 10-100 %

2.1 การคัดเลือกและเก็บรักษาน้ำเพื่อใช้เจือจาง

น้ำที่ใช้ส้าหรับเจือจางควรมาจากแหล่งที่เหมาะสม เช่น น้ำกลั่น และควรเป็นน้ำกลั่นที่ปราศจากโลหะหนักโดยเฉพาะทองแดงและสารพิษจ้าพวกคลอรีน ซึ่งจะรบกวนการทดสอบบีโอดี การเก็บรักษาน้ำเจือจางควรเก็บในภาชนะที่สะอาด และไม่ควรเก็บไว้นานเกิน 24 ชั่วโมง หลังจากเติมสารอาหาร แร่ธาตุ และ บัฟเฟอร์ แล้ว และหลีกเลี่ยงการใช้น้ำเจือจางที่มีค่าบีโอดีของ Blank มากกว่า 0.2 mg/L

2.2 การเตรียมน้ำผสมเจือจาง (Dilution water)

- นำน้ำกลั่นที่ปราศจากสารมีพิษ (กลั่นจากเครื่องกลั่นแก้ว) มาปรับอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20±3 ℃ และปรับ pH เป็นกลาง ปรับคุณภาพให้เหมาะกับการดำรงชีวิตของจุลชีพ โดยเติมสารละลายอาหารฟอสเฟตบัฟเฟอร์, แมกนีเซียมซัลเฟต, แคลเซียมคลอไรด์ และไอร์ออน (III) คลอไรด์อย่างละ1 mL ต่อน้ำกลั่น 1 L

- เติมอากาศให้มีออกซิเจนละลายอิ่มตัว อย่างน้อย 1 ชั่วโมง (มีค่าDO อยู่ระหว่าง 8-9 mg/L)

2.3 หลักพิจารณาในการเติมหัวเชื้อ

ในการทดสอบหาค่าบีโอดี จำเป็นจะต้องมีปริมาณจุลินทรีย์ที่มากพอที่จะย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นในการเตรียมหัวเชื้อจุลชีพมีหลักพิจารณาดังนี้

- น้ำเสียจากชุมชน น้ำคลอง น้ำแม่น้ำที่ปนเปื้อนและมีปริมาณจุลินทรีย์สูง ไม่จำเป็นต้องเติมหัวเชื้อจุลชีพเพิ่ม สามารถทำเจือจางได้เลยตามวิธีทำให้เจือจาง

- น้ำทิ้งที่ผ่านการบ้าบัดจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาลที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ น้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิสูง น้ำที่มีค่าปริมาณจุลินทรีย์ต่ำ เช่นน้ำเสียจากระบบบำบัดชนิดแอนแอโรบิค ต้องเติมหัวเชื้อจุลชีพชนิดแอโรบิคเพิ่ม

2.4 วิธีเลือกอัตราส่วนในการผสมเจือจาง

เนื่องจากการทดสอบค่า BOD อาศัยปฏิกิริยาทางชีวเคมีโดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวการย่อยสลาย สภาวะแวดล้อมจะมีผลต่อการทดสอบมากทำให้ค่า BOD มีความผันแปรสูง การทดสอบตัวอย่างหนึ่งๆจึงควรผสมเจือจางหลายๆความเข้มข้น (ไม่ควรน้อยกว่า 2 ความเข้มข้น) ส่วนอัตราส่วนการผสมเจือจางอาจประมาณตามชนิดของตัวอย่างตามตารางที่ ก.1 จากสถิติข้อมูลเดิม หรือจากค่าความเข้มข้นโดยประมาณ (ดูตารางที่ ก.2) จากค่า COD (Chemical Oxygen Demand) ของตัวอย่างน้ำเสียที่ต้องการทดสอบ

ตารางที่ ก.1 Dilution and Type of Sample

เปอร์เซ็นต์ที่ใช้เจือจางตัวอย่างน้ำเสีย (% Dilution)	**ชนิดของตัวอย่างน้ำ (Type of sample)**
0.0 - 1.0	Strong lndustrial Wastes
1 - 5	Raw and Settled Waste water
5 - 20	Biologically treated Effluent
10 - 100	polluted River Waters

ตารางที่ ก.2 BOD Measurable with Various Dilution of Sample

Using percent mixtures	
% Dilution	**Range of BOD mg/L**
0.01	50,000 - 70,000
0.02	10,000 - 35,000
0.05	4,000 - 14,000
0.1	2,000 - 7,000
0.2	1,000 - 3,500
0.5	400 - 1,400
1.0	200 - 700
2.0	100 - 350
5.0	40 - 140
10.0	20 - 70
20.0	10 - 35
50.0	4 - 14
100	0 - 7

ตัวอย่างเช่น

ถ้าตัวอย่างน้ำเสียมีค่าซีโอดี = 100 mg/L

ค่าบีโอดีโดยประมาณ = $\frac{\text{ค่าCOD}}{2} = \frac{100}{2}$ = 50 mg/L

ดังนั้น เลือกอัตราส่วนที่ต้องใช้เจือจางตัวอย่างน้ำเสียจากตารางที่ 2 เพื่อใช้ทดสอบค่า BOD ได้ 3 ความเข้มข้น คือ 5%, 10% และ 20%

3) การคำนวณ (โดยวิธีทำให้เจือจาง)

$$\text{BOD } (\frac{\text{mg}}{\text{L}}) = \frac{[(DO_0 - DO_5) - (B_1 - B_2)] \times 100}{P}$$

DO_0 = ค่า DO ของตัวอย่างที่ทำการเจือจางแล้วในวันแรก
DO_5 = ค่าเฉลี่ย DO ของตัวอย่างที่ทำการเจือจางแล้วเก็บใน incubator 5 วัน
P = เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่ใช้ (เช่น 5 %, 10 %)
B_1 = ค่า DO ของ seed control ที่ทำการเจือจางแล้วในวันแรก
B_2 = ค่าเฉลี่ย DO ของ seed control ที่ทำการเจือจางแล้วเก็บใน incubator 5 วัน

4. การวิเคราะห์ของแข็งในน้ำ

Solids หมายถึง สิ่งเจือปนในน้ำที่เหลืออยู่เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมถึงสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น กรดอินทรีย์และกรดต่างๆที่ละลายในน้ำ สิ่งเจือปนที่เหลือเป็นของแข็งนี้มี
สารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายในน้ำหรือไม่ก็ได้ การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งในน้ำทำได้โดยการชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) แล้วรายงานผลในรูปน้ำหนักสารต่อปริมาตรของน้ำตัวอย่าง

Total Solids (TS) คือ สิ่งที่เหลืออยู่ภายหลังการระเหยน้ำออกจนหมดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C TS อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะการละลาย คือ

1) Dissolved Solids (DS) หมายถึง ส่วนที่ละลายได้ในน้ำ ซึ่งส่วนมากได้แก่ กรดอนินทรีย์ เช่น NaCl และสารอินทรีย์บางอย่าง เช่น น้ำตาล
2) Insoluble Solids หมายถึง ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำ แบ่งเป็น 2 ชนิดตามขนาดของชิ้นส่วนที่
ไม่ละลาย คือ
   - Suspended Solids (SS) หมายถึง ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำแต่มีขนาดเล็กพอที่จะแขวนลอย (suspend) อยู่ในน้ำได้ หาได้โดยการกรองตัวอย่างน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter, GF/C) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C
   - Settleable Solids หมายถึง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำจะตกตะกอนรวมกันที่ส่วนล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หาได้โดยนำน้ำตัวอย่างมาใส่ใน ภาชนะที่เรียกว่า Imhoff cone หรือ กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 ชม. แล้วอ่าน ปริมาตรของตะกอนที่ตกลงมา มีหน่วยเป็น มล./ลิตร

Volatile Solids (VS) and Fixed Solids (FS) หมายถึง ของแข็งที่สลายไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ
550-600 °C ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอินทรีย์กลายเป็น CO_2 และ H_2O ในขณะที่สารอนอนทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่เกิดการแยกสลายที่อุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลือคือของแข็งคงตัวซึ่งเป็นสารอนินทรีย์

การวิเคราะห์ของแข็งไม่ว่าจะอยู่ในรูปใดจะใช้วิธี gravimetric คือการชั่งน้ำหนักหลังจากทำให้แห้งแล้ว ดังนั้นภาชนะก่อนที่จะนำมาใช้จะต้องแห้ง ปราศจากฝุ่นละอองหรือความชื้น โดยจะต้องนำภาชนะไปทำให้แห้งในตู้อบ (oven) ที่อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 2 ชม. นำมาทิ้งให้เย็นใน dessicator แล้วจึงชั่งน้ำหนัก หลังการชั่งน้ำหนักครั้งที่ 1 แล้วภาชนะควรจะมีน้ำหนักคงที่ ถ้าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงให้นำภาชนะไปอบจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่ สำหรับตัวอย่างที่ต้องการหา volatile solids ต้องนำภาชนะที่ใช้ไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ในเตาเผา (muffle furnace) 1 ชม. เมื่อทำให้เย็นใน dessicator แล้วจึงจะนำมาใช้ได้

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ถ้วยกระเบื้อง (evaporating dish)
2. อ่างไอน้ำ (water bath)
3. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 mm
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. ตู้อบแห้ง
6. ตู้ดูดความชื้น
7. เครื่องดูดพร้อมปั๊มดูดอากาศ
8. Bucher's funnel

วิธีวิเคราะห์

Total Solids (TS)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีน้ำหนักคงที่แล้วจาก dessicator มาชั่ง สมมติให้น้ำหนัก = A
2. คนตัวอย่างน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงโดยใช้กระบอกตวง 100-200 มล. (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นกับปริมาณของแข็งในน้ำ) ใส่ในถ้วยกระเบื้องข้อ 1 นำไประเหยบนอ่างไอน้ำจนแห้ง
3. นำถ้วยกระเบื้องที่ระเหยน้ำแห้งแล้วไปใส่ในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105 °C เพื่อไล่ความชื้นนานประมาณ 1 ชม. แล้วนำไปทำให้เย็นใน dessicator
4. เมื่อเย็นแล้วจึงนำมาชั่ง สมมติ = B

$$\text{TS, mg/l} = \frac{(B-A)\times 10^6}{\text{ml sample}}$$

Suspended Solids (TSS)

1. นำกระดาษกรอง GF/C มาชั่งโดยเครื่องชั่งละเอียด สมมติได้น้ำหนัก = C กรัม นำไปวางบน evaporating dish หรือ petridish ก็ได้
2. วางกระดาษกรองลงบน Buchner's funnel ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศโดยใช้ปากคีบที่สะอาดใช้ น้ำกลั่นฉีดบนกระดาษกรองให้ทั่ว แล้วเปิดปั๊มดูดอากาศเพื่อให้กระดาษกรองแนบสนิทดีกับกรวย

3. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 50-100 mL (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นกับของแข็งแขวนลอยในน้ำ) ใส่ไปบนกระดาษกรอง ทีละน้อยพร้อมกับเปิดปั๊มดูดอากาศ พยายามให้ของแข็งกระจายไปทั่วๆ กระดาษกรอง
4. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรอจนกว่าจะแห้งแล้วใช้ปากคีบค่อยๆหยิบกระดาษกรองออกนำไปวางบนภาชนะที่ใส่เดิม
5. นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105 $^{\circ}$C นานประมาณ 1 ชม. ทำให้เย็นใน dessicator แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก สมมติได้ = D

$$\text{SS, mg/l} = \frac{(D-C) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

Dissolved Solids (DS)

สามารถหาได้โดย การคำนวณ DS = TS – TSS

Total Volatile Solids (TVS)

1. นำถ้วยกระเบื้องหลังจากหา TS แล้วมาเผาใน muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550°C จนได้เป็นเถ้าสีขาว ลดอุณหภูมิของถ้วยกระเบื้องลงโดยนำออกจากเตาเผาไปใส่ในตู้อบก่อน แล้วจึงนำไปทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น
   นำไปชั่งน้ำหนักสมมติได้ = E

$$\text{TVS, mg/l} = \frac{(B-E) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

$$\text{FS, mg/l} = TS - TVS$$

5. กรดไขมันระเหยง่ายและความเป็นด่าง (VFA and Alkalinity)

โดยวิธี Titration Method

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดพีเอช
2. บิวเรต 25 ml
3. เตาไฟฟ้าและเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Hot plate and stirrer)
4. บีกเกอร์ 10 ml

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.02 N
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 002 N

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่าง 50 ml ที่ผ่านการเหวี่ยง centrifuge รินเฉพาะส่วนใส ตวงใส่บีกเกอร์ใบละ 50 ml
2. นำมาไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 N จนมีพีเอช เท่ากับ 4.5 บันทึกปริมาตรที่ใช้แล้วไทเทรตต่อเท่ากับพีเอชเป็น 3

3. นำไปต้มให้เดือด ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 N จนพีเอชเท่ากับ 4 จดปริมาตรเริ่มต้น ไทเทรตต่อจนพีเอชเท่ากับ 7 จดปริมาตรสิ้นสุด

การคำนวณ

$$\text{VFA (mg } CaCO_3\text{/L)} = \frac{A \times N \times 50{,}000}{\text{ml ของตัวอย่างน้ำ}}$$

เมื่อ A = ml ของ NaOH ที่ใช้

N = normality ของ NaOH

การคำนวณ

$$\text{Alkalinity, mg/l } CaCO_3 = \frac{A \times N \times 50{,}000}{\text{ml ของตัวอย่างน้ำ}}$$

เมื่อ A = ml ของกรดมาตรฐานที่ใช้

N = normality ของกรดมาตรฐาน

6. การวิเคราะห์ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

ไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์โปรตีน หากพบว่าไนโตรเจนในแหล่งน้ำมากเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหา Euthrophication ซึ่งมีพืชน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา ปริมาณไนโตรเจนที่พบในน้ำ มีอยู่หลายแบบ ได้แก่ ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen) ไนโตรเจนที่อยู่ในอินทรีย์หรือออร์แกนิก-ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) ไนไตรท์-ไนโตรเจน (Nitrate-nitrogen) และก๊าซไนโตรเจน (N_2)

TKN หมายถึง ผลบวกระหว่าง Organic Nitrogen และ Ammonia Nitrogen (TKN=NH_3-N+Organic N) ที่มีอยู่ในโปรตีนของพืชหรือสัตว์ หรือที่เกิดจากกระบวนการสิ่งมีชีวิต เช่น เกิดจากการขับถ่ายของเสีย โดยในปัสสาวะจะยูเรีย ซึ่งยูเรียจะมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เป็นต้น การวิเคราะห์ไนโตรเจนด้วย วิธี Kjeldahl Method จะได้ผลรวมของ Organic Nitrogen และ Ammonia Nitrogen โดยหากต้องการปริมาณของ Organic Nitrogen เพียงอย่างเดียวต้องทำ การวิเคราะห์แอมโมเนียออกไปจากตัวอย่างของน้ำ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl ซึ่งค่าที่ได้นี้จะเป็นปริมาณ Organic Nitrogen

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องย่อยสลาย (digestion apparatus) ประกอบด้วย Kjeldahl Method ขนาด 800 ml และอุปกรณ์ทำความร้อนที่ให้ความร้อนได้ถึง 365-370°C (การ digestion ต้องทำในตู้ที่ดูดควันที่มีอุปกรณ์สำหรับดักไอกรนที่เกิดขึ้นจากการ digestion)

2. ชุดเครื่องกลั่นหา แอมโมเนีย (ammonia)

3. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flasks)

4. ปิเปต (pipets)

5. กระบอกตวง (Cylinder)

6. ขดรูปชมพู่ (flask)

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจาก แอมโมเนีย (ammonia)

2. สารละลายผสมอินดิเคเตอร์ (indicator)

ชั่งสาร Methyl red มา 200 mg นำมาละลายใน ethyl alcohol 95% จำนวน 100 ml ชั่งสาร Methyl blue มา 100 mg นำมาละลายใน ethyl alcohol 95% จำนวน 50 ml นำสารละลายผสมให้เข้ากันสารละลายผสมนี้มีอายุ การใช้งาน 1 เดือน

3. สารละลาย indicating Boric Acid

ชั่งสาร boric acid (H_3BO_3) จำนวน 20 g ในน้ำกลั่น เติมสารละลายผสม Indicator จำนวน 10 ml แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

4. กรด H_2SO_4 เข้มข้น

5. สาร Potassium Sulfate (K_2SO_4)

6. สารละลาย Copper Sulfate ($CuSO_4$)

ชั่งสาร $CuSO_4$ จำนวน 25.115 g นำมาละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

7. สารละลาย Sodium Hydroxide (NaOH) + Sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$)

นำสาร NaOH จำนวน 500 g และ $Na_2S_2O_3$ จำนวน 25 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

8. สารละลาย Glutamic acid (1,000 mg/l = 95.14 mg N/l)

อบสาร Glutamic acid ที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ชั่งสารมา 1.000 g ใส่ใน volumetric flask ขนาด 1 L เติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 ml สารละลายนี้เก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 สัปดาห์

9. สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 1 N

นำกรด H_2SO_4 เข้มข้น มา 28 ml เจือจางให้ได้ 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น

10. สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

นำสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 1 N มา 20 ml เจือจางให้ได้ 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น

การ Standardize สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Sodium Carbonate โดยอบสาร Na_2CO_3 ที่ 250°C เป็นเวลา 4 ชม. นำมา 0.025 g เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 ml สารละลายนี้เก็บได้นาน 1 สัปดาห์

2. นำสารละลาย Sodium Carbonate ที่เตรียมได้มา 10 ml เจือจางให้ได้ 200 ml ด้วยน้ำกลั่น

3. เติมสารละลาย Indicating Boric Acid จำนวน 50 ml แล้วนำไป ไตรเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

11. สารละลาย Borate Buffer

นำสารละลาย 0.025 M $Na_2B_4O_7$ (9.5 g ของ $Na_2B_4O_7 \times 10H_2O$/L) มา 500 ml เติม 0.1 N NaOH จำนวน 88 ml แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 ml

การเตรียมเครื่องมือกลั่น

1. นำ Kjeldahl Flask ขนาด 800 ml เติมเม็ดบีทประมาณ 5-7 เม็ด

2. นำน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย 500 ml

3. เติมสารละลาย Borate Buffer 20 ml แล้วปรับ pH ให้ได้ 9.5 ด้วยสารละลาย NaOH 6 N

4. นำไปกลั่นล้างชุดกลั่นจนกระทั่งปราศจาก Ammonia

5. ปล่อยให้ Kjeldahl Flask คงสภาพเดิมหลังจากกลั่นเสร็จแล้วจนกว่าจะเริ่มทำการกลั่นตัวอย่างจึงถอด Kjeldahl Flask ออกและเปลี่ยน Kjeldahl Flask ที่มีตัวอย่างแทนที่

ขั้นตอนการวิเคราะห์

การเตรียมตัวอย่าง

1. ใส่ glass beads 3-4 เม็ด ลงใน Kjeldahl Flask ขนาด 800 ml แล้วเติมสาร K_2SO_4 ปริมาณ 6.7 g

2. เติมตัวอย่างในปริมาณที่เหมาะสมตามตารางข้างล่าง

ตารางที่ ก.3 ปริมาณตัวอย่างที่ต้องใช้

อินทรีย์ไนโตรเจนในตัวอย่าง (mL/L)	ปริมาณตัวอย่าง (mL)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

3. เจือจางน้ำตัวอย่างให้ได้ 300 mL

4. เติมสารละลาย $CuSO_4$ 10 mL

5. เติมกรด H_2SO_4 เข้มข้น 10 mL เขย่า Kjeldahl Flask ให้สารเข้ากัน

6. นำไปต้มให้เหลือปริมาตรประมาณ 10-20 mL ในการต้มเมื่อน้ำระเหยไปหมดแล้ว จะมีควันขาวขุ่นเกิดขึ้นให้ต้มต่อไปอีก 30 นาที ตัวอย่างที่มีสีขุ่นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนหรือใสจึงปิดเตาทิ้งให้เย็น

7. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 300 mL

8. เติมสารละลาย NaOH-$Na_2S_2O_3$ จำนวน 50 mL

9. นำ Kjeldahl Flask ที่มีตัวอย่างไปประกอบกับชุดกลั่น แกว่งขวดให้สารละลายเข้ากัน กลั่นโดยเก็บน้ำส่วนที่กลั่นได้อย่างน้อย 200 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL ซึ่งมีสารละลาย Indicating Boric Acid อยู่ 50 mL รวมปริมาตรทั้งหมดที่จะได้เป็น 250 mL และให้ปลายของแท่งแก้วที่นำน้ำที่กลั่นได้ จุ่มอยู่ในสารละลาย Indicating Boric Acid

10. นำส่วนที่กลั่นได้ไป ไตรเตรท (titrate) หาค่า Ammonia ด้วยสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีม่วงอ่อน โดยใช้น้ำกลั่น 200 mL ผสมกับ Indicating Boric Acid อยู่ 50 mL เป็นตัวเทียบสีจุดสิ้นสุด

11. ให้ทำ Blank โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและวิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างทุกขั้นตอน

การคำนวณ

$$\text{Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), mg/l} = \frac{(A-B)\times 14{,}000\times N}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง, mL}}$$

A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง (ml)

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 ที่ใช้สำหรับ Blank (ml)

C = Normality ของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4

7. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (โดยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) method)

วิธีการนี้ สามารถใช้ตรวจหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีปริมาณอยู่ในช่วงระหว่าง 5–500 ไมโครกรัมของน้ำตาลกลูโคส โดยการต้มน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายด่างที่มีกรดไดไนโตรซาลิไซลิค (3,5-dinitrosalicylic acid) อยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้สารละลายมีสีเข้มขึ้นและสามารถดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 500–550 นาโนเมตร ซึ่งเชื่อว่าสีของผลิตภัณฑ์นั้นเกิดจากกระบวนการรีดักชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของ 3,5-dinitrosalicylic acid ไปเป็น 3-amino-5-nitrosalicylic acid ซึ่งปฏิกิริยานี้ จะดำเนินไปจนกว่าสารตั้งต้นคือน้ำตาลรีดิซ์จะหมด

อุปกรณ์และสารเคมี

1. KNa tartrate
2. Na_2Co_3 anhydrous
3. $Cu_2SO_4.5H_2O$
4. Na_2SO_4
5. $NaHCO_3$
6. Ammonium molybdate

7. H_2So_4 (96%)
8. $Na_2HAsO_4.7H_2O$
9. สารละลายกลูโคสมาตรฐาน 200 ppm
10. Volumetric flask
11. ขวดสีชา

วิธีการหา

<u>การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (calibration curves of reducing sugar)</u>

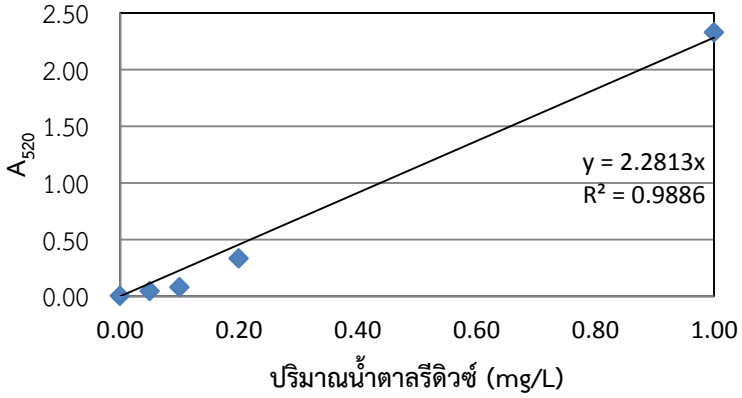
6. เตรียมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก 2 กรัม ฟีนอล 0.4 กรัม โซเดียมซัลไฟต์ 0.1 กรัม และโซเดียมโพแทสเซียมทาร์เทรต 40 กรัม ลงไปผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 200 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายมาตรฐานกลูโคสที่เตรียมไว้ใน มาวิเคราะห์หา ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคสแต่ละความเข้มข้น (0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จาก stock solution ของสารละลายมาตรฐานกลูโคส) มา 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิด
8. เติมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก ที่เตรียมไว้ในข้อ 1) จำนวน 2 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้สารผสมกันประมาณ 2 นาที นำสารละลายที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลายในหลอดทดลองไปหล่อเย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำแข็ง
9. นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วย เครื่อง UV-Visible spectrophotometer
10. สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยการสร้าง กราฟเส้นตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสง (แกน Y) และความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐานกลูโคส (แกน X) วิเคราะห์หาสมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2)

<u>การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar analysis)</u>

4. ปิเปตสารตัวอย่างที่ต้องการทำการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มา 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิด เติมสารละลายกรด 3, 5 - ไดไนโตรซาลิไซลิก ที่เตรียมไว้จำนวน 2 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลองข้างต้น จากนั้นเขย่าให้สารผสมกันประมาณ 2 นาที นำ

สารละลายที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้ว นำสารละลายในหลอดทดลองไปหล่อเย็นอย่างรวดเร็วด้วยน้ำแข็ง

5. นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วย เครื่อง UV-Visible spectrophotometer
6. คำนวณและวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ จากกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



ภาพประกอบ ก-1 กราฟมาตรฐานน้ำตาลรีดิวซ์ โดยวิธี DNS

8. การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิครวม

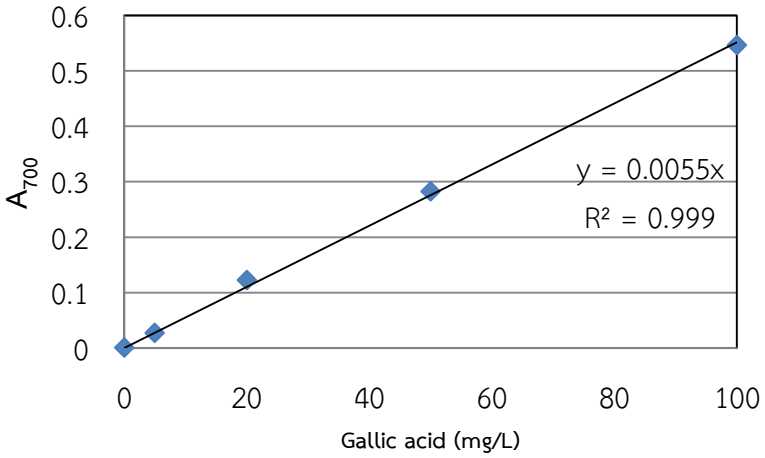
อุกรณ์และสารเคมี

1. Folin-Ciocalteau phenol reagents
2. Na_2Co_3 anhydrous
3. Gallic acid
4. เครื่อง spectrophotometer
5. เครื่องเหวี่ยงแยก
6. Volumetric flask
7. น้ำ DI

วิธีการหา

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิครวมทั้งหมดใช้วิธี Colorimetric method ตาม Standard method (APHA, AWWA, and WEF, 2012) โดยนำตัวอย่างน้ำทิ้งมาเหวี่ยงแยกเพื่อกำจัดตะกอน จากนั้นทำการเจือจางด้วยน้ำ DI นำน้ำตัวอย่างที่เจือจางแล้ว 0.2 ml เติมใน Volumetric flask จากนั้นเติม Folin-Ciocalteau phenol reagents 0.5 ml เติมน้ำ DI 2 ml ทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นเติม sodium carbonate ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลิตรปริมาตร 1 ml ทิ้งไว้ 30

นาทีที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลินแสดงที่ความยามคลื่น 700 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Gallic acid ที่ความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรมต่อลิตร



ภาพประกอบ ก-2 กราฟมาตรฐานของ Gallic acid

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุทธิสา ยาอีด
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410930016
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมกระบวนการ)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2550
วิทยาศาสตรบัณฑิต (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย)	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช	2559
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

การตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน
การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

1. Yaeed, S., C. Suksaroj and T. T. Suksaroj. 2013. Effect of ultrasonication on biodegradability and BMP of POME. The **9**th Asia Pacific Conference on Sustainable Energy & Environmental Technologies, 5-8 July 2013, Toyoko Inn Narita Kuko, Japan. pp. 67.
2. Yaeed, S., C. Suksaroj and T. T. Suksaroj. 2014. Oil removal and biomethane estimation of pretreated palm oil mill effluent (POME) by different pretreatment process. The 3rd Annual PSU Phuket International Conference (PSU PIC 2014), 13-14 November 2014, Prince of Songkla University, Phuket Campus, Thailand, pp. 108-113.

การตีพิมพ์บทความวิชาการ:

Yaeed, S., C. Suksaroj and T. T. Suksaroj. 2016. Mechanical Pretreatment Processes for Enhancement of Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent (POME). *Desalination and Water Treatment*. 67, 133-139. doi: 10.5004/ dwt.2017.20258