

ผลกระทบของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทนจากกากตะกอน  
ดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Effect of Thermal Pretreatment for Methane Yield from  
Decanter Cake of Palm Oil Mill

วรวุฒิ รุ่งอรุณนอทัย

Worawuth Rungarunanotai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทนจากกาก  
ตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ผู้เขียน นายวรวิทย์ รุ่งอรุณอินทชัย

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบุลย์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสง)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณมา ชูฤทธิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน  
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธनिया เกาศล)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ \_\_\_\_\_  
(วรุฒิ รุ่งอรุณนันทัย)  
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(วรุฒิ รุ่งอรุณนันทย์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
ผู้เขียน	นายวรวิทย์ รุ่งอรุณอินทัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เกิดจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลื่นไมโครเวฟ วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าการละลายของสารอินทรีย์ ผลการศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่มาจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มพบว่า มีค่า TCOD เท่ากับ 1,373 g/kg dry, SCOD เท่ากับ 237 g/kg dry และ PCOD เท่ากับ 1,136 g/kg dry คิดเป็น 82.7% ดังนั้นกากตะกอนดีแคนเตอร์มีสารอินทรีย์ในรูปของแข็งไม่ละลายน้ำอยู่เป็นส่วนใหญ่

ผลการทดลองการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อพบว่า สามารถเพิ่มค่าการละลายของของแข็ง ของแข็งระเหยง่าย และซีโอดีได้ โดยค่าการละลายจะขึ้นกับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการบำบัด สำหรับการบำบัดด้วยอุณหภูมิ 88°C สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้เล็กน้อย โดยมีค่าการละลายของสารอินทรีย์สูงสุดที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ในขณะที่ 110°C ที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้เล็กน้อยและมีค่าการละลายคงที่จนถึง 120 นาที ส่วนอุณหภูมิในการบำบัด 66°C ไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา (90-180 นาที) สำหรับอุณหภูมิในการบำบัด 132°C สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ ซึ่งค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่นานขึ้น โดยการบำบัดที่อุณหภูมิ 132°C ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดสามารถเพิ่มค่า TDS/TS, FVS/TVS และ SCOD/TCOD ได้ 6.30%, 8.40% และ 5.20% ตามลำดับ

ผลการทดลองการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า (160, 320, 480, 640 และ 800 W) พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มค่าการละลายของของแข็ง ของแข็งระเหยง่าย และซีโอดีได้เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่กำลังไฟฟ้า 800 W โดยค่าการละลายของสารอินทรีย์จากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการบำบัด โดยที่อุณหภูมิในการบำบัดขึ้นกับกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการบำบัด หรือพลังงานที่ใช้ในการบำบัด กล่าวคือถ้ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น ใช้พลังงานในการบำบัดสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการบำบัดจะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ที่กำลังไฟฟ้า 800 W ไม่สามารถเพิ่มค่าการละลายของสารอินทรีย์ได้ เพราะอัตราการให้ความร้อนในการบำบัดสูงเกินไป โดยอัตราการให้ความร้อนจะแปรผันตรงกับอัตราการให้พลังงานหรือกำลังไฟฟ้านั่นเอง การบำบัดที่กำลังไฟฟ้า 160 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8.00 นาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดสามารถเพิ่มค่า TDS/TS, FVS/TVS และ SCOD/TCOD ได้เพิ่มขึ้น 1.10%, 1.90% และ 3.30% ตามลำดับ

ผลการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนพบว่า ค่า Methane yield มีค่าเพิ่มตามปริมาณของ SCOD ที่เพิ่มขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้น ทั้งวิธีการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อและคลื่นไมโครเวฟ ผลการศึกษพบว่า การบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่สภาวะ 132°C เป็นระยะเวลา 120 นาที สามารถเพิ่มค่า Methane yield ได้ 34.7% สำหรับการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นระยะเวลา 8 นาที มีค่า Methane yield เพิ่มขึ้น 24.6% สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดพบว่า แต่ละวิธีมีการบำบัดที่แตกต่างกันคือ การบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อก่อนหมักด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนสามารถบำบัด TS, TDS และ SCOD ได้ดี สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนหมักด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนพบว่า สามารถบำบัด TS, TVS และ FVS ที่สภาวะที่ดีที่สุดพบว่า การบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อต้องการพลังงานในการทำความร้อนถึง 95.53 kJ/g DC ได้พลังงานเพิ่มขึ้นในรูปก๊าซมีเทนคิดเป็นพลังงานได้เท่ากับ 0.16 kJ/g DC สำหรับการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่า กากตะกอนดีแคนเตอร์ต้องการพลังงานในการบำบัด 7.68 kJ/g DC ซึ่งกากตะกอนดังกล่าวจะได้พลังงานเพิ่มขึ้นในรูปก๊าซมีเทนคิดเป็นพลังงานได้เท่ากับ 0.54 kJ/g DC

<b>Thesis Title</b>	Effect of Thermal Pretreatment for Methane Yield from Decanter Cake of Palm Oil Mill
<b>Author</b>	Mr. Worawuth Rungarunanotai
<b>Major Program</b>	Environmental Engineering
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

This research studies the effects of decanter cake from thermal pretreatment using autoclave and microwave. The objective of this study is to increase the solubility of organic matter. The result of decanter cake properties from palm oil mill industry shows that the decanter cake contains TCOD of 1,373 g/kg dry, SCOD of 237 g/kg dry, and PCOD of 1,136 g/kg dry, which is 82.7%. Therefore, the decanter cake mostly contains organic matter in insoluble solid form.

The experimental results of treatment using autoclave show that the solubility of solid, volatile solid and COD increases. The solubility depends on both the temperature and the contact time. At 88°C temperature of the treatment process can slightly increase the solubility of organic matters. The maximum solubility of organic matter value is observed at 120 minutes for the contact time. While, at 110°C and 30-minute contact time can also slightly increase the solubility of organic matter and the solubility is stable until 120 minutes. However, at 66°C the treatment process does not increase the solubility of organic matter throughout the experimental period (i.e., 90-180 minutes). At 132°C, the solubility of organic matter increases with the increasing value of the contact time. The best condition of treatment using autoclave is at 132°C for 120 minutes and it can increase the TDS/TS, FVS/TVS and SCOD/TCOD by 6.30%, 8.40% and 5.20%, respectively.

The results of thermal pretreatment using microwave at various powers (i.e., 160 W, 320 W, 480 W, 640 W and 800 W) show that the thermal pretreatment can increase the solubility of solid, volatile solid and COD, except at the power of 800 W. The solubility of organic matter depends on the treatment temperature or the thermal effect. The treatment temperature depends on the power and the contact time or the energy used by the microwave. That is, if the power and the contact time increase the energy used by the microwave also increases. This leads to the higher treatment temperature. However, at 800 W the solubility of organic matter does not increase because the thermal rate is too high. The thermal rate is a direct variation to the energy rate or power. The best condition

of thermal pretreatment using microwave is at 160 W for 8 minutes and it can increase TDS/TS, FVS/TVS and SCOD/TCOD by 1.10%, 1.90% and 3.30%, respectively.

The results of methane yield using anaerobic fermentation show that the methane yield increases with the increasing of SCOD in both methods i.e., autoclave and microwave pretreatment. The experimental results show that the autoclave pretreatment at 132°C for 120 minutes can improve methane yield by 34.7%, while the microwave pretreatment at 160 W for 8 minutes can improve methane yield by 24.6%. For the treatment efficiency, each method treats the decanter cake in different form. The anaerobic fermentation of thermal pretreatment using autoclave increases the TS, TDS and SCOD removal which can increase the solubility of organic matter. The anaerobic fermentation of thermal pretreatment using microwave increases the TS, TVS and FVS removal. At the best condition, the results show that the energy consumption by using autoclave is 95.53 kJ/g DC with the increasing in energy in the methane form of 0.16 kJ/g DC. For the microwave pretreatment, the decanter cake consumes 7.68 kJ/g DC of treatment energy with the increasing in energy in the methane form of 0.54 kJ/g DC.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดดีๆ ในการทำงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ และให้กำลังใจเป็นอย่างดี ทำให้การวิจัยประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบุลย์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ชูฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อุดมผล พิชนไพบุลย์ ที่ได้ให้คำแนะนำทางด้านการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาให้แก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้ทำการวิจัยให้มีความรู้ความเข้าใจที่ดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และทุนวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่ ENG 5406615 ประจำปีงบประมาณ 2554 ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณโรสนา กาชอ และคุณอมรรัตน์ ธาณรัตน์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำการทดลอง และการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณเอกพงษ์ ทองหนัน และบริษัทไทยอินโดปาล์มออยแพคทอรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บตัวอย่างและให้ข้อมูลในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อเพชรบูรณ์-คุณแม่ศิริพร รุ่งอรุณอินทัย สำหรับการอบรม ดูแล คำแนะนำดีๆ และคอยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาเสมอมา และขอขอบคุณศิริศักดิ์-คุณจริญญา-คุณการุณย์ รุ่งอรุณอินทัย ที่คอยดูแล และห่วงใย

ขอขอบคุณ คุณศศิปรียา อัครวจินตจิตร ที่คอยเป็นกำลังใจ และเชื่อมั่นในตัวผู้ทำการวิจัย จนผู้ทำงานวิจัยสามารถทำการวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณศศิธันว์ พวงแก้ว ที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลประกอบการศึกษา

ขอขอบคุณ บริษัททิวคตอรี คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษา ตลอดจนทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนินี่ หนู ซี สำหรับความห่วงใย และความปรารถนาดี

ขอขอบคุณน้องเมย์ แอ้ว จีบ ก้อย อ้อม เจ เจียบ(พี่) เจียบ(น้อง) น้อย น้อง ตุน บี พี่เป็ก และพี่เวส ที่คอยให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ที่ไม่สามารถกล่าวถึงได้หมด

วรวิฑู รุ่งอรุณอินทัย

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(15)
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	1
1.2.1 อุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม	1
1.2.2 การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม	4
1.2.3 กากตะกอนดีแคนเตอร์	4
1.2.4 น้ำเสียจากกระบวนการผลิต	5
1.2.5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	6
1.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	13
1.2.7 การบำบัดกากตะกอนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน	18
1.2.8 วิธีการบำบัดเบื้องต้น	19
1.2.9 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน	20
1.2.10 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	24
1.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	31
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	31
2. วิธีวิจัย	32
2.1 วิธีการดำเนินการ	32
2.1.1 การเก็บตัวอย่าง	32
2.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	32
2.1.3 ชุดการทดลอง	33
2.2 วัสดุและอุปกรณ์	36
2.2.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง	36
2.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการบำบัดด้วยความร้อน	37
2.2.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางเคมี	37
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	38
3.1 คุณสมบัติกากตะกอนดีแคนเตอร์และหัวเชื้อ	38
3.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	40
3.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 เปรียบเทียบผลการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	50
3.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	52
3.6 เปรียบเทียบการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ กับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	61
3.7 การหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบที่ละเท	62
3.8 เปรียบเทียบผลการหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบที่ละเทของภาคตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลื่นไมโครเวฟ	77
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	80
4.1 สรุปผลการทดลอง	80
4.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	94
ประวัติผู้เขียน	130

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์	6
1-2 ระดับความเป็นพิษของสารอินทรีย์	16
1-3 ระดับความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์	17
1-4 ผลการศึกษาการบำบัดด้วยวิธี Thermal Hydrolysis	22
2-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนดีแคนเตอร์	33
2-2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อ	33
2-3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	34
2-4 พารามิเตอร์ และความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจน	35
2-5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและความร้อนสูง	35
2-6 ระยะเวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดกากตะกอนดีแคนเตอร์ด้วยไมโครเวฟ	36
3-1 คุณสมบัติของหัวเชื้อ (Seed)	38
3-2 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์	39
3-3 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	41
3-4 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	41
3-5 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	45
3-6 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	46
3-7 ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยไมโครเวฟที่กกำลังไฟฟ้าต่างๆ	53
3-8 คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (วันแรกของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)	63
3-9 คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (วันสุดท้ายของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)	63
3-10 คุณสมบัติทางเคมีที่ถูกลำจัดโดยชุดหมักซึ่งใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	64
3-11 ประสิทธิภาพการบำบัดของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	64
3-12 ปริมาณก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	67

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3-13 คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วันแรกของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)	70
3-14 คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วันสุดท้ายของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)	70
3-15 คุณสมบัติทางเคมีที่ถูกรวบรวมโดยชุดหมักซึ่งใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	71
3-16 ประสิทธิภาพการบำบัดของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	72
3-17 ปริมาณก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	74
ตารางภาคผนวกที่	หน้า
ข- 1 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 160 W	110
ข- 2 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 320 W	113
ข- 3 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 480 W	116
ข- 4 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 640 W	119
ข- 5 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 W	122
ข- 6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	125
ข- 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	126
ข- 8 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเฉลี่ย (%) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	127
ข- 9 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเฉลี่ย (%) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	127
ข- 10 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	128

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
ข- 11 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	129

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1-1 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (พุนสุข และคณะ 2533)	5
1-2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน	11
1-3 แผนผังแสดงสัดส่วนของ COD (%)(Metcalf and Eddy 2004)	12
2-1 การเก็บรักษาตัวอย่างกากตะกอนดีแคแเตอร์	32
3-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS/TS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C	42
3-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C	43
3-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C	45
3-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS/TS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C	47
3-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C	48
3-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C	49
3-7 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)	51
3-8 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)	51
3-9 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)	52
3-10 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)	54
3-11 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า	55
3-12 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า	55
3-13 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)	56

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-14 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า	57
3-15 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า	58
3-16 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)	59
3-17 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า	60
3-18 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า	60
3-19 ประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, PCOD และ FVS ด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	65
3-20 ประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TDS และ TVS ด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	66
3-21 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	66
3-22 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	67
3-23 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	68
3-24 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	69
3-25 ประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, PCOD และ FVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	73
3-26 ประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TDS และ TVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	73
3-27 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	75
3-28 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	75
3-29 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	76
3-30 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ	76



## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
ข- 1 ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ลานทิ้งตะกอน	98
ข- 2 ตัวอย่างอุปกรณ์ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ และสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ	98
ข- 3 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) สำหรับใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	99
ข- 4 ภาพขณะใส่ตัวอย่างในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	99
ข- 5 ตัวอย่างชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจน	100
ข- 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	100
ข- 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	101
ข- 8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	101
ข- 9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	102
ข- 10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C	102
ข- 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	103
ข- 12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	103
ข- 13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	104
ข- 14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	104
ข- 15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C	105
ข- 16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	105
ข- 17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	106

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
ข- 18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	106
ข- 19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	107
ข- 20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C	107
ข- 21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	108
ข- 22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	108
ข- 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	109
ข- 24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	109
ข- 25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C	110
ข- 26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W	111
ข- 27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W	111
ข- 28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD, และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W	112
ข- 29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W	112
ข- 30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W	113
ข- 31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W	114

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
ข- 32 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W	114
ข- 33 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W	115
ข- 34 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W	115
ข- 35 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W	116
ข- 36 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W	117
ข- 37 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W	117
ข- 38 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W	118
ข- 39 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W	118
ข- 40 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W	119
ข- 41 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และค่า Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W	120
ข- 42 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W	120
ข- 43 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W	121
ข- 44 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W	121
ข- 45 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W	122

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
ข- 46 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid, Total Dissolved Solid, Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W	123
ข- 47 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W	123
ข- 48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W	124
ข- 49 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W	124

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบนอกจากจะเป็นอุตสาหกรรมเพื่อการบริโภคและผลิตสินค้าต่างๆแล้วยังเป็นอุตสาหกรรมที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) ของรัฐบาล ที่ส่งเสริมให้มีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลให้ได้ 5.97 ล้านลิตร/วัน ในปี พ.ศ. 2564 โดยในปี พ.ศ. 2555 มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1.62 ล้านลิตร/วัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2556) อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบจึงจัดว่าเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศประเภทหนึ่งทั้งในปัจจุบันและอนาคต ส่งผลให้เกิดการปลูกและผลิตน้ำมันปาล์มเพิ่มมากขึ้นในอนาคต โดยในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มจะเกิดของเสียที่เป็นน้ำเสียและกากตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake) ซึ่งในปัจจุบันนี้ในส่วนของน้ำเสียนั้นสามารถที่จะนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตเป็นพลังงานในรูปของความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ในส่วนของกากตะกอนดีแคนเตอร์พบว่า สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุคลุมดินหรือจำหน่ายเพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ ซึ่งพบว่า ในกากตะกอนดีแคนเตอร์มีสารอินทรีย์อยู่สูงถึง 89.12% ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความสามารถในการนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตพลังงานทดแทน (ก๊าซชีวภาพ) เนื่องจากมีสารอินทรีย์อยู่มาก แต่เนื่องจากกากตะกอนดีแคนเตอร์นั้นมีส่วนประกอบที่เป็นเซลล์พืช ซึ่งจะประกอบไปด้วย ลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนดีแคนเตอร์ อีกทั้งโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีระบบผลิตไอน้ำอยู่แล้ว ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษารูปแบบที่จะใช้ในการบำบัดเบื้องต้นกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ได้จากเครื่องดีแคนเตอร์โดยใช้ความร้อน เพื่อใช้เป็นวัสดุป้อนเข้าสู่ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และมีส่วนช่วยให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีอยู่แล้วในโรงงาน สามารถที่จะผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ไม่มีการผลิตน้ำมันปาล์ม อีกทั้งกากตะกอนที่ผ่านระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถที่จะลดปริมาณของกากตะกอนลงได้ ซึ่งสามารถที่จะลดปัญหาของกากตะกอนที่มากเกินไปในปัจจุบันได้ และการกำจัดกากตะกอนยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนดีแคนเตอร์ได้อีกด้วย

#### 1.2 ทฤษฎีและหลักการ

##### 1.2.1 อุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม

ในประเทศไทยมีพืชเศรษฐกิจอยู่หลายชนิด โดยหนึ่งในพืชเศรษฐกิจนั้นคือ ปาล์ม น้ำมัน ซึ่งพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทย มีความเหมาะสมในการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน เนื่องจากต้นปาล์มชอบสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นโดยพื้นที่ที่มีการปลูกมาก เช่น จังหวัดกระบี่ จังหวัดตรัง จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดสตูล และจังหวัดชุมพร โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน

537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 15.89 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศ ได้ผลผลิตเป็นทะลายปาล์มสดประมาณ 4.5 ล้านตัน/ปี และมีแนวโน้มว่าจะมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มขึ้นอีกปีละประมาณร้อยละ 5 ของพื้นที่ปลูกปาล์ม (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร 2556) ซึ่งทะลายปาล์มสดที่ได้นี้เป็นวัตถุดิบที่จะใช้ในการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ โดยในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบนั้นมีกรรมวิธีในการผลิตอยู่ 2 แบบคือ แบบหีบแห้ง และแบบหีบเปียก

- (1) การผลิตแบบหีบแห้ง จะซื้อผลปาล์มดิบเท่านั้น และจะทำการบีบปาล์มทั้งผลโดยไม่มีการแยกเมล็ด ไม่มีการใช้ไอน้ำแต่จะใช้วิธีการอบแห้งในการหยุดปฏิกิริยาการเกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มก่อนเข้าสู่กระบวนการหีบน้ำมัน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพต่ำ
- (2) การผลิตแบบหีบเปียก ซึ่งถือว่าเป็นการผลิตแบบมาตรฐาน โดยจะทำการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะลายปาล์มสด ซึ่งในการหีบเปียกนั้นจะต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากในการผลิตเป็นไอน้ำร้อนเพื่อใช้ในการหยุดปฏิกิริยาการเกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม ช่วยทำให้ทะลายปาล์มสดอ่อนตัวและผลปาล์มหลุดออกจากชั้วได้ง่าย ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการหีบน้ำมัน โดยวิธีนี้ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งจะให้น้ำมันปาล์มคุณภาพดี มีคุณสมบัติเหมาะต่อการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อเนื่องหลายประเภท

กระบวนการผลิตแบบมาตรฐานหรือแบบหีบเปียกจะมีการใช้ไอน้ำในการอบนึ่งทะลายปาล์มเพื่อให้เปื่อยนิ่มจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการแยกทะลายปาล์มและผลปาล์มออก เพื่อนำผลปาล์มมาเข้าสู่กระบวนการหีบสกัดน้ำมันปาล์ม โดยน้ำมันปาล์มที่แยกออกมาได้จะต้องนำมาผ่านกระบวนการแยกเอาสิ่งเจือปนออกและทำให้สะอาดยิ่งขึ้นจนได้เป็นน้ำมันปาล์มดิบตั้งรูปที่ 1-1 สำหรับกระบวนการผลิตสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆได้ดังต่อไปนี้

#### 1.2.1.1 ขั้นตอนการรับซื้อทะลายปาล์มสด (Fresh fruit bunch reception)

ในการรับซื้อจะต้องมีการชั่งน้ำหนักและตรวจวัดคุณภาพปาล์มสด จากนั้นนำเข้าสู่ลานพัก (Ramp) เพื่อรอนำเข้าสู่กระบวนการผลิต แต่ไม่ควรพักไว้นานเกินไปเพราะเอนไซม์ไลเปสที่อยู่ในผลปาล์มสดจะเปลี่ยนน้ำมันปาล์มให้ไปเป็นกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid : FFA) ซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของน้ำมันปาล์มสกัด โดยปกติไม่ควรเกิน 72 ชั่วโมง

#### 1.2.1.2 ขั้นตอนการนึ่งปาล์มสด (Sterilizer)

ทะลายปาล์มสดจากลานตากที่รอนำเข้าสู่กระบวนการผลิตจะถูกนำลงสู่กระเบบบรรจุปาล์มและเคลื่อนที่ผ่านรางเข้าสู่หม้ออบนึ่งไอน้ำที่ความดัน 3 บาร์ ใช้เวลาประมาณ 70-90 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 120-130°C การอบทะลายปาล์มจะทำให้ผลปาล์มนิ่ม ง่ายต่อการแยกผลออกจากทะลาย และง่ายต่อการหีบ และยังช่วยยับยั้งปฏิกิริยาโพลีซิส ที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

### 1.2.1.3 การแยกผลปาล์ม (Bunch stripping)

โดยการใช้เครื่องแยกผลปาล์ม (Rotary drum thresher) ในขั้นตอนนี้การแยกผลปาล์มออกจากทะลายปาล์ม ถ้านิ่งไม่สุกพอการแยกผลปาล์มจะทำได้ยาก เพราะผลปาล์มจะติดออกไปกับทะลาย ในขั้นตอนนี้จะมีทะลายปาล์มเปล่าเป็นของเสีย

### 1.2.1.4 การย่อยผลปาล์มในถังกวน (Digester)

ผลปาล์มที่ถูกแยกโดยเครื่องแยกผลปาล์มจะถูกนำเข้าสู่ถังกวน ผลปาล์มในถังกวนจะถูกกวนทำให้เนื้อปาล์มเปื่อยยุ่ยก่อนเข้าเครื่องบีบ

### 1.2.1.5 การสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเครื่องบีบน้ำมัน (Screw press)

ผลปาล์มที่ถูกกวนจนเนื้อเปื่อยยุ่ยจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องบีบน้ำมัน โดยน้ำมันที่ได้นี้จะเป็นน้ำมันที่มาจากส่วนของเปลือกที่ถูกสกัดด้วยเครื่องหีบแบบเกลียวอัด ซึ่งจะได้ส่วนที่เป็นน้ำมันที่มีสิ่งเจือปนอยู่ในส่วนของแข็ง (Press cake) ที่เป็นเมล็ดและเส้นใยจะถูกทำให้ร้อนด้วยลมร้อน (135 องศาเซลเซียส) จนแห้งแล้วแยกออกด้วยไซโคลน โดยเมล็ดปาล์มที่แยกได้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องกะเทาะ (Centrifuge crackers) เพื่อแยกเมล็ดในและกะลา โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะขายเมล็ดในปาล์มให้กับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจากเมล็ดใน ส่วนเส้นใยและกะลาจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำ

### 1.2.1.6 การแยกน้ำมันโดยถังตกจม (Settling tank)

น้ำมันปาล์มที่ได้มาจากการบีบจะเข้าสู่กระบวนการกรองด้วยตะแกรงสั่น (Vibrating screen) โดยที่น้ำมันที่ผ่านการกรองยังคงมีอนุภาคขนาดเล็กปนอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 จากนั้นจะทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันด้วยการใช้น้ำร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและผ่านเข้าสู่ถังตกจมโดยของผสมส่วนล่าง (น้ำสลัดจ์) ก็ยังคงมีน้ำมันปาล์มปะปนอยู่จะถูกรวบรวมไว้ในถังน้ำสลัดจ์และจะถูกส่งไปแยกน้ำมันด้วยเครื่อง Sludge separator ต่อไป ในส่วนของน้ำมันปาล์มที่แยกได้จะถูกนำเข้าสู่อุปกรณ์ขจัดความชื้นโดยใช้สุญญากาศดูดความชื้นและสิ่งเจือปนออกให้เหลือประมาณร้อยละ 0.1 ซึ่งน้ำมันที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะมีคุณภาพที่ได้มาตรฐาน และจะถูกส่งเข้าถังเก็บเพื่อรอจำหน่ายต่อไป

### 1.2.1.7 การแยกน้ำมันออกจากน้ำสลัดจ์ (Sludge separator)

ในกรณีที่ใช้เครื่องแยกแบบ 3 เฟส จะได้น้ำมันปาล์มดิบ น้ำทิ้งและกากตะกอนแยกออกจากกัน แต่หากใช้เครื่องแยกแบบ 2 เฟส (Separator) จะได้น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำทิ้งที่มีกากตะกอนปนอยู่ ในการเดินเครื่องแยกนั้นจะต้องมีการเติมน้ำเข้าไปผสมเพื่อให้เกิดการแยกน้ำมันออกมาได้ง่ายขึ้น

### 1.2.1.8 การอบ กะเทาะ และแยกเมล็ดในปาล์ม

เมล็ดในปาล์มที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกและถูกอบแห้งมาแล้วจะถูกแยกเมล็ดในและกะลาออกจากกันโดยใช้เครื่องแยกกะลาออกจากเมล็ดใน ทั้งนี้กะลา

ปาล์มจะถูกส่งไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำ ส่วนเมล็ดในจะถูกส่งขึ้นถึงอบแห้งก่อนที่จะบรรจุกระสอบส่งจำหน่ายต่อไป

#### 1.2.1.9 การบีบน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ

เมล็ดในที่ผ่านการกะเทาะเปลือกและอบแห้งมาแล้ว จะถูกนำไปตีให้แตกด้วยเครื่องตีเมล็ดในแล้วบดเมล็ดใน ก่อนที่จะนำเข้าสู่เครื่องบีบเมล็ดใน โดยกากของเมล็ดในที่ได้จะถูกนำไปบรรจุกระสอบเพื่อส่งจำหน่ายไปเป็นอาหารสัตว์ ส่วนน้ำมันที่ได้จะถูกนำไปกรองเพื่อทำความสะอาดด้วยเครื่องกรองน้ำมันเมล็ดใน ก่อนที่จะนำน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบที่ได้บรรจุถังเพื่อรอจำหน่าย

### 1.2.2 การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

พบว่าทะลายปาล์มสดที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิต 5.8 ตัน จะได้น้ำมันปาล์มดิบ 1 ตัน และวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เส้นใย (Fiber) กะลาปาล์ม (Shell) กากตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake) และทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch) โดยพบว่าปริมาณคิดเป็นร้อยละ 30, 6, 3 และ 28.5 ตามลำดับ โดยคิดจากปริมาณทะลายปาล์มสด (Singh et al. 2011) และการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตสามารถแบ่งได้ดังนี้

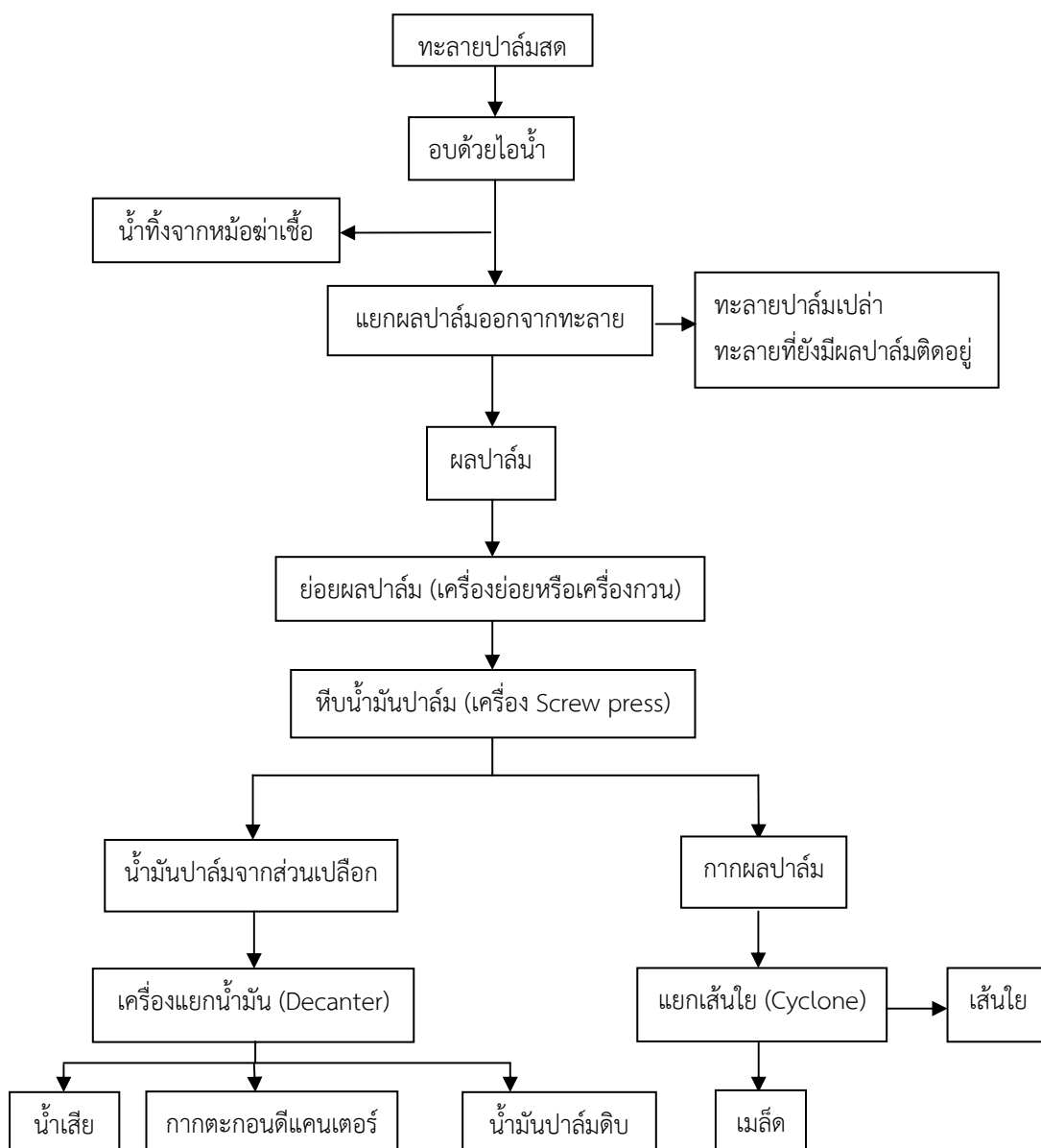
- (1) ทะลายปาล์มเปล่า สามารถนำไปทำวัสดุในการเพาะเห็ดฟาง หรือนำไปใช้เป็นปุ๋ยหรือวัสดุคลุมดินภายในสวนปาล์ม สำหรับทะลายปาล์มเปล่าหลังหีบสามารถที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำภายในโรงงาน หรือจำหน่ายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง
- (2) กะลาปาล์ม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำภายในโรงงาน หรือจำหน่ายเพื่อใช้เป็นวัสดุในการทำแผงคาร์บอน ถ่านอัดก้อน และถ่านกัมมันต์
- (3) เส้นใย สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำภายในโรงงาน ใช้ทำปุ๋ยภายในสวนปาล์ม จำหน่ายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง
- (4) กากตะกอนดีแคนเตอร์ สามารถจำหน่ายเพื่อใช้เป็นวัสดุในการทำปุ๋ย หรือวัสดุคลุมดิน
- (5) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต สามารถที่จะนำกลับไปรดสวนปาล์ม หรือใช้ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ผลิตพลังงานทดแทนภายในโรงงาน
- (6) ขี้เถ้าจากเตาเผา สามารถนำไปผสมร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์เพื่อใช้ผลิตปุ๋ย หรือวัสดุคลุมดิน

### 1.2.3 กากตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake)

กากตะกอนดีแคนเตอร์ หรือขี้เค้ก เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งมาจากส่วนของเนื้อปาล์มที่มีน้ำมันผสมอยู่ โดยเมื่อสกัดเอาน้ำมันปาล์มออกจะเหลือกากตะกอนซึ่งเรียกว่า “กากดีแคนเตอร์” ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรต และโปรตีน อยู่ร้อยละ 48 และ 19 กรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Onwueme and Singh 1991) และมีค่า COD อยู่ 880 กรัมต่อกิโลกรัมแห้ง (Paepatung 2009) ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญดังตารางที่ 1-1 จากการศึกษาของ Azmi Yahya et.al. (2010) การทำปุ๋ยหมักจากวัสดุเศษเหลือทะลายปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียว และการทำปุ๋ยโดยการใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์เข้าร่วมพบว่า หลังการหมักปุ๋ย 52 วัน ปุ๋ยหมักที่มีการใช้กาก



ตะกอนดีแคนเตอร์เป็นวัสดุหมักร่วมมีความเหมาะสมในการใช้งานโดยมีอัตราส่วน C/N ratio อยู่ที่ 18.65 และมีธาตุอาหารสูง โดยมีไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 46.4 ฟอสฟอรัสร้อยละ 17.9 โพแทสเซียมร้อยละ 17.7 และแคลเซียมร้อยละ 23.1 ซึ่งมากกว่าการทำปุ๋ยหมักจากทะเลาปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 1-1 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (พูนสุข และคณะ 2533)

#### 1.2.4 น้ำเสียจากกระบวนการผลิต (Wastewater)

วัสดุเหลือใช้จากการผลิตในรูปของทะเลาปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม น้ำเสีย และกากตะกอน ซึ่งในส่วนของทะเลาปาล์ม เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์มนั้น สามารถที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ (Boiler) ของโรงงาน แต่ในส่วนของน้ำเสีย และกากตะกอน อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ และจากการที่อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีการขยายตัวอย่าง

รวดเร็วย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นด้วย น้ำเสียที่เกิดขึ้นมาจาก 2 ส่วนหลักๆ คือ น้ำเสียจากหม้อหนึ่งและน้ำเสียจากการแยกน้ำมัน โดยปกติน้ำเสียจะมีสิ่งสกปรกในรูปของไขมัน น้ำมัน และสารอินทรีย์ในปริมาณมาก

ตารางที่ 1-1 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนดีแคแเตอร์

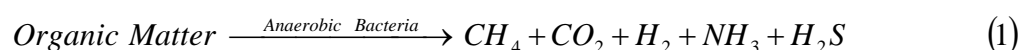
ธาตุ	หน่วย	ภาคดีแคแเตอร์
Nitrogen as N	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	2.38
Phosphorus as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	0.39
Potassium as K <sub>2</sub> O	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	2.39
Magnesium as MgO	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	0.80
Calcium as CaO	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	1.02
Organic Matter	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	89.12
Organic Carbon	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	51.70
Silica	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง	0.61
Moisture	ร้อยละ	76.38

ที่มา : Yahya et al. 2010

ในการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มคือ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งผลพลอยได้ที่สำคัญคือ ก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีหลายเทคโนโลยี เช่น เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพระบบถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Completely Stirred Tank Reactor) โดยน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 35 ลูกบาศก์เมตร (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม 2553) ก๊าซชีวภาพที่ได้มาสามารถใช้เป็นพลังงานความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย สำหรับประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพยังมีข้อจำกัดบางอย่างเช่น ลักษณะของสารตั้งต้นที่เข้าสู่ระบบซึ่งหากเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากกว่าสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็ก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเกิดก๊าซชีวภาพทำให้ได้ก๊าซชีวภาพน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เมื่อเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่

### 1.2.5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

กระบวนการทางชีววิทยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเป็นกระบวนการที่แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ ดังแสดงในสมการที่ 1



โดยอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มร่วมกันและสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วจะมีมวลลดลงและมีสภาพคงตัวมากขึ้น โดยจุลินทรีย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งหลักการของระบบนี้คือ แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เปลี่ยนไปเป็นสารที่มี

โมเลกุลขนาดเล็กกลางโดยการใช้ออนไซม์ เพื่อที่จะนำสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเข้าสู่เซลล์แล้ว จากนั้นจะเกิดการย่อยสลายสารเหล่านี้ให้เปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid : VFA) จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย่อยสลายให้เปลี่ยนไปเป็นก๊าซชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 50-70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 30-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นต้น สำหรับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1-2 โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

(1) ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เปลี่ยนไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกลาง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายของสารโพลีเมอร์ (Polymer break-down) ซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ (Polymer) ทั้งที่สามารถละลายน้ำได้และไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจะต้องใช้ออนไซม์ของแบคทีเรียจำพวก Hydrolytic bacteria ที่ถูกส่งออกมาจากภายในเซลล์ออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เช่น Proteolytic enzyme, Cellulolytic enzyme และ Lipolytic enzyme เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้เปลี่ยนไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนหรือสารโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) ที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมันและกลีเซอรอล เป็นต้น ในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้หากมีการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียในรูปของซีโอดี หรือบีโอดี พบว่า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนผ่านขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

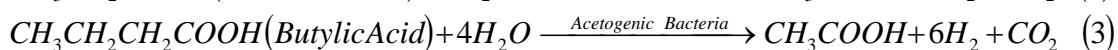
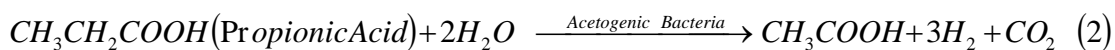
(2) ขั้นตอนการหมักกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือมีโครงสร้างอย่างง่ายจากในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดีที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ประเภทที่สามารถดำรงชีวิตได้ทั้งสภาพที่มีหรือไม่มีออกซิเจนได้ ซึ่งจะดูดซึมสารอินทรีย์เหล่านี้เข้าภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid) กรด วาเลอริก (Valeric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid) เป็นต้น นอกจากนี้ยังจะได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย โดยชนิดของแบคทีเรียพวกสร้างกรดนั้นจะแตกต่างกันไปโดยจะขึ้นอยู่กับชนิด

ของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและสภาวะแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย สำหรับแบคทีเรียกลุ่มที่มีความสำคัญและเป็นกลุ่มหลักในขั้นตอนนี้อาจจะเรียกรวมๆ ว่า Acid forming bacteria หรือ Acidogen ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจนอิสระ (Fermentative bacteria)

(3) ขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้เปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนอะซิโตจีนิซิส จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียกลุ่มโฮโมอะซิโตจีนิค (Homoacetogenic bacteria) ดังสมการที่ 2 และ 3 รวมทั้งยังเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) จากการย่อยสลายอีกด้วย ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน โดยในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงปริมาณการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แต่พบว่า หากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงเกินไป จะทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

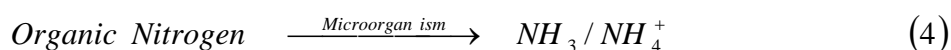


แบคทีเรียบางกลุ่มอาจเรียกว่า แบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ แต่ชนิดที่สร้างกรดได้อาจจะไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่สร้างกรด โดยที่แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาจเรียกรวมกันว่าเป็นแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

ไฮโดรเจนเป็นตัวกลางที่สำคัญและเป็นแร่ธาตุที่ควบคุมการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นกรดอะซิติก ถ้าไฮโดรเจนสูงกว่า  $10^{-4}$  atm จะเกิดสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นกรดอะซิติกซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักต่ำกว่า 10 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (Frostell 1985) และในถังปฏิกรณ์โดยปกติทั่วไปจะพบไฮโดรเจน 60-200 ส่วนในล้านส่วน (Stering et al. 2001)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งได้แก่ เนื้อเยื่อสัตว์ พืชและสิ่งปฏิกูลจากสัตว์ เช่น สารอินทรีย์ในกลุ่มโปรตีนเป็นต้น จะเกิดก๊าซแอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์ เรียกว่า กระบวนการสร้างแอมโมเนีย (Ammonification) ดังแสดงในสมการที่ 4 ปริมาณของก๊าซแอมโมเนียที่จะเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของไนโตรเจนของวัสดุที่ใช้หมัก หากมีก๊าซแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบมากจะเกิดการยับยั้งปฏิกิริยา โดยระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้น 1,500-3,000 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (อภิสิทธิ์ 2545) การ

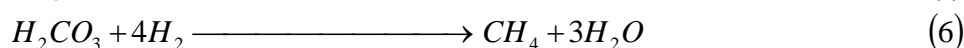
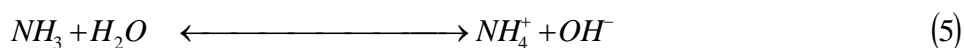
เกิดก๊าซแอมโมเนียในชั้นตอนนี้เกิดได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์ในระบบ สารประเภทกลูโคสจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (Glycolysis) กรดไขมันจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเบต้าออกซิเดชัน (Beta-oxidation) และสารประเภทกรดอะมิโนจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาดีอะมิเนชัน (Deamination)



ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายโมเลกุลของปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะคุณสมบัติของสารที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบและสภาวะแวดล้อมของระบบด้วย สำหรับกรดอินทรีย์ระเหยที่พบส่วนใหญ่ในถังหมักกรดจะเป็นกรดอะซิติก (Acetic acid) และจะมีกรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid) เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะมีอยู่ร้อยละ 52, 14, 27 และ 7 ตามลำดับ (Yilmazer and Yenigun 1999)

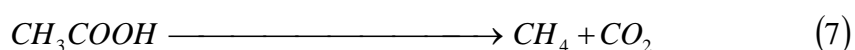
#### (4) ขั้นตอนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรดระเหยง่ายคือกรดอะซิติก (Acetic acid) ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญมาก โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจนอิสระ และอีกส่วนเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียชนิดไฮโดรเจนยูทิลิซิงมีเทน (Hydrogen-utilizing methane bacteria) โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายในขั้นตอนการสร้างกรดจะละลายอยู่ในน้ำและทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในระบบซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของแอมโมเนียจากการย่อยสลายโปรตีนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งเป็นแหล่งไฮดรอกไซด์ไอออนที่สำคัญ ดังสมการที่ 5 ซึ่งการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบจะเกิดกรดคาร์บอนิก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์ชนิดไฮโดรเจนยูทิลิซิงมีเทนเป็นก๊าซมีเทนดังสมการที่ 6

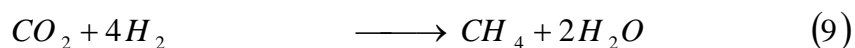
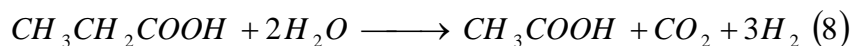


อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนจะประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 4.1) แบคทีเรียกลุ่มที่เจริญเติบโตในสภาวะที่ไร้อากาศ (Obligate anaerobic bacteria) โดยที่แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์โดยเฉพาะกรดอะซิติก (Acetic acid) ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 7 โดยที่แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งก็คือแบคทีเรียกลุ่มมีทาโนจีนิก (Methanogenic bacteria) โดยที่หากมีออกซิเจนแม้เพียงเล็กน้อยปะปนอยู่ แบคทีเรียกลุ่มนี้ก็จะตายได้ นอกจากนี้แบคทีเรียในกลุ่มนี้ยังมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำมากเมื่อเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนทั่วไป โดยพบว่ามีอัตราการเพิ่มจำนวนต่ำกว่าแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) ถึง 5-8 เท่า



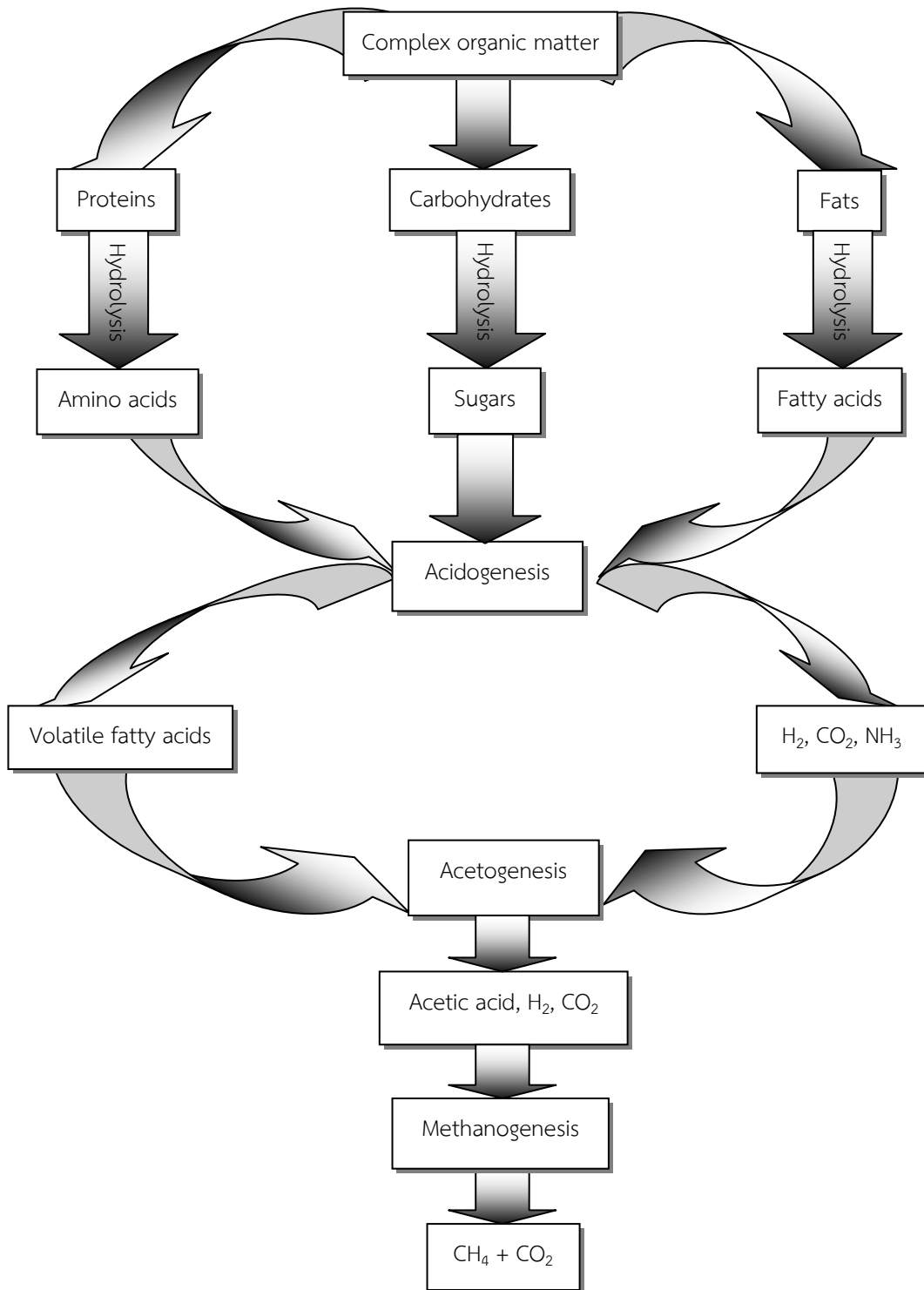
- 4.2) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen producing bacteria) โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะสร้างก๊าซไฮโดรเจนและพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังสมการที่ 8 และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ ดังสมการที่ 9



จากสมการที่ 9 พบว่าไม่สามารถตรวจพบก๊าซไฮโดรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถึงปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ โดยจะพบเพียงก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 60-70 นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียชนิดอื่นที่สามารถเจริญเติบโตอยู่ในขั้นตอนการสร้างมีเทน นั่นคือแบคทีเรียในกลุ่ม Sulfur reducing bacteria โดยที่แบคทีเรียกลุ่มนี้จะนำสารประกอบที่มีซัลเฟตเป็นส่วนประกอบไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตและผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ขึ้นมาในระบบทำให้ระบบมีกลิ่นเหม็น สำหรับในน้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนสูง ก็สามารถที่จะกระตุ้นให้แบคทีเรียในกลุ่ม Denitrification bacteria เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างมีเทนได้ด้วย

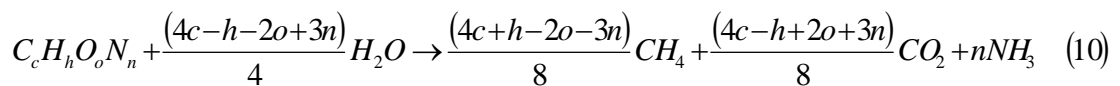
สำหรับก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้ไม่ละลายน้ำ จึงทำให้สามารถที่จะเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซ และบางส่วนจะละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ในระบบเกิดเป็นสารไบคาร์บอเนตไอออน ( $HCO_3^-$ ) ผลจาก

การถ่ายเทของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้มีผลต่อระบบ เช่น ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารอาหาร เป็นต้น



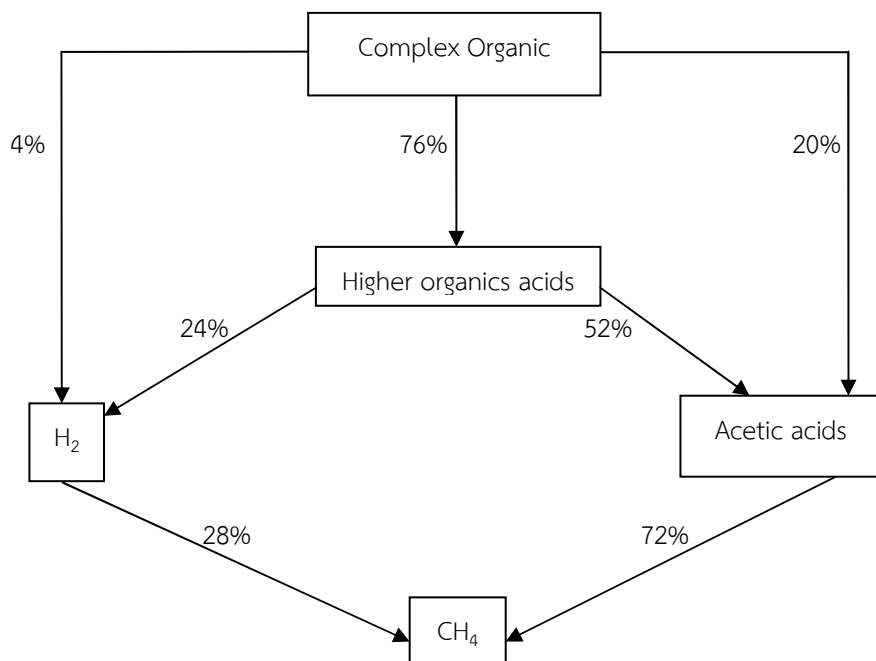
รูปที่ 1- 2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

แบคทีเรียพวกที่สร้างกรดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าพีเอช อุณหภูมิ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน สำหรับความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตนี้ รวมทั้งความไวต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะเป็นตัวหลักของการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในถังปฏิกิริยา เรียกว่า Rate-Limiting Step ของกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน เมื่อสิ้นสุดการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารอาหารจะถูกทำให้คงตัวอย่างสมบูรณ์ สมการทั่วไปของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อคำนวณปริมาณสารในระบบแสดงดังสมการที่ 10 โดย c, h, o และ n คือจำนวนอะตอมของ C, H, O และ N ตามลำดับ



อัตราการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนจะเป็นตัวจำกัดการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง และเกิดระบบล้นเหลวได้ แต่การกวนผสมเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะช่วยรักษาความสมดุลในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ไปเป็นก๊าซมีเทน

แบคทีเรียสร้างไฮโดรเจนและแบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียที่อยู่ได้ในสภาพไร้ออกซิเจนเท่านั้น และจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดี ถ้าค่า Potential redox ในสารละลายตัวกลางมีค่าต่ำกว่า -500 mV สำหรับขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ปริมาณของ COD ในแต่ละส่วนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแสดงในรูปที่ 1-3



รูปที่ 1-3 แผนผังแสดงสัดส่วนของ COD (%) (Metcalf and Eddy 2004)



### 1.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม โดยที่แบคทีเรียแต่ละกลุ่มจะเจริญเติบโตในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน การย่อยสลายสารอินทรีย์รวมทั้งการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อให้มีความเหมาะสมจึงต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ โดยมีปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### (1) ปริมาณของแข็ง (Total Solid: TS) ในถังปฏิกรณ์

บางครั้งจำเป็นต้องมีการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับของปริมาณของแข็งรวม (Total solids) ในระบบให้มีความเหมาะสมตามแบบของถังปฏิกรณ์ โดยที่ระบบทั่วไปจะมีปริมาณของแข็งรวม ประมาณ 10-25% หากมีมากเกินไปจะเกิดการรวมตัวและลอยตัวขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางการลอยตัวของก๊าซชีวภาพได้

#### (2) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในระบบบำบัด โดยแบคทีเรียแต่ละกลุ่มในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีความต้องการสภาวะอุณหภูมิและระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการดำรงชีวิต สามารถแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียออกได้ตามช่วงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

Psychrophilic range	มีช่วงอุณหภูมิ	5-15°C
Mesophilic range	มีช่วงอุณหภูมิ	35-37°C
Thermophilic range	มีช่วงอุณหภูมิ	50-55°C

โดยสภาวะของอุณหภูมิที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้จะอยู่ในช่วง 5-60°C โดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียในกลุ่ม Mesophilic จะเป็นที่ยอมรับใช้กันมากที่สุดในระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยเฉพาะประเทศในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย รวมทั้งประเทศในแถบเอเชียที่มีอุณหภูมิในน้ำเสียเฉลี่ย 25-30°C และอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ของระบบบำบัดมีค่าประมาณ 35-37°C ซึ่งจะเหมาะกับแบคทีเรียในกลุ่ม Mesophilic โดยไม่มีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ สำหรับน้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูงจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและอาจเลือกแบคทีเรียในกลุ่ม Thermophilic มาใช้งานแทน ซึ่งสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิช่วง 50-55°C ซึ่งอัตราการย่อยสลายของแบคทีเรียกลุ่ม Thermophilic พบว่า มีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าแบคทีเรียแบบ Mesophilic ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีควบคุมค่าพีเอช ภายในถังปฏิกรณ์ แต่ข้อดีของการย่อยสลายแบบ Thermophilic คือจะทำให้เวลาในการย่อยสลายลดลง แต่ต้องมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมอุณหภูมิที่สูงขึ้น สำหรับปฏิกรณ์การย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้นจะเป็นแบบคายความร้อน

#### (3) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์จะอยู่ในช่วง pH 6.5-7.5 แต่ช่วงที่ดีที่สุดอยู่ที่ pH 7.0-7.2 ที่ค่าต่ำกว่า 6.5 จะเกิดการยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตก๊าซมีเทนอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงต้องรักษาค่าพีเอชในระบบ เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรีย

กลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) จะมีการสร้างกรดเป็นจำนวนมาก และจากอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบอยู่ที่ 5.0 แต่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methane forming bacteria) จะทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7.5 ดังนั้นจึงจะต้องมีการควบคุมค่าพีเอชในระบบ โดยการควบคุมระยะเวลาในการหมักย่อยและการเติมสารประเภทต่างให้กับระบบเพื่อเพิ่มค่าพีเอชให้เหมาะสม ในบางกรณีหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชลดลงได้

#### (4) ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างคือ ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ เมื่อปริมาณกรดในน้ำเสียเพิ่มขึ้น หรือหากในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนรับสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะเกิดการสร้างกรดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าพีเอชลดลงอย่างมากพบว่าหากค่าความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์อยู่ในระดับต่ำจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งกลุ่มที่สร้างกรด และกลุ่มที่สร้างมีเทน ดังนั้น ความเป็นด่างจะมีความสำคัญอย่างมากในการต้านทานการลดลงของค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ โดยที่ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1,000 ถึง 3,000 มก./ล. ของ  $\text{CaCO}_3$

#### (5) อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (Organic Loading Rate: OLR)

อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่สุดในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ การป้อนสารอินทรีย์นั้นไม่ควรให้ในปริมาณมาก เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่ากลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นหากมีสารอาหารในระบบมากเกินไปจะทำให้มีปริมาณของกรดระเหยง่ายในระบบสูงขึ้น ทำให้ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เนื่องจากมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 จึงทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนออกมาได้หรือมีการผลิตออกมาได้น้อยมาก

#### (6) ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักย่อย (Solid Retention Time: SRT)

ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศพบว่า หากมีระยะเวลาในการหมักนานขึ้น จะส่งผลให้การผลิตก๊าซมีเทนในระบบมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีเวลาในการย่อยสลายกรดระเหยง่ายให้เป็นก๊าซมีเทน แต่หากนานเกินไปจะทำให้ระบบมีปริมาณแบคทีเรียมากเกินไป โดยทั่วไปแล้วระบบที่มีอุณหภูมิอยู่ที่  $30^{\circ}\text{C}$  จะใช้เวลา SRT 20 วัน และถ้าหากอุณหภูมิในระบบต่ำกว่านี้จะต้องใช้เวลา SRT ที่นานขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการสร้างก๊าซมีเทน

#### (7) ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradability)

สารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงจะช่วยให้เกิดก๊าซมีเทนได้มากขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารอินทรีย์คือปริมาณของแข็งที่ระเหยได้

(Volatile solid: VS) พบว่า หากมีของแข็งระเหยได้ในปริมาณมาก จะช่วยให้มีการย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย

(8) ลักษณะทางกายภาพของสารอินทรีย์ตั้งต้น

ขนาดของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก พบว่า หากสารอินทรีย์ตั้งต้นมีขนาดเล็ก จะช่วยให้เกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียในกระบวนการไฮโดรไลซิสสามารถที่จะทำการลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงการเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและกรดอะซิติกเกิดขึ้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถที่จะเปลี่ยนรูปให้เป็นก๊าซมีเทนได้มากขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันหากสารมีขนาดโมเลกุลเล็กมีปริมาณมากจนเกินไปจะทำให้เกิดกรดระเหยง่ายในระบบมีปริมาณมาก ซึ่งเกินความต้องการของระบบส่งผลให้ค่าพีเอช ลดลง ส่งผลให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงหรืออาจจะไม่เกิดขึ้นเลย ดังนั้นการเตรียมสภาพวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าระบบจะช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยจะทำให้เกิดการย่อยสลายวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกับวัตถุดิบที่มีสารจำพวกเซลลูโลสหรือลิกนินสูง การเตรียมสภาพของวัตถุดิบจะช่วยทำให้สารพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวได้มากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทางกายภาพ เคมี หรือทางความร้อน ตัวอย่างการเตรียมสภาพวัตถุดิบอาจทำได้โดยการเติมต่าง การใช้เคมีความร้อน และการใช้อุณหภูมิโซนิก

(9) ความเป็นพิษ (Toxic)

โลหะและสารชนิดต่างๆ จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ โดยจะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เช่น

- 1) ออกซิเจน (Oxygen) พบว่า ปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนได้ โดยบรรยากาศที่มีความเหมาะสมควรอยู่ในสภาวะแบบรีดิวซิง (Reducing) สูงเพื่อรักษาระดับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ โดยสารที่มีความสามารถในการออกซิไดส์สูง เช่น ไนโตรเจน ( $\text{NO}_2^-$ ) หรือไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) จะทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างก๊าซมีเทนของแบคทีเรียได้
- 2) กรดระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA) ผลของกรดระเหยง่ายที่มีต่อแบคทีเรียยังไม่ค่อยแน่ชัด เนื่องจากมีผลของค่าพีเอชเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ที่ค่าพีเอชประมาณ 7.0 กรดอะซิติก และกรดบิวทิริกไม่มีผลใดๆ ต่อแบคทีเรีย แต่กรดโพรพิโอนิกที่มีความเข้มข้นสูงจะแสดงผลที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย
- 3) แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักตะกอน และระดับความรุนแรงของความเป็นพิษของแอมโมเนียที่มีต่อแบคทีเรียขึ้นอยู่กับรูปแบบที่เกิดขึ้น โดยที่แอมโมเนียอิสระมีความเป็นพิษมากกว่ารูป

อื่นโดยปริมาณแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) 150 mg/l จะส่งผลของพิษที่รุนแรง แต่ถ้าเป็นแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) จะต้องมีความเข้มข้นถึง 3,000 mg/l จึงจะแสดงผลที่มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยที่ค่าพีเอชในระบบอยู่ที่ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งหากมีความเข้มข้นไม่มากเกินไปจะไม่ส่งผลใดๆต่อระบบ

- 4) ประจุโลหะเบา (Light metal ion) ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าพีเอชในระบบให้มีความเหมาะสมต่อการเดินระบบ โดยปกติจะมีการควบคุมโดยการเติมต่างลงไปเพื่อเพิ่มค่าพีเอชพบว่า การเติมต่างจะมีประจุโลหะเบาที่มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยเฉพาะพวกโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมลงไปในระบบด้วย โดยระดับความเป็นพิษของโลหะเบาจะแสดงในตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 ระดับความเป็นพิษของสารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เกิดการยับยั้งปฏิกิริยา (มก./ล.)
$\text{Na}^+$	3,500
$\text{K}^+$	2,500
$\text{Ca}^{2+}$	2,500
$\text{Mg}^{2+}$	1,000
Ammonia-nitrogen	1,500
Sulfide, $\text{S}^{2-}$	200
Copper, $\text{Cu}^{2+}$	0.5 (Soluble)
	50 (Total)
Chromium, $\text{Cr}^{6+}$	3.0 (Soluble)
	200 (Total)
Chromium, $\text{Cr}^{3+}$	2.0 (Soluble)
	180 (total)
Nickel, $\text{Ni}^{2+}$	30 (Total)
Zinc, $\text{Zn}^{2+}$	1.0 (Soluble)

ที่มา : Parkin and Owen 1986

- 5) ซัลไฟด์ (Sulfide) สารประกอบซัลไฟด์เกิดจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารจำพวกโปรตีน พบว่า หากมีความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ละลายได้เกิน 200 mg/l จะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียและทำให้กระบวนการย่อยสลายล้มเหลวได้ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 200 mg/l ไม่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย สำหรับสารประกอบซัลไฟด์ที่ไม่ละลายจะไม่มีผลใดๆ ต่อแบคทีเรียในระบบ ดังนั้นในการควบคุม

สารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายได้ ทำโดยการเติมเหล็กลงไปเพื่อลดความเข้มข้นของสารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายได้

- 6) โลหะหนัก (Heavy metals) มีความเป็นพิษถึงแม้จะมีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลเฉพาะโลหะหนักที่ละลายได้เท่านั้น ในส่วนของโลหะหนักที่ไม่ละลายจะไม่มีผลต่อแบคทีเรีย โดยระดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะแสดงในตารางที่ 1-2 และตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 ระดับความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์

สารประกอบอินทรีย์	ความเข้มข้นที่จะทำให้การทำงานลดลง 50% (mM)
1-Chloropropene	0.1
Nitrobenzene	0.1
Acrolein	0.2
1-Chloropropane	1.9
Formaldehyde	2.4
Lauric acid	2.6
Ethyl benzene	3.2
Acrylonitrile	4.0
3-Chlorol-1, 2-propanediol	6.0
Crotonaldehyde	6.5
2-Chloropropionic acid	8.0
Vinyl acetate	8.0
Acetaldehyde	10
Ethyl acetate	11
Acrylic acid	12
Catechol	24
Phenol	26
Aniline	26
Resorcinol	29

ที่มา : Parkin and Owen 1986

(10) การกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ (Mixing)

การกวนผสมเป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และแบคทีเรียในระบบเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดสถานะเสถียร และจะช่วยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั่วทั้งระบบ ไม่เกิดการตกจมของตะกอน และทำให้ไม่เกิดฝ้า (Scum) ที่ผิวของของเหลว ซึ่งฝ้านี้จะไปยังถังไหลผ่านของก๊าซชีวภาพในระบบ

### (11) ปริมาณสารอาหารภายในสารอินทรีย์ (C/N ratio)

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีความต้องการแหล่งอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต เนื่องจากคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ดังนั้นจึงต้องมีสารอาหารในปริมาณที่เพียงพอในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่จะนำมาหมัก เนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อถูกย่อยสลายจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นสารที่จะช่วยส่งเสริมให้แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรเจนยูทีไลซิงสร้างก๊าซมีเทนได้ อีกทั้งยังช่วยในการเป็นบัฟเฟอร์ในการป้องกันการลดลงของค่าพีเอชในระบบ เนื่องจากการเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก ดังนั้นหากมีปริมาณไนโตรเจนน้อยไป ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะต่ำ และหากมีปริมาณมากเกินไปก็จะเกิดความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน ควรอยู่ในช่วง 25:1 ถึง 30:1 โดยปกติแล้วกากตะกอนน้ำเสียและมูลสัตว์จะมีสารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ครบถ้วน แต่สำหรับวัสดุชนิดอื่นอาจจะต้องมีการใส่สารอาหารเพิ่มเติม

### (12) ธาตุอาหารเสริม (Nutrients)

ธาตุอาหารเสริม (Nutrients) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ โดยอาหารเสริมที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจนและ ฟอสฟอรัส โดยมีอัตราส่วนของสารอาหารเสริมในระบบบำบัดแบบไร้อากาศดังนี้ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส เป็น 100 : 1.1 : 0.2 หากปริมาณของสัดส่วนอาหารเสริมไม่เพียงพอจำเป็นจะต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มลงไปในระบบ นอกจากสารอาหารที่กล่าวมาแล้วยังมีสารชนิดอื่นๆ ได้แก่ Ca, Mg, Mo, Co, Fe เป็นต้น

## 1.2.7 การบำบัดกากตะกอนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

การบำบัดกากตะกอนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนเป็นวิธีการที่ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดกากตะกอนที่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับก๊าซที่ได้จะมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สามารถที่จะแยกและนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย โดยถังที่ใช้ในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digester) สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

- (1) ระบบ Low rate anaerobic digester เป็นลักษณะถังหมักย่อยที่ถูกออกแบบมาให้เป็นถังปิดและมีการป้อนน้ำตะกอนเข้าสู่ด้านบนของถัง มีการทำปฏิกิริยาในถังหมักโดยไม่มีการกวนผสม ทำให้มีการแยกชั้นของตะกอนและเกิดการหมักแบบไร้ออกซิเจน ส่วนตะกอนที่จะนำออกจากถังจะนำออกในส่วนล่างของถัง ส่วนของน้ำใสที่อยู่ด้านบนจะถูกนำออกทางส่วนบนของถัง โดยปกติในส่วนบนของผิวน้ำในระบบนี้จะเกิดฝ้าที่เรียกว่า "Scum" ซึ่งการระบายน้ำในส่วนบนจะต้องระบายในส่วนที่อยู่ใต้ Scum ซึ่ง Scum อาจมีส่วนช่วยให้ระบบเป็นระบบแบบไร้ออกซิเจนได้ดีขึ้นเนื่องจากมีลักษณะที่ปก

คลุมไม่ให้ออกซิเจนลงสู่ส่วนของของเหลว อย่างไรก็ตามถึงหมักแบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ไม่สูงนัก

- (2) ระบบ High rate anaerobic digester เป็นลักษณะดังที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาจากระบบ Low rate anaerobic digester เพื่อแก้ไขปัญหาที่พบ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น โดยที่ถังแบบนี้จะมีการใช้เครื่องจักรกลช่วยในการเดินระบบ เช่น มีการใช้เครื่องจักรกลช่วยในการกวนผสมให้กากตะกอนและของเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ข้อเสียของระบบนี้คือมีค่าใช้จ่ายที่แพงกว่าแบบแรก

### 1.2.8 วิธีการบำบัดเบื้องต้น

ซึ่งกระบวนการ Hydrolysis เป็นขั้นตอนที่ส่งผลต่อขั้นตอนการจำกัดของอัตราการย่อยสลาย (Rate-limiting step) ของกระบวนการทั้งหมดในการย่อยสลายตะกอน (Gavala et al. 2003) ระหว่างกระบวนการ Hydrolysis จะเกิดกระบวนการทั้งการละลาย (Solubilization) ของอนุภาคและการแตกตัวของชีวภาพของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กด้วย ซึ่งสามารถเพิ่มได้โดยการบำบัดเบื้องต้น เช่น การบำบัดเบื้องต้นของตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง ได้แก่ การบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ การแตกตัวด้วยความร้อน (Brooks and Grad 1968; Everett 1974; Haug 1977; Haug et al. 1983; Hiraoka et al. 1986; Li and Noike 1989; Stuckey and McCarty 1978a, b) วิธีทางเคมีด้วยกระบวนการออกซิเดชันและการบำบัดด้วยต่าง (Alkali treatment) และวิธีการบำบัดเบื้องต้นทางกล (เช่น อุลตราโซนิค ความดันสูง เป็นต้น) (Tiehm et al. 2001; Wang et al. 1999; Li and Noike 1992; Tanaka et al. 1997; Sawayama et al. 1996; Penaud et al. 1999; Rajan et al. 1989; Ray et al. 1990; Lin et al. 1997; Nah et al. 2000; Choi et al. 1997) ซึ่งวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการดังกล่าวนี้สามารถเร่งการละลายของตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง และลดขนาดของอนุภาค ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Tiehm et al. 2001; Tanaka et al. 1997; Chiu et al. 1997; Weemaes and Verstraete 1998; Kim et al. 2003)

กระบวนการบำบัดเบื้องต้นทางความร้อน ทางเคมี ทางชีวภาพ และทางกล เป็นการเร่ง hydrolysis ตะกอน (Chiu et al. 1997; Weemaes and Verstraete 1998; Kim et al. 2003) กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเหล่านี้จะก่อให้เกิดการสลายตัว หรือการแตกตัวของเซลล์ตะกอน โดยยอมให้จุลินทรีย์เข้ามาทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการย่อยสลายโดยรวมและเพิ่มระดับของการย่อยสลายตะกอน ดังนั้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการย่อยสลายแบบไร้อากาศในถังหมักแบบไร้ออกซิเจนลดลง และเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทนขึ้นได้ (Müller 2000; Bourgrier et al. 2005)

Carrère et al. (2010) ได้ทบทวนเอกสารการบำบัดเบื้องต้นพบว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางกลสามารถเพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายได้ปานกลางและต้องการพลังงานให้กับระบบ ในขณะที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน (Thermal hydrolysis pretreatment) เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ แต่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อน ซึ่งวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางกลส่งผลกระทบได้เล็กน้อย ขณะที่วิธีการบำบัดเบื้องต้นที่ส่งผลกระทบต่อระบบ

สูงได้แก่ การบำบัดด้วย Thermal hydrolysis หรือการออกซิเดชัน ซึ่งจะเพิ่มทั้งความเร็วและขอบเขตการย่อยสลาย ในขณะที่การปลดปล่อยสารอาหารที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นต้นทุนที่สำคัญในการเพิ่มการย่อยสลายตะกอนได้ ทั้งยังเป็นโอกาสดีที่จะทำให้ได้สารอาหารกลับคืนสู่น้ำเสียทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นโดยสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้อีกด้วย

### 1.2.9 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน (Thermal pretreatment)

วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนได้มีการศึกษาเพื่อเพิ่มความสามารถในการหมักแบบไร้ออกซิเจนและเพิ่มคุณสมบัติในการรีดน้ำ (Dewatering properties) (Sawayama et al. 1996) โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนจะทำให้เพิ่มอัตราการผลิตก๊าซและประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นด้วย โดย Li and Noike (1989) ได้ทำการศึกษากการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนในการเพิ่มการ Hydrolysis ของอนุภาคอินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายของสารอินทรีย์ ซึ่งจะช่วยให้สารอินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทนได้ง่ายขึ้น เช่น กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic acid) นอกจากนี้มีผู้วิจัยหลายคนได้รายงานผลการทดลองว่าระยะเวลาเก็บกักในการหมักแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนจากระบบตะกอนเร่งจะลดลงน้อยกว่า 10 วันเมื่อตะกอนมีการผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน และประสิทธิภาพการย่อยสลายของตะกอนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับการบำบัดด้วยกรดหรือด่าง และการบำบัดด้วยอุลตราโซนิก (Shimizu et al. 1992a, b, c; Stuckey and McCarty 1978a, b) โดยการบำบัดเบื้องต้นของตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียมีการศึกษาที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 60 – 270°C หากอุณหภูมิที่สูงกว่า 200°C ทำให้เกิดรูปของสารประกอบประเภท Refractory compound formation (Müller 2000; Stuckey and McCarty 1984) โดยทั่วไปการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนจะใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 180°C สำหรับการบำบัดเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C จัดเป็นการบำบัดทางความร้อนโดยอุณหภูมิต่ำ (Gavala et al. 2003)

(1) วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิสูง (High temperature thermal pretreatment หรือ Thermal hydrolysis)

เป็นการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ซึ่งการบำบัดด้วยวิธี Thermal hydrolysis ใช้ครั้งแรกในการเพิ่มความสามารถในการรีดน้ำของตะกอน (Huag et al. 1978) โดยวิธีการ Thermal hydrolysis เป็นการแตกโครงสร้างของตะกอนและปลดปล่อยพันธะของน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการรีดน้ำของตะกอนได้หลังจากผ่านการบำบัดที่อุณหภูมิ 150°C (Fisher and Swanwick 1971) หรือ 180°C (Anderson et al. 2002) วิธีการ Thermal hydrolysis ทำให้เกิดการละลายบางส่วน (Partial solubilization) ของตะกอน ซึ่งส่งผลให้การหมักแบบไร้ออกซิเจนมีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น นักวิจัยหลายคนที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการ Thermal hydrolysis ในการบำบัดเบื้องต้นของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน (Huag et al. 1978; Tanaka et al. 1997; Bougrier et al. 2008) ด้วยอุณหภูมิช่วง 160 – 180°C และใช้เวลาในการบำบัดระหว่าง 30-60 นาที (ตารางที่ 1-4) โดยความดันแปรผันจาก 600 ถึง 2,500 kPa (Weemaes and Vestraete 1998) นอกจากนี้ Dohanyos et al. (2004) ได้



เสนอวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางความร้อนที่รวดเร็วมากที่อุณหภูมิประมาณ  $170^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาเพียง 60 วินาที ในทางกลับกันการบำบัดทางความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง ( $70^{\circ}\text{C}$ ) อาจจำเป็นต้องใช้เวลาหลายวันในการบำบัด (Gavala et al. 2003; Ferrer et al. 2008) เนื่องจากกลไกหลักที่เกิดขึ้นเป็นการย่อยสลายด้วยเอนไซม์

การเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนมีความสัมพันธ์กับการละลายของ COD ของตะกอนซึ่งทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง (Carrère et al. 2008) ในทางตรงกันข้าม Dwyer et al. (2008) พบว่า ขณะที่เพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  ทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีการเพิ่มการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทน การบำบัดเบื้องต้นที่อุณหภูมิสูงเกินไป (สูงกว่า  $170-190^{\circ}\text{C}$ ) นำไปสู่การลดความสามารถในการหมักแบบไร้ออกซิเจนของตะกอน ทั้งๆ ที่ประสิทธิภาพในการละลายเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยา Maillard reaction (Dwyer et al. 2008) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคาร์โบไฮเดรตและกรดอะมิโนในการรูปของ Melanoidins ซึ่งย่อยสลายได้ยาก (Bougrier et al. 2008) โดย Melanoidins จะเพิ่มความเข้มข้นของสีตะกอนที่ออกจากระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนด้วย (Dwyer et al. 2008)

การเพิ่มการผลิตมีเทนขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเริ่มต้นของตะกอน (Carrère et al. 2008) และการบำบัดตะกอนจากระบบตะกอนเร่งจะให้ผลที่ดีกว่าตะกอนเบื้องต้น (Eskicioglu et al. 2008) ขณะที่วิธีการ Thermal hydrolysis เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายไม่ขึ้นกับอายุของตะกอน แต่ขึ้นกับระยะเวลาสัมผัสที่ยาวนานในการบำบัดด้วยความร้อน (Batstone et al. 2009) นอกจากนี้วิธีการ Thermal hydrolysis ส่งผลให้มีอัตราการ hydrolysis เพิ่มขึ้น (Batstone et al. 2009; Zheng et al. 2009; Mottet et al. 2009) และระยะเวลาเก็บกัก (HRT) สามารถลดลงไปได้ 2.9 วัน (Graja et al. 2005) สำหรับข้อดีเพิ่มเติมของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนคือ การสุขาภิบาลตะกอน การลดลงของความหนืดของตะกอนทำให้การลำเลียงตะกอนทำได้ง่ายขึ้น และไม่ต้องการพลังงานเพิ่ม เนื่องจากความต้องการพลังงานสามารถได้มาจากการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนเกินและสมดุลพลังงานที่เป็นเชิงบวก (Kepp et al. 2000) ส่วนข้อเสียคือจะเพิ่มสัดส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นและสีของตะกอนที่เข้มข้น (Dwyer et al. 2008) เพิ่มการยับยั้งโดยแอมโมเนียที่เกิดในการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของศักยภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Batstone et al. 2010) และอาจจะทำให้การจับตัวของของแข็งจากระบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) หรือระบบบริดตะกอนลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่มีความละเอียดมากขึ้น

สำหรับเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง 30-60 นาที (Valo 2004) การบำบัดเบื้องต้นที่อุณหภูมิสูงใช้ในการบำบัดตะกอนด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers) หรือวิธีการฉีดด้วยไอน้ำ (Steam

injection) (Müller 2000) รวมทั้งการศึกษาของ Valo et al. (2004) ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของ SCOD ประมาณร้อยละ 25 และ 60 จากการบำบัดด้วยความร้อนให้กับตะกอนที่อุณหภูมิ 130°C และ 170°C ตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนแบบกะ (Batch test) ภายใต้การหมักแบบไร้ออกซิเจนสภาวะอุณหภูมิแบบ Mesophilic พบว่ามีการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 และ 45 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น สำหรับข้อจำกัดที่สำคัญของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนคือ ต้องการพลังงานสูงให้กับระบบ ผู้วิจัยบางคนชี้ให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในส่วนพลังงานสามารถสมดุลได้ เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของการย่อยสลายทางชีวภาพของตะกอนและการใช้ความร้อนที่เหลือในการรักษาอุณหภูมิในถังหมักทำให้เกิดความสมดุลในการใช้พลังงาน (Haug et al. 1983)

(2) วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิต่ำ (Low temperature thermal pretreatment)

วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิต่ำเป็นกระบวนการในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการเพิ่มผลผลิตของก๊าซชีวภาพจากตะกอนเบื้องต้น (Primary sludge) และตะกอนขั้นที่สอง (Secondary sludge) (Skiadas et al. 2004) อย่างไรก็ตามมีเอกสารอ้างอิงบางส่วนที่พบว่า วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิต่ำนี้เป็นการใช้พลังงาน ที่ต่ำกว่า 100°C ผู้วิจัยบางคนสรุปว่า การบำบัดด้วยอุณหภูมิต่ำประมาณ 70°C ส่งผลให้มีการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของแบคทีเรียประเภท Thermophilic ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบแบบ Thermophilic (Nielsen et al. 2004) ดังนั้นการบำบัดเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่ำจึงได้รับการพิจารณาให้เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งก่อนการย่อยสลาย (Pre-digestion step)

ตารางที่ 1-4 ผลการศึกษาการบำบัดด้วยวิธี Thermal Hydrolysis

สารอาหาร	สภาวะการบำบัด	สภาวะระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
Activate sludge	175°C 30 นาที	CSTR, HRT: 15 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 115 เป็น 186 mL/g COD <sub>in</sub> (+62%)	Haug et al. 1978
Primary sludge	175°C 30 นาที	CSTR, HRT: 15 วัน 35°C	ผลิตมีเทนได้ 252 mL/g COD <sub>in</sub> (no influence)	
Mixed sludge	175°C 30 นาที	CSTR, HRT: 15 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 205-234 mL/g COD <sub>in</sub> (+14%)	
Activated sludge	175°C 60 นาที	Batch, 25 วัน 35°C	เพิ่มการแปรรูป COD เป็นมีเทน จาก 48% ถึง 68% (+42%)	Stuckey and Mc Carty 1978a

ตารางที่ 1-4 (ต่อ) ผลการศึกษาการบำบัดด้วยวิธี Thermal Hydrolysis

สารอาหาร	สภาวะการบำบัด	สภาวะระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
Activated sludge	175°C 60 นาที	CSTR, HRT: 5 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 108-216 mL/g COD <sub>in</sub> (+100%)	Li and Noike 1992
Activated sludge (industrial)	180°C 60 นาที	Batch, 8 วัน 37°C	เพิ่มการผลิตมีเทน (+90%)	Tanaka et al. 1997
Mixed sludge	165 ถึง 180°C 30-60 นาที	HRT 17 วัน	เพิ่มการผลิตไฟฟ้า (+20%)	Kepp et al. 2000
Activated sludge	160 °C	CSTR, HRT: 15 วัน	เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ (+60%)	Fjordside 2001
Mixed sludge	121 °C 60 นาที	CSTR, HRT: 20 วัน 36°C	เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพจาก 350-420 mL/g soluble VS <sub>in</sub> (+20%)	Barjenbruch and Koppolow 2003
Activated sludge	121 °C 30 นาที	Batch, 7 วัน 37°C	เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพจาก 3657-4843 L/m <sup>3</sup> sludge <sub>in</sub> (+32%)	Kim et al. 2003
Digested mixed sludge	170 °C 60 วินาที 0.8 MPa	Batch, 20 วัน	เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ (+49%)	Dohanyos et al. 2004
Activated sludge	170 °C 60 นาที	Batch, 24 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ (+45%)	Valo et al. 2004
Activated sludge	170 °C 60 วินาที	CSTR, HRT 20 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนจาก 88 ไปเป็น 142 mL/g COD <sub>in</sub> (61%)	
Activated sludge	175 °C 40 นาที	Fixed film reactor, HRT: 2.9 วัน 37 °C	ลด TSS 65%	Graja et al. 2005
Activated sludge	170 °C 30 นาที	Batch, 24 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 221-333 mL/g COD <sub>in</sub> (+76%)	Bougrier et al. 2006a
Activated sludge	170 °C 30 นาที	CSTR, HRT: 20 วัน 35°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 145-256 mL/g VS <sub>in</sub> (+51%)	Bougrier et al. 2006b
Mixed sludge	140 °C 1 นาที 0.6 MPa	Two-stage digestion 55-53°C	เพิ่มการผลิตมีเทนจาก 507-599 mL/g VS <sub>in</sub> (+18%)	Zabraska et al. 2006

ตารางที่ 1-4 (ต่อ) ผลการศึกษาการบำบัดด้วยวิธี Thermal Hydrolysis

สารอาหาร	สภาวะการบำบัด	สภาวะระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
Activated sludge (Extended aeration)	160 °C 30 นาที	HRT: 15 วัน 35 °C	เพิ่มการกำจัด TS จาก 25% เป็น 45%	Chauzy et al. 2007
Activated sludge	170 °C 30 นาที 7 บาร์	Batch	ผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น (+50%)	Fernandez-Polanco et al. 2008
Activated sludge	170 °C 30 นาที 7 บาร์	Continuous HRT: 12 วัน	ผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น (+40-50%) ผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (+40%)	
Activated sludge (น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันดิบ)	200°C 30 นาที, 20 MPa	Two-stage UASB, HRT: 3.8 วัน 35°C ระบบหมักหลังจากบำบัดเบื้องต้น (Batch 33 วันไม่ผ่านการบำบัด)	ผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 2419 – 3775 mL/kg WAS (+15%)	Yang et al. 2010
Activated sludge (น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันดิบ)	200°C 30 นาที, 20 MPa	Two-stage UASB, HRT: 3.8 วัน 35°C ระบบหมักของเหลวหลังจากบำบัดเบื้องต้น (Batch 33 วันไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น)	ผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 2419 – 3775 mL/kg WAS (+15%)	Yang et al. 2010
Activated sludge	Microwave 175°C	Batch 18 วัน 33°C	ผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น (+31%)	Eskicioglu et al. 2009
Primary sludge	Microwave 35-90°C	Batch 18 วัน 33°C	เพิ่มอัตราการย่อยสลาย ไม่มีผลกระทบต่อการผลิตมีเทนสูงสุด	Zheng et al. 2009

ที่มา : Carrère et al. 2010

### 1.2.10 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สำหรับการให้ความร้อนอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการให้พลังงานในการทำอุณหภูมิสูงคือการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยจะช่วยลดในเรื่องของระยะเวลาในการทำความร้อน ซึ่งพบว่า การให้คลื่นไมโครเวฟสามารถที่จะช่วยเปลี่ยนโครงสร้างของเซลล์ulos ได้ (Xiong et al. 2000) อีกทั้งยังช่วยในการสลายสารลิกโนเซลลูลอสให้ได้เป็น ลิกนินและ เฮมิเซลลูลอส (Azuma et al. 1984) และพบว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 150 °C ในฟางข้าวสามารถลดระยะเวลาใน

การหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนลงได้ 35% (Jakowiak et al. 2011) โดยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทำ ความร้อนจะใช้อยู่ที่ 2 ความถี่คือ 0.915 และ 2.45 GHz คลื่นไมโครเวฟจะใช้หลอดสูญญากาศเป็น แหล่งกำเนิด ซึ่งแบ่งได้หลายแบบคือ Magnetrons, Traveling wave tube และ Klystrons โดยทั่วไปหลอดสูญญากาศที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟจะใช้แบบ Magnetron เป็นหลอดที่มีต้นทุนต่ำ โดยหลอดแบบนี้จะให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ หลอด Magnetron จะประกอบด้วยขั้ว Cathode และ Anode โดยที่ขั้ว Anode จะถูกทำให้มีค่าความต่างศักย์แตกต่างกันมาก ก่อให้เกิด สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง และเมื่อขั้ว Cathode ถูกให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการหลุดออกของ อิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (Valency electron) เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้ว Cathode จะเข้าสู่ สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งความเร็ว ส่วนประกอบสุดท้ายคือแม่เหล็กที่อยู่รอบ นอกจะมีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กให้แก่สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะถูกสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิด การเคลื่อนที่เป็นเกลียวเกิดเป็นกลุ่มเมฆอิเล็กตรอน จากนั้นจะถูกส่งไปยังส่วนของ Transmission line เพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟไปยัง Applicator พบว่า พลังงานที่ส่งให้กับวัสดุจะส่งโดยตรงจาก สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุลทั่วทั้งวัสดุ และสามารถลด ระยะเวลาในการทำความร้อนและลดพลังงาน สำหรับกระบวนการความร้อนทั่วไปจะเป็นการแพร่ ความร้อนสู่วัสดุผ่านผิววัสดุเข้าสู่ข้างในแต่ไมโครเวฟจะส่งพลังงานสู่โมเลกุลของวัสดุโดยอาศัย พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและจะทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อน โดยไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่ง ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 mm ถึง 1 m โดยจะสัมพันธ์กับความถี่ ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz โดยคลื่นไมโครเวฟมีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในด้าน สัญญาณโทรศัพท์ เรดาร์ และสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (Thostenson and Chou 1999)

### 1.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Binod et al. (2012) ได้ทำการศึกษาเรื่องการบำบัดเบื้องต้นด้วยการใช้ไมโครเวฟ ในระยะเวลาสั้นๆ เพื่อเพิ่มปฏิกิริยา Saccharification ด้วยเอนไซม์และปริมาณน้ำตาลจากการหมัก จากชานอ้อย โดยการผลิต Bioethanol จากชีวมวลประเภทที่เป็นสารลิกโนเซลลูโลสจำเป็นต้องมี การใช้การบำบัดเบื้องต้นเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่าย การบำบัดเบื้องต้นโดยทั่วไปจะใช้กรด หรือต่างร่วมกับ ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดันที่จำกัดเนื่องจากมีความต้องการพลังงานสูงจึงมีความจำเป็นที่ จะต้องหาเทคนิคในการให้ความร้อนสูงแต่ต้องการพลังงานต่ำ ดังนั้นไมโครเวฟจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาในการทำอุณหภูมิให้สูงในระยะเวลาที่สั้นลง ในงานนี้ได้ทำการศึกษา เปรียบเทียบกัน 3 แบบ คือ Microwave-acid, Microwave-alkali และ Microwave-alkali-acid โดยทำการบำบัดเบื้องต้นกับชานอ้อย พบว่าการบำบัดด้วยไมโครเวฟ (600W เป็นระยะเวลา 4 นาที) ร่วมกับ NaOH 1% แล้วตามด้วยการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์จะได้ปริมาณ Reducing Sugar 0.665 g/g dry biomass ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟร่วมกับ NaOH 1% แล้วตามด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1% จะได้ ปริมาณ Reducing sugar 0.83 g/g dry biomass สำหรับการบำบัดด้วยไมโครเวฟ (450W เป็น ระยะเวลา 5 นาที) ร่วมกับต่างพบว่าสามารถดลิกนินได้เกือบ 90% จากชานอ้อย โดยในบาง รายงานได้แสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยไมโครเวฟสามารถที่จะเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลส และ สลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในสารลิกโนเซลลูโลส และมีการรายงานไว้ว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วย

ไมโครเวฟโดยมีน้ำร่วมด้วยสามารถเพิ่มการไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์ของสารที่เป็นลิกโนเซลลูโลสได้ สำหรับในงานนี้ได้ใช้ไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน (Samsung CE2887) ซึ่งมีความถี่ 2450 MHz และทำการศึกษาที่กำลัง 100W, 180W, 300W, 450W, 600W และ 850W โดยจะทำ 3 ซ้ำและใช้ค่าเฉลี่ย สำหรับผลการบำบัดเบื้องต้นที่มีต่อปริมาณน้ำตาลพบว่า การบำบัดด้วยไมโครเวฟและกรด จะมีปริมาณน้ำตาลลดลงตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น สำหรับไมโครเวฟร่วมกับต่าง ไมโครเวฟร่วมกับต่างและกรด จะมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วการบำบัดด้วยต่างเพียงอย่างเดียวสามารถที่จะกำจัดลิกนินจากสารลิกโนเซลลูโลส จะเหลือเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในเฟสที่เป็นของแข็ง สำหรับการบำบัดด้วยกรดสามารถที่จะกำจัดเฮมิเซลลูโลสซึ่งสามารถที่จะแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากเฟสที่เป็นของแข็งมาอยู่ในสารละลาย สำหรับการบำบัดด้วยไมโครเวฟจะขึ้นกับปัจจัย 2 ส่วนคือ กำลังและเวลาในการบำบัด ในงานนี้ได้รายงานว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟของสารลิกโนเซลลูโลสสามารถที่จะลดระยะเวลาในการบำบัดลงได้

**Jakowiak et al. (2011)** ได้ทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการบำบัดเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟของฟางข้าวเพื่อผลิตก๊าซมีเทน โดยงานนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายและความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของฟางข้าว โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการตัดฟางข้าวให้มีขนาด 1 cm และใช้ 1.5 g ผสมน้ำกลั่น 40 ml เพื่อใช้ในการทดลองทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 400W และ 1600W ศึกษาโดยทำการวิเคราะห์หาค่า pH, TCOD, SCOD, TDS และ FVS พบว่า จากการทดลองฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟจะละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการบำบัดสูงขึ้น สำหรับการศึกษาดู BMP พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดจะเกิดที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยไมโครเวฟที่ 150°C โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 28% เมื่อเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น สอดคล้องกับการละลายเพิ่มขึ้นของ TS, VS และ COD สำหรับระยะเวลาในการหมักพบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดด้วยไมโครเวฟจะให้ปริมาณก๊าซมีเทนได้เร็วกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยระยะเวลาที่เร็วที่สุดจะอยู่ที่อุณหภูมิ 150°C โดยสามารถลดระยะเวลาลงได้ 35% การเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดด้วยไมโครเวฟมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของฟางข้าว ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเข้าย่อยสลายได้ดีขึ้น

**Jin et al. (2010)** ได้ทำการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและองค์ประกอบของสารที่เป็นเส้นใยของต้นกกสามเหลี่ยม (Bulrush) ในการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) ซึ่งการระเบิดด้วยไอน้ำ เป็นวิธีที่สามารถใช้ในบำบัดเบื้องต้นสำหรับของเสียที่มีสารจำพวกลิกโนเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ และถูกใช้เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนของต้นกกสามเหลี่ยม พบว่า การระเบิดด้วยไอน้ำของต้นกกมีผลผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าต้นกกที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยมีผลผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 205.3 ml/g VS ซึ่งองค์ประกอบหลักของชีวมวลที่มาจากพืชคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งจะเกิดการสร้างเป็นลิกโนเซลลูโลส (Lingo-celluloses) ที่มีความแข็งแรง ซึ่งทนทานต่อจุลินทรีย์และกระบวนการที่มีการใช้เอนไซม์ การบำบัดเบื้องต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำจะก่อให้เกิดสารที่เป็นตัวยับยั้ง 3 กลุ่มหลักคือ กรดอ่อน (Weak acids) อนุพันธ์ของฟูแรน (Furan derivatives) และสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) จึงต้องมีการปรับสภาวะในการบำบัดเบื้องต้นด้วยการ

ระเบิดด้วยไอน้ำให้มีความเหมาะสม (ความชื้น ความดันไอน้ำ และระยะเวลาพัก) เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของชีวมวล และลดการเกิดสารยับยั้ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สภาวะการบำบัดเบื้องต้นที่เหมาะสมซึ่งจะมีความชื้น 11% ความดันไอน้ำ 1.72 MPa และ ระยะเวลาพัก 8.14 นาที และผลกระทบจากความดันไอน้ำที่สูงและระยะเวลาพักที่สูงมีผลต่อการเกิดก๊าซมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากจะช่วยลดการเกิดสารยับยั้งในกระบวนการหมัก

**Mottet et al. (2009)** ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบกะในสภาวะ Thermophilic ของตะกอนจากระบบตะกอนเร่งด้วยวิธีการ Thermal hydrolysis พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับการหมักแบบไร้ออกซิเจนในสภาวะ Mesophilic งานวิจัยนี้นำเสนอการบำบัดร่วมระหว่างการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน (110, 165 และ 220°C) และการหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบกะในสภาวะ Thermophilic (55°C) โดยสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนจะอยู่ที่ 165°C ซึ่งส่งผลให้การละลายของ COD และ VS เพิ่มขึ้นเป็น 18% และ 15% และความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นจาก 47% ไปเป็น 61% การบำบัดที่อุณหภูมิ 165°C สำหรับการบำบัดด้วยความร้อนโดยวิธีการใช้ไฟฟ้าและไอน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ไม่แนะนำให้มีการทดลองแบบกะสำหรับการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในสภาวะ Thermophilic ของตะกอนซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหย Propionate บางส่วน และการลดลงของอัตราการดูดซึมของกรดไขมันระเหยอาจจะเกิดขึ้นได้

**Saifuddin and Fazlil (2009)** ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟและอัลตราโซนิกที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent: POME) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 3 ชุด จะมีการใช้ตะกอนแตกต่างกันไปคือ ตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยไมโครเวฟ อัลตราโซนิก และไมโครเวฟร่วมกับอัลตราโซนิก โดยที่จะมีชุดควบคุมโดยใช้ตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น มีการทำที่ HRT ต่างๆ กันเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซมีเทน มีปริมาตรการหมัก 5 ลิตร อุณหภูมิในช่วง 32-35°C ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน SCOD/TCOD ของการบำบัดด้วยอัลตราโซนิกจะอยู่ที่ 29% หลังบำบัดเป็นเวลา 30 นาที ในขณะที่การบำบัดด้วยไมโครเวฟจะอยู่ที่ 45% หลังบำบัดเป็นเวลา 7 นาที สำหรับอัตราส่วน BOD<sub>5</sub>/SCOD จะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการบำบัดเบื้องต้นซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ละลายได้ สำหรับสภาวะการบำบัดเบื้องต้นที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดจะอยู่ที่การบำบัดด้วยไมโครเวฟ 3 นาทีแล้วตามด้วยการบำบัดด้วยอัลตราโซนิก 10 นาที ซึ่งในการทดลองพบว่าปริมาณ TVS ของ POME อยู่ที่ 32-34 g/L และจะถูกปรับให้อยู่ที่ 2% ด้วยน้ำกลั่นเพื่อใช้ในการทดลองการบำบัดเบื้องต้น ผลจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วน SCOD/TCOD มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการรายงานว่าเกิดจาก cytoplasmic ของตะกอนลงสู่เฟสของเหลว ซึ่งเกิดจากการแตกของผนังเซลล์ สำหรับ TVFA พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้นทั้งวิธีไมโครเวฟ อัลตราโซนิก และไมโครเวฟร่วมกับอัลตราโซนิก แต่หากเทียบวิธีไมโครเวฟกับอัลตราโซนิกพบว่า วิธีการบำบัดด้วยไมโครเวฟจะให้ปริมาณ TVFA เพิ่มขึ้นสูงสุด มีค่า 10.8 g/L เมื่อเทียบกับอัลตราโซนิก สำหรับค่าพลังงานที่ใช้พบว่าการบำบัดด้วยอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีใช้พลังงานเท่ากับ 120 kJ/L ได้

ปริมาณก๊าซมีเทน 44 ml มีค่าเพิ่มขึ้น 19% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม สำหรับการบำบัดด้วยไมโครเวฟ เป็นระยะเวลา 3 นาทีใช้พลังงานเท่ากับ 252 kJ/L ได้ปริมาณก๊าซมีเทน 58 ml มีค่าเพิ่มขึ้น 56.7% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม จากผลที่ได้ สรุปได้ว่านอกจากการแตกของผนังเซลล์แล้ว ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดทั้งวิธีไมโครเวฟและอัลตราโซนิก โดยค่า  $BOD_5/SCOD$  ของชุดควบคุมอยู่ที่ 0.44 สำหรับการบำบัดด้วยอัลตราโซนิกที่มีความเข้มข้นพลังงาน 0.2 W/ml เป็นเวลา 10 นาที จะมีค่า  $BOD_5/SCOD$  อยู่ที่ 0.66 และที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที จะอยู่ที่ 0.91 สำหรับการบำบัดเบื้องต้นร่วมกันของไมโครเวฟและอัลตราโซนิกจะให้ค่าสูงสุดโดยมีสภาวะการบำบัดด้วยอัลตราโซนิก 10 นาทีตามด้วยไมโครเวฟ 7 นาที แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดด้วยไมโครเวฟเพิ่มขึ้นก็พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบมีนัยสำคัญ ได้มีการสรุปว่าการบำบัดด้วยอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยสาร EPS (Extracellular Polymeric Substances) ของกลุ่มก้อนตะกอนซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์โซ่สั้น (Short chain) สำหรับสารอินทรีย์โซ่ยาว (Long chain) ต้องการการบำบัดต่อไป สำหรับไมโครเวฟพบว่า สามารถช่วยเพิ่มปริมาณ TVFA ได้เนื่องจากสารอินทรีย์โซ่ยาวจะเกิดการแตกโครงสร้างไปเป็น Short chain fatty acid ซึ่งเป็นข้อดีเนื่องจาก พวก Long chain fatty acid โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกสาร Palmitate และ Oleate สามารถที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของ Methanogenic ได้ ส่วนการบำบัดร่วมพบว่าจะทำให้เกิดกลไก 3 ส่วนคือ การแตกตัวของก้อนตะกอนและการลดขนาดอนุภาค การแตกผนังเซลล์และการรั่วไหลของสารประกอบภายในเซลล์ การเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้ไปเป็น VFAs โดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่าเครื่องมือ การออกแบบกระบวนการ การบำรุงรักษา พบว่า การบำบัดด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเป็นวิธีที่ดีที่สุด

Wood et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดเบื้องต้นของตะกอนชั้นที่สองจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีวิธีทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ (i) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนที่  $170^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ii) การบำบัดเบื้องต้นด้วยเคมีความร้อนที่ pH 12 และความร้อน  $140^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (iii) การบำบัดเบื้องต้นด้วยอัลตราโซนิกที่ 20 kHz และมีความหนาแน่น 1 W/ml ตัวอย่างตะกอนได้มาจาก ซัลไฟต์ (Sulfite) และเยื่อกระดาษเหนียว (Kraft pulp mill) ในขณะที่การทดสอบศักยภาพการเกิดมีเทน (BMP) ได้ดำเนินการโดยใช้จุลินทรีย์ที่ได้มาจากถังหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราสูง (High-rate anaerobic digester) ของอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นพบว่าอยู่ที่ 0.05 ml/mg COD และอยู่ที่ 0.20 ml/mg COD สำหรับตะกอนของ Kraft และซัลไฟต์ตามลำดับ การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนให้ผลกระทบที่สูงสุดต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของตะกอน ในกรณีนี้ ผลผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากตะกอนซัลไฟต์เพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้น 10 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่ตะกอน kraft เพิ่มขึ้น 280 เปอร์เซ็นต์ และ 300 เท่า ตามลำดับ โดยพบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพมีความสัมพันธ์กับคาร์โบไฮเดรตละลาย ดีกว่า soluble COD สำหรับผลกระทบจากการบำบัดเบื้องต้นที่มีต่อความสามารถในการละลายของ COD ทั้งตะกอน SSS (Sulfite mill Secondary Sludge) และ KSS (Kraft mill Secondary Sludge) โดยที่ soluble COD ในตะกอน SSS เพิ่มขึ้น 6 เท่าหลังจากที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนหรือความร้อนร่วมกับสารกัดกร่อน สำหรับตะกอน KSS เพิ่มขึ้นใกล้เคียง 20 เท่าหลังจากที่มีการบำบัดเบื้องต้น



ด้วยความร้อน และเพิ่มขึ้น 60 เท่า หลังจากที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนร่วมกับสารกัดกร่อน ความสามารถในการละลายของ COD จะเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของของแข็งแขวนลอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและความร้อนร่วมกับสารกัดกร่อนของตะกอน SSS และ KSS จะเกิดการลดลงของ VSS ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการลดลงของ VSS ในการบำบัดเบื้องต้นของตัวอย่างตะกอนเป็นผลมาจากการละลายของ วัสดุอินทรีย์รวมถึงคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน

**Wilson and Novak (2009)** ทำการศึกษาโดยจำลองกระบวนการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อย่อยสลาย (Thermal Hydrolytic Pretreatment: THP) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ (Polysaccharide) อุณหภูมิที่ใช้ในการ Hydrolysis อยู่ในช่วง 130-220°C พบว่า การแตกตัวของโปรตีน ไขมัน และน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัด สารละลายคาร์โบไฮเดรตบริสุทธิ์ไม่เปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมากนักที่อุณหภูมิต่ำกว่า 220°C อย่างไรก็ตามการเกิด Caramelization ที่สำคัญของแป้งและการผลิต Dextrose และ Maltose จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200°C ในการยับยั้ง Methanogenic โดยแอมโมเนียจะถูกผลิตจากโปรตีนระหว่างกระบวนการ Thermal hydrolysis อย่างไรก็ตามภาระบรรทุกของแข็งในการทำ Thermal hydrolysis จะมีความสำคัญในการควบคุมระดับแอมโมเนียในการหมักแบบไร้ออกซิเจนขั้นสุดท้าย

**Hamzah and Idris (2008)** ได้ทำการศึกษากาโรไลนด้วยเอมไซม์ของ ทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการบำบัดด้วยการใช้ต่างร่วมกับไมโครเวฟ พบว่า เส้นใยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติโดยดูได้ด้วยการศึกษาด้วย SEM และ FT-IR โดยกระบวนการบำบัดเบื้องต้นจะทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใย ดังนั้นจะพบว่า มีปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นสำหรับกระบวนการ Hydrolysis พบว่า พื้นที่ผิวและความพรุนของเส้นใยมีเพิ่มขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้น โดยทั่วไปทะลายปาล์มเปล่าจะมีองค์ประกอบ Alpha cellulose อยู่ 44.2% hemicelluloses 33.5% และ lignin 20.4% โดยพบว่า หลังจากการบำบัดด้วยต่างร่วมกับไมโครเวฟจะมีองค์ประกอบของ cellulose เพิ่มขึ้นเป็น 64% ในขณะที่ hemicelluloses และ lignin จะลดลงอยู่ที่ 26% และ 8% ตามลำดับ และพบว่า การบำบัดด้วยต่างร่วมกับไมโครเวฟจะทำให้มีปริมาณ Soluble glucose สูงถึง 30%

**Climent et al. (2007)** ศึกษาผลกระทบของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและทางกลของตะกอนขั้นที่สองในการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้ภาวะ Thermophilic ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การบำบัดเบื้องต้นของตะกอนทำให้เกิดการเร่งขั้นตอน Hydrolysis ประสิทธิภาพของการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงและต่ำ การบำบัดเบื้องต้นด้วยอุลตราโซนิก และไมโครเวฟในการย่อยสลายตะกอนขั้นที่สองได้มีการศึกษา โดยดูได้จากการเพิ่มขึ้นของของแข็งระเหยได้ที่ผ่านการกรองต่อปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (FVS/TVS) เทียบกับตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัด การเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์นี้ได้มีการศึกษาพบว่า มีการเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าสำหรับการบำบัดด้วยไมโครเวฟ และเพิ่มขึ้นถึงเก้าเท่าในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง การผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะ Thermophilic (55°C) การผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นถึง 50% เมื่อตะกอนผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิต่ำ (70°C) ซึ่งวิธีการบำบัดเบื้องต้นนี้ถือได้ว่าเป็นขั้นแรกของการ

เตรียมการย่อยสลาย (Predigestion) โดยกระตุ้นการทำงานทางชีวภาพของแบคทีเรียที่ย่อยสลายภายใต้อุณหภูมิในช่วง Thermophilic

**Vlyssides and Karlis (2004)** ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนและอัลคาไลน์ของตะกอนจากระบบตะกอนเร่งสำหรับการหมักแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิช่วงปานกลาง (50-90°C) และ pH ในช่วงที่เป็นด่าง (pH 8-11) พบว่าที่ค่า pH 11 และอุณหภูมิ 90°C ความเข้มข้นของ VSS เท่ากับ 6.82% สามารถลด VSS ได้ 45% ภายใน 10 ชั่วโมงและที่เวลาเท่ากันค่าของ SCOD เท่ากับ 70,000 mg/L และประสิทธิภาพโดยรวมในการผลิตมีเทนเท่ากับ 0.28 l CH<sub>4</sub>/g VSS loading

**Kim et al. (2003)** ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักแบบไร้ออกซิเจนของตะกอนจากระบบตะกอนเร่งด้วยการทดลองแบบกะ ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบการบำบัดเบื้องต้นหลายวิธี ได้แก่ การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน เคมี อุลตราโซนิก และด้วยเคมีความร้อนเป็นต้น ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การผลิตก๊าซชีวภาพและลดมลพิษด้วยการเพิ่มความสามารถในการละลาย ลดขนาดอนุภาค เพิ่มสารละลายโปรตีน และเพิ่ม SCOD (Soluble COD) พบว่า การบำบัดทางเคมีความร้อนให้ผลการบำบัดเบื้องต้นที่ดีที่สุด กล่าวคือ สามารถผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นมากกว่า 34.3% และการบำบัด SCOD เพิ่มขึ้นมากกว่า 67.8% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ การผลิตก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการกำจัด SCOD พบว่า มีค่าเท่ากับ 5,037 ลิตรของก๊าซชีวภาพต่อลูกบาศก์เมตร 3,367 ลิตรของมีเทนต่อลูกบาศก์เมตร และ 61.4% ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการหมักแบบไม้ออกซิเจนด้วยการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมีความร้อนของกากตะกอนจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

**Sun and Cheng (2002)** ได้ทำการทบทวนเอกสารกระบวนการ Hydrolysis ของสารลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เพื่อผลิตเอทานอล (Ethanol) โดยที่สารชีวมวลที่เป็นลิกโนเซลลูโลส สามารถที่จะนำมาใช้ในการผลิตเป็นเอทานอล ซึ่งมี 2 กระบวนการหลักที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปคือ การ Hydrolysis สารเซลลูโลสในลิกโนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาล (Reducing sugars) และจากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการหมัก (Fermentation) เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล สำหรับการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการบำบัดเบื้องต้นของวัสดุที่มีลิกโนเซลลูโลส โดยวิธีนี้จะบำบัดด้วยความดันสูงที่อ้อมตัวด้วยไอน้ำและหลังจากนั้นความดันจะถูกปลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้วัสดุที่ถูกบำบัดเกิดการแตกตัวออก การระเบิดด้วยไอน้ำสภาวะที่ถูกแนะนำจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 160-260°C (ซึ่งจะสัมพันธ์กับความดันที่ 0.69-4.83 MPa) เป็นเวลาไม่กี่วินาที จนถึงระดับนาที่ ก่อนที่วัสดุจะสัมผัสกับความดันบรรยากาศ กระบวนการนี้จะทำให้สารจำพวกเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัว และสารลิกนินจะเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อนที่สูง ดังนั้นจึงทำให้ศักยภาพการ Hydrolysis สารเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพของการ Hydrolysis ด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเท่ากับ 90% ในวัสดุที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 15% ปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำคือ ระยะเวลาที่กัก (Residence time) อุณหภูมิ ขนาดของวัสดุ และความชื้น สภาวะที่เหมาะสมในการ Hydrolysis สารเฮมิเซลลูโลส จะอยู่ที่อุณหภูมิสูง และระยะเวลาที่กักสั้น (270°C มีระยะเวลาสัมผัส 1 นาที) หรืออยู่ที่อุณหภูมิต่ำและมีระยะเวลาที่กักยาว (190°C ระยะเวลาสัมผัส

10 นาที) สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเบื้องต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำของชานอ้อย พบว่ามีอุณหภูมิอยู่ที่  $220^{\circ}\text{C}$  และระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที โดยมีอัตราส่วนของน้ำและของแข็งอยู่ที่ 2:1 และมีการเติมกรด ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 1% พบว่า มีน้ำตาลเกิดขึ้น 65.1 g ของน้ำตาล/100 g ของชานอ้อย หลังจากที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ ข้อดีของการบำบัดเบื้องต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำคือ มีความต้องการพลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับวิธีทางกายภาพ และไม่มีค่าใช้จ่ายในการรีไซเคิลหรือค่าใช้จ่ายทางด้านสิ่งแวดล้อม

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและสูงในการย่อยสลายตะกอนดีแคเตอร์จากเครื่องดีแคเตอร์ ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) และการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน
- 3) ศึกษาเปรียบเทียบการเกิดก๊าซชีวภาพที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน เทียบกับการเกิดก๊าซชีวภาพที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถลดปริมาณของกากตะกอนดีแคเตอร์ส่วนเกิน โดยการนำกลับมาใช้ใหม่
- 2) สามารถเพิ่มทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทน
- 3) เพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนดีแคเตอร์

## บทที่ 2

### วิธีวิจัย

#### 2.1 วิธีการดำเนินการ

##### 2.1.1 การเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างกากตะกอนจากเครื่องดีแคนเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เก็บมาจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดกระบี่ โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนใหม่ที่ออกจากเครื่องดีแคนเตอร์ เก็บในช่วงเดือน พฤษภาคม ซึ่งกำลังมีการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยได้ทำการเก็บแบบจำกัดอากาศด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ เพื่อเก็บรักษาสภาพของตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลชีพหรือเชื้อราที่เกิดขึ้นได้ทั่วไปในสภาวะที่มีอากาศ ดังรูปที่ 2-1 สำหรับหัวเชื้อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียจากกันบ่อของระบบแอนแอโรบิกของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งเดียวกัน โดยทั้งกากตะกอนจากเครื่องดีแคนเตอร์และหัวเชื้อที่ใช้ในงานวิจัยได้ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย



รูปที่ 2-1 การเก็บรักษาตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์

##### 2.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

กากตะกอนดีแคนเตอร์ และหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองได้มีการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 2-1 และ 2-2 สำหรับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และเตาอบไมโครเวฟได้ทำการวิเคราะห์ตามตารางที่ 2-3 ส่วนการศึกษาการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้ทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆโดยมีความถี่ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2-4 โดยการศึกษาค่าการละลายของสารอินทรีย์ในการทดลองครั้งนี้ ทำการศึกษาจากการละลายของ TCOD และ SCOD เนื่องจากค่า COD เป็นค่าที่สามารถบ่งชี้ปริมาณของสารอินทรีย์ได้ สำหรับการละลายของ TS เน้นการศึกษาไปที่ปริมาณของ TS และ TDS และการละลายของของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์จะศึกษาจากปริมาณ TVS และ FVS

ตารางที่ 2-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนดีแคเนเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
อุณหภูมิ	Thermo Meter	APHA, AWWA and WEF, 2005
ความชื้น	Gravimetric Method	
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งละลาย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งระเหยง่ายในรูปสารละลาย	Gravimetric Method	
ทีเคเอ็นทั้งหมด และทีเคเอ็นละลาย	Kjeldahl Method	
แอมโมเนียไนโตรเจน	Distilled and Titration Method	
อินทรีย์ไนโตรเจน	Calculate	
ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีในรูปอนุภาค และซีโอดีละลาย	Titration Method	Dilallo and Albertson, 1961
ค่าความเป็นด่างทั้งหมด	Titration Method	
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย		

### 2.1.3 ชุดการทดลอง

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนของกากตะกอนดีแคเนเตอร์จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุหมักแบบไร้อากาศสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนนั้นจะใช้อุปกรณ์ในการทำความร้อนที่แตกต่างกัน 2 วิธี และจะทำการหาค่าคุณภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยแบ่งชุดการทดลองออกได้เป็น 4 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 2-2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	APHA, AWWA and WEF, 2005
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	Gravimetric Method	
ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีในรูปอนุภาค และซีโอดีละลาย	Titration Method	
ค่าความเป็นด่างทั้งหมด	Titration Method	Dilallo and Albertson, 1961
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	Direct Titration	

### 1) ชุดการทดลองที่ 1 (การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ)

- (1) นำตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C มาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับอุณหภูมิของกากตะกอนดีแคนเตอร์
- (2) ชั่งกากตะกอนดีแคนเตอร์มาใส่ลงในขวดแก้วขนาด 250 มล. ขวดละ 50 กรัม
- (3) นำขวดแก้วที่ใส่ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์มาทำการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ตามอุณหภูมิและระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันตามตารางที่ 2-5
- (4) ทดสอบคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีการทำการทดสอบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

ตารางที่ 2-3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	Gravimetric Method	APHA, AWWA and WEF, 2005
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งละลาย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งระเหยง่ายในรูปสารละลาย	Gravimetric Method	
ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีในรูปอนุภาค และซีโอดีละลาย	Titration Method	
ร้อยละซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมด	Calculation	

### 2) ชุดการทดลองที่ 2 (การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ)

- (1) นำตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C มาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับอุณหภูมิของกากตะกอนดีแคนเตอร์
- (2) ชั่งกากตะกอนดีแคนเตอร์มาใส่ลงในขวดแก้วขนาด 250 มล. ขวดละ 50 กรัม
- (3) นำขวดแก้วที่ใส่ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์มาทำการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ตามอุณหภูมิและระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันตามตารางที่ 2-5
- (4) ทดสอบคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีการทำการทดสอบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

ตารางที่ 2-4 พารามิเตอร์ และความถี่ในการวิเคราะห์ของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	การแทนที่น้ำ	ทุกวัน
ปริมาณก๊าซมีเทน	Gas Chromatography*	ทุก 7 วัน
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	Gravimetric Method	เริ่มต้นและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งละลาย	Gravimetric Method	
ปริมาณของแข็งระเหยง่ายในรูปสารละลาย	Gravimetric Method	
ซีโอดี และซีโอดีละลาย	Closed Reflux	

หมายเหตุ : \* ทำการศึกษาด้วย Packed colum (Shincarbon ST) สภาวะอุณหภูมิ Oven 40°C เป็นระยะเวลา 3 นาที จากนั้นเพิ่มความร้อนด้วยอัตรา 8°C/min จนถึง 120 นาที ใช้ TCD โดยมีอุณหภูมิ 200°C โดยมี Make up flow และ Reference flow เท่ากับ 2 และ 18 ml/min ตามลำดับ

ตารางที่ 2-5 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและความร้อนสูง

อุณหภูมิในการบำบัดเบื้องต้น (°C)	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)
66	90, 120, 150 และ 180
88	90, 120, 150 และ 180
110	30, 60, 90 และ 120
132	30, 60, 90 และ 120

### 3) ชุดการทดลองที่ 3 (การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ)

- (1) นำตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C มาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับอุณหภูมิของกากตะกอนดีแคนเตอร์
- (2) ชั่งกากตะกอนดีแคนเตอร์มาใส่ลงในขวดแก้วขนาด 250 มล. ขวดละ 10 กรัม
- (3) จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 50 มล.
- (4) นำขวดแก้วที่เตรียมไว้มาทำการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) ตามกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันตามตารางที่ 2-6
- (5) ทดสอบคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีการทำการทดสอบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม

ตารางที่ 2-6 ระยะเวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดกากตะกอนดีแคนเตอร์ด้วยไมโครเวฟ

Power (W)	Contact time (min)
160	2.00, 4.00, 6.00 และ 8.00
320	1.00, 2.00, 3.00 และ 4.00
480	1.00, 1.30, 2.00 และ 2.30
640	0.30, 1.00, 1.30 และ 2.00
800	0.30, 1.00 และ 1.30

#### 4) ชุดการทดลองที่ 4 (การหมักแบบไร้ออกซิเจน)

- (1) เลือกชุดการทดลองที่มีผลการละลายเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์มากที่สุดจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมาทำการทดลองต่อในชุดการทดลองที่ 4
- (2) เตรียมตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนจากหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และจากคลื่นไมโครเวฟ โดยการเตรียมตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g ต่อน้ำกลั่น 50 ml
- (3) ปิเปตตัวอย่างที่เตรียมไว้มา 12 ml. จากนั้นเติมหัวเชื้อลงไป 48 ml. โดยมีอัตราส่วนหัวเชื้อต่อสารอาหารอยู่ที่ 2:1 กรัมของของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด
- (4) ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ที่ 6.8-7.2
- (5) ไล่ก๊าซออกซิเจนในขวดออกด้วยการเป่าไล่ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99% เป็นเวลา 3 นาที ก่อนที่จะปิดขวด โดยแต่ละตัวอย่างจะทำ 3 ซ้ำ มีการใช้ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนมาเป็นชุดควบคุม ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำการเขย่าวันละ 2 ครั้ง (เช้าและเย็น)
- (6) ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนเริ่มการหมักแบบไร้ออกซิเจน
- (7) ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน จนสิ้นสุดปฏิกิริยา (ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่) โดยจะมีการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทุกๆ 7 วันนำไปทดสอบหาปริมาณก๊าซมีเทน
- (8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆอีกครั้ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน

## 2.2 วัสดุและอุปกรณ์

### 2.2.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง

- (1) เครื่องซีลสุญญากาศ
- (2) ถังฟลอยหน้าใส



### 2.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน

- (1) หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)
- (2) เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven)
- (3) ขวดแก้วขนาด 250 มล. (Schott duran)

### 2.2.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางเคมี

- (1) ตู้อบ (Hot air oven)
- (2) เตาเผา (Furnace)
- (3) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- (4) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง (Electronic balance)
- (5) เตาย่อยที่เคเอ็น (Block digestion unit)
- (6) เตากลั่น (Distillation unit)
- (7) เตาย่อยซีไอดี (COD Reactor)
- (8) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- (9) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuges)
- (10) ชุดกรอง (Filtration unit)
- (11) เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas Chromatography)

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

##### 3.1 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์และหัวเชื้อ

ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัด กระบี่ มีกำลังการผลิต 60 ตัน ของทะลายปาล์มสดต่อชั่วโมง โดยมีปริมาณน้ำมันปาล์มดิบอยู่ที่ 17.2% และเกิดวัสดุเศษเหลือจากการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า 28.5% กะลาปาล์ม 6% เมล็ดในปาล์ม 15.3% เส้นใยปาล์ม 30% กากตะกอนดีแคนเตอร์ 3% โดยเส้นใยปาล์มจะถูกนำกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตไอน้ำ กะลาปาล์มจะถูกขายเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เมล็ดในปาล์มจะขายให้กับอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่าจะขายเพื่อใช้เป็นวัสดุคลุมหน้าดิน หรือใช้เป็นส่วนผสมในการหมักปุ๋ย สำหรับกากตะกอนดีแคนเตอร์จะขายเพื่อใช้เป็นวัสดุหมักปุ๋ย หรือใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์

หัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ส่วนของน้ำสลัดจั่นบ่อของระบบผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแห่งเดียวกันกับตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ ผลการทดสอบคุณสมบัติของหัวเชื้อ และกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้ผลตามตารางที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ

##### ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของหัวเชื้อ (Seed)

Parameter	Unit	Seed
pH	-	8.21±0.06
TCOD	mg/l	23,916±522
SCOD	mg/l	2,277±51
Alkalinity	mg/l	4,320±0
VFA	mg/l	132±3
TS	mg/l	31,287±257
TVS	mg/l	18,000±165

ลักษณะของน้ำสลัดจั่นเป็นของเหลวขุ่นมีตะกอนสีดำพบว่า ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVS) มีค่าเท่ากับ 18,000 mg/l ซึ่งเป็นปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดปริมาณหัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ในการทดลองหาค่าการผลิตก๊าซมีเทนด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยได้กำหนดปริมาณของอัตราส่วนของสารอาหาร(Substrate) ต่อหัวเชื้อ (Inoculums) เท่ากับ 2:1 (base on TVS)

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์

Parameter	Unit	Decanter Cake
Temp	°C	64
pH	-	4.31±0.06
Moisture content	%	79.9±0.6
Total Solid	%	20.1±0.6
Total Volatile Solid	% dry basis	87.3±0.4
Total dissolved solid	% dry basis	20.3±0.1
Filtrate Volatile Solid	% dry basis	15.8±0.2
VFA	g/kg dry	15.0±0.3
Total Alkalinity	g/kg dry	5.56±0.24
TCOD	g/kg dry	1,373±34
SCOD	g/kg dry	237±5
PCOD	g/kg dry	1,136
TKN	g/kg dry	22.5±0.3
NH <sub>3</sub> -N	g/kg dry	0.46±0.04
Org-N	g/kg dry	22.0
STKN	g/kg dry	3.54±0.08

สำหรับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลเข้ม คล้ายดินเหนียว โดยมีค่าความชื้น (Moisture content) ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solids: TVS) ซีโอดีทั้งหมด (Total COD: TCOD) ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) และค่าแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>-N) มีค่าเท่ากับ 79.9%, 87.4% dry basis, 1,373 g/kg dry, 22.5 g/kg dry และ 0.46 g/kg dry ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ Nuntiya (2009) พบว่า มีค่าเท่ากับ 76.7%, 83.4% dry basis, 880 g/kg dry, 21.5 g/kg dry และ 0.69 g/kg dry ตามลำดับ พบว่า กากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในงานทดลองครั้งนี้มีค่าความชื้นสูงกว่างานวิจัยอื่นอยู่เล็กน้อย นั่นคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าต่ำกว่างานวิจัยอื่น จึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดในการทดลองครั้งนี้มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีการหาค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดในรูปของร้อยละของน้ำหนักแห้ง สำหรับค่าซีโอดีมีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่นถึง 56% ส่วนปริมาณทีเคเอ็นมีค่าสูงกว่างานวิจัยอื่นเล็กน้อย และปริมาณแอมโมเนียน้อยกว่างานวิจัยอื่น อาจเกิดจากวิธีการเก็บรักษาตัวอย่าง ตลอดจนระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งส่งผลต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลชีพ ซึ่งหากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลชีพจะส่งผลให้ปริมาณของสารอินทรีย์ลดลง หรือปริมาณซีโอดีมีค่าลดลงได้ และในกรณีของสารอินทรีย์ไนโตรเจน เมื่อเกิดการ

ย่อยสลายโดยจุลชีพ ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ไนไตรท์ หรือไนเตรตได้ ทำให้ปริมาณของทีเคเอ็นมีค่าลดลง และแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นได้

จากปริมาณซีโอดีทั้งหมด (TCOD) มีค่าเท่ากับ 1,373 g/Kg dry และปริมาณซีโอดีละลาย (SCOD) มีค่าเท่ากับ 237 g/Kg dry ทำให้ทราบว่าปริมาณของซีโอดีในรูปของแข็ง (Particle COD: PCOD) มีค่าเท่ากับ 1,136 g/Kg dry ซึ่งคิดเป็น 82.7% ของปริมาณซีโอดีทั้งหมด ในขณะที่ปริมาณซีโอดีละลายจะมีปริมาณเพียง 17.3% เท่านั้น ทำให้ทราบว่ากากตะกอนดีแคนเตอร์มีปริมาณซีโอดีในรูปของแข็งไม่ละลายน้ำอยู่เป็นส่วนใหญ่ โดยมีค่าอัตราส่วน SCOD/TCOD อยู่ 17.3% ซึ่งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ นันทน์ภัส (2552) อยู่เล็กน้อย โดยงานวิจัยของ นันทน์ภัส (2552) มีค่าเท่ากับ 23.39%

สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) มีค่าเท่ากับ 20.1% โดยเมื่อพิจารณาในส่วนของของแข็งทั้งหมดพบว่า ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) มีค่าเท่ากับ 20.3% ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ดังนั้นปริมาณของแข็งที่เหลืออีก 79.7% จะอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งถือได้ว่าปริมาณของแข็งส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ

จากผลการทดลองคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์พบว่า ปริมาณของซีโอดีและของแข็งทั้งหมดส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ มีเพียงส่วนน้อยที่อยู่ในรูปละลายน้ำ ดังนั้นเห็นได้ว่ากากตะกอนดีแคนเตอร์ยังมีปริมาณสารอินทรีย์อีกมากที่อยู่ในรูปของแข็ง การจะเพิ่มการละลายของซีโอดีและของแข็งได้จึงจำเป็นต้องอาศัยการบำบัดเบื้องต้นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดด้วยความร้อน การบำบัดด้วยสารเคมี (กรด-ด่าง) หรืออาจใช้วิธีบำบัดเบื้องต้นร่วมกัน เช่น การบำบัดด้วยเคมีร่วมกับความร้อน โดยในการทดลองครั้งนี้จะทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน โดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่ต่างกัน 2 ชนิดคือ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) และเตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven)

สำหรับการเพิ่มการละลายของซีโอดีสามารถที่จะช่วยให้การผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเพิ่มขึ้นได้ (Carrère et al., 2008) และสามารถลดระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ลงได้ (Graja et al., 2005)

### 3.2 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

การทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ (<100°C) โดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นแหล่งให้ความร้อนและมีการควบคุมความดันให้คงที่ เมื่อกากตะกอนดีแคนเตอร์ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน โดยทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เปลี่ยนไป ดังตารางที่ 3-3 และตารางที่ 3-4 ตามลำดับ โดยมีกระทบต่อการละลายของสารอินทรีย์ดังนี้

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C

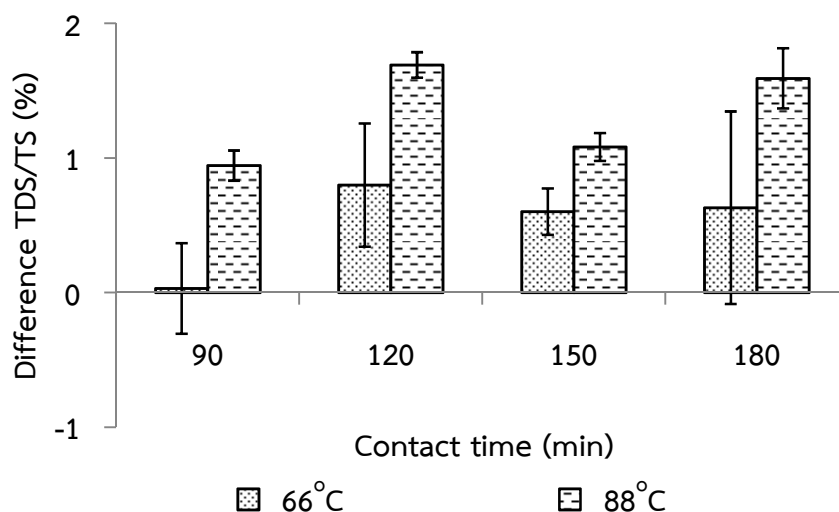
parameter	unit	contact time (min)				
		0	90	120	150	180
TS	%	21.9	22.8	22.3	22.9	22.4
TDS	%	4.07	4.24	4.32	4.39	4.29
TDS/TS	%	18.6	18.6	19.3	19.2	19.2
TVS	% dry	83.6	83.8	83.4	83.8	83.6
FVS	% dry	14.0	14.3	15.0	14.9	14.7
FVS/TVS	%	16.7	17.1	18.0	17.8	17.6
TCOD	mg/g dry	1,147	1,217	1,113	1,177	1,149
SCOD	mg/g dry	205	202	203	212	209
SCOD/TCOD	%	17.9	16.6	18.3	18.0	18.2
PCOD	mg/g dry	942	1,013	911	965	940
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.00	0.35	0.08	0.25
Difference TDS/TS	%	0.00	0.03	0.79	0.60	0.62
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.38	1.28	1.08	0.86

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C

parameter	unit	contact time (min)				
		0	90	120	150	180
TS	%	21.1	21.1	20.7	20.6	20.3
TDS	%	4.12	4.33	4.41	4.26	4.30
TDS/TS	%	19.6	20.5	21.3	20.7	21.2
TVS	% dry	86.9	87.1	87.3	86.7	87.2
FVS	% dry	13.9	14.8	15.5	15.2	15.4
FVS/TVS	%	16.0	16.9	17.8	17.5	17.7
TCOD	mg/g dry	1,142	1,152	1,134	1,149	1,160
SCOD	mg/g dry	194	200	209	210	210
SCOD/TCOD	%	17.0	17.4	18.4	18.3	18.1
PCOD	mg/g dry	948	952	925	939	950
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.35	1.41	1.26	1.09
Difference TDS/TS	%	0.00	0.94	1.69	1.08	1.59
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.97	1.85	1.51	1.71

## 1) การละลายของของแข็ง (Solids solubilization)

การละลายของของแข็งจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ทำโดยหาค่า TS และ TDS เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วน TDS/TS จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่า TDS/TS เพื่อศึกษาการละลายของของแข็งโดยทำการเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้ค่าของแข็งละลายที่เพิ่มขึ้น (Difference TDS/TS) จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำ ( $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$ ) พบว่า การบำบัดที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  ไม่สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้ โดยเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ค่า TDS/TS ที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} > 0.05$ ) ในขณะที่การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $88^{\circ}\text{C}$  กลับพบว่า สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่เวลาที่ 90 ไปจนถึงเวลาที่ 120 จากนั้นที่ระยะเวลาในการบำบัดสูงขึ้นตั้งแต่ 150 ไปจนถึง 180 ค่า Difference TDS/TS มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับระยะเวลาในการบำบัดที่ 90 ถึง 120 นาที แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $88^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลาในการบำบัดที่มากกว่า 120 นาที ไม่ส่งผลให้เกิดการละลายของของแข็งได้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3-1 เมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ค่า TDS/TS ของอุณหภูมิในการบำบัด  $88^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) โดยระยะเวลาที่ทำการศึกษสามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้ทั้งหมด (90, 120, 150 และ 180 นาที) ซึ่งจากงานศึกษาโดย Bougrier et al. (2008) พบว่า ค่า TSS/TS และค่า VSS/TSS มีค่าลดลงเมื่อมีการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้ความเข้มข้นของของแข็งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีค่าลดลงเกิดเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กเพิ่มขึ้น โดยได้ทดลองกับตะกอนที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า มีความสอดคล้องกันโดยมีการละลายของของแข็งเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิในการบำบัด  $88^{\circ}\text{C}$



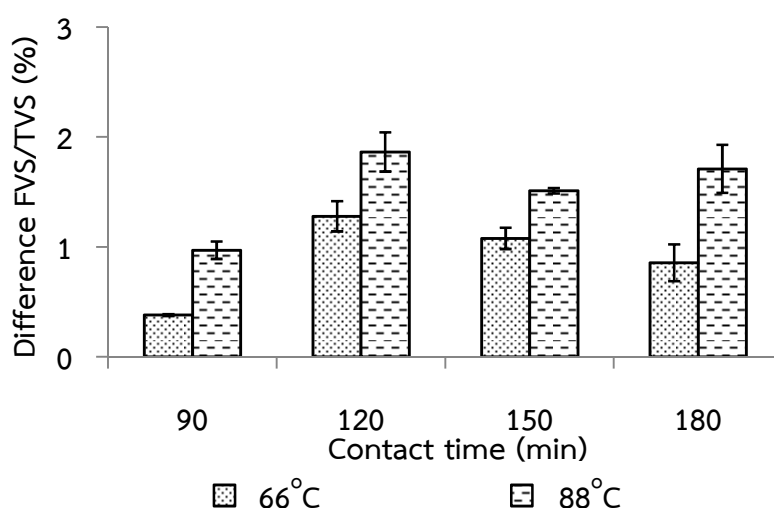
รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS/TS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$

จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$  พบว่า มีเพียงที่อุณหภูมิ  $88^{\circ}\text{C}$  เท่านั้นที่สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งเพิ่มขึ้นได้ โดยมีค่า

การละลายสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด มีค่า TDS/TS เท่ากับ 21.3% มีค่าเพิ่มขึ้น 1.69% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 8.62% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

## 2) การละลายของของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids solubilization)

การละลายของของแข็งระเหยง่ายของกากตะกอนดีแคนเตอร์สามารถหาได้โดยวิเคราะห์หาค่า TVS และ FVS มาคำนวณหาค่า FVS/TVS เพื่อศึกษาการละลายของของแข็งระเหยง่าย โดยทำการเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้ค่าของแข็งระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้น (Difference FVS/TVS) จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำ ( $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$ ) พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำสามารถเพิ่มการละลายของของแข็งระเหยง่ายได้ โดยมีค่า Difference FVS/TVS เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาที่ 90 ไปจนถึงเวลาที่ 120 จากนั้นค่า Difference FVS/TVS ที่ระยะเวลาในการบำบัด 150 ถึง 180 นาทีจะมีค่าอยู่ในช่วงระยะเวลา 90 ถึง 120 นาที ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันกับการละลายของของแข็งที่อุณหภูมิในการบำบัด  $88^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 3-2 โดยเมื่อพิจารณาค่า FVS/TVS ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$  มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) เห็นได้ว่าของแข็งระเหยง่ายที่อยู่ในรูปอนุภาค (Particle Volatile Solids; PVS) สามารถเพิ่มการละลายได้ง่ายกว่าของแข็งที่อยู่ในรูปอนุภาค (Particle Solids; PS) โดยได้มีการศึกษาจาก Bougrier et al. (2006) ในการบำบัดด้วยความร้อนพบว่า ทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ( $130^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$ ) มีค่าการละลายของ VS สูงกว่า TS เล็กน้อย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัดต่ำ ( $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$ ) ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เนื่องจากการที่ VS นั้นมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด ในขณะที่ TS มีส่วนประกอบที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดด้วยความร้อนจะส่งผลต่อการละลายของสารอินทรีย์ จึงทำให้ค่าการละลายในส่วนของ VS จึงมีค่ามากกว่าการละลายของ TS



รูปที่ 3-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $66^{\circ}\text{C}$  และ  $88^{\circ}\text{C}$

จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งระเหยง่ายได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการละลายสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ที่อุณหภูมิ 88°C มีค่า FVS/TVS เท่ากับ 17.8% มีค่าเพิ่มขึ้น 1.85% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 11.6% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยความร้อนต่ำ สามารถทำให้สารอินทรีย์เกิดการละลายได้เพิ่มขึ้น

### 3) การละลายของซีโอดี (COD Solubilization)

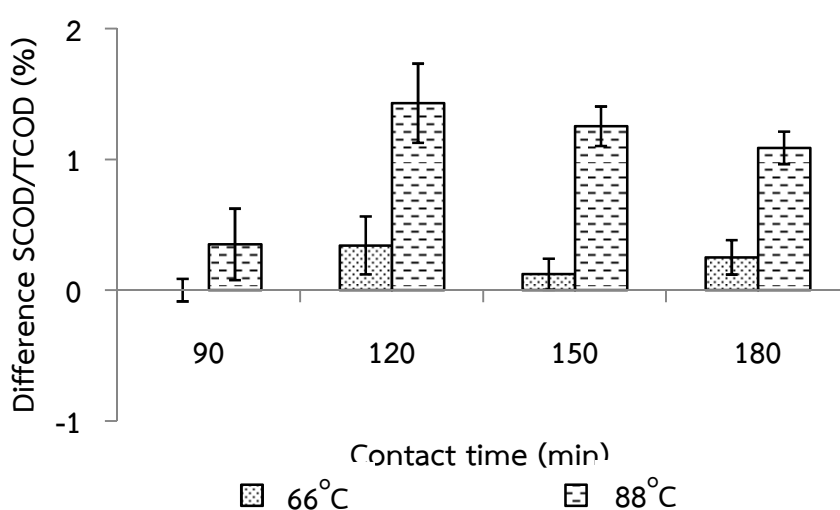
การละลายของซีโอดีจากกากตะกอนดีแคนเตอร์สามารถหาได้โดย วิเคราะห์หาค่า TCOD และ SCOD มาคำนวณหาค่า SCOD/TCOD เพื่อศึกษาการละลายของซีโอดี โดยทำการเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้ค่าการละลายของซีโอดีที่เพิ่มขึ้น (Difference SCOD/TCOD) จากการศึกษการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำ (66°C และ 88°C) พบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 66°C ไม่สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการละลายของ TS โดยค่า Difference SCOD/TCOD มีค่าเข้าใกล้ค่า 0 (ไม่มีความแตกต่างจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน) แต่ที่การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ โดยมีค่า Difference SCOD/TCOD เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่นาทีที่ 90 ไปจนถึงนาทีที่ 120 จากนั้นค่า Difference SCOD/TCOD ที่ระยะเวลาในการบำบัด 150 ถึง 180 นาทีจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ 120 นาที ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการละลายของของแข็ง ดังรูปที่ 3-3 เมื่อพิจารณาว่า SCOD/TCOD ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 66°C ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-Value>0.05) สำหรับที่อุณหภูมิ 88°C มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value<0.05) โดยจะพบว่า ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C ค่า SCOD/TCOD ที่ระยะเวลาในการบำบัดต่างๆ มีค่าเท่ากับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน สำหรับอุณหภูมิในการบำบัด 88°C พบว่า ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120, 150 และ 180 นาที สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้

ดังนั้นจากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C พบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 66°C ระยะเวลาในการบำบัด 90, 120, 150 และ 180 นาที ไม่สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ สำหรับที่อุณหภูมิในการบำบัด 88°C สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120, 150 และ 180 นาที โดยมีค่าการละลายสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ที่อุณหภูมิ 88°C มีค่า SCOD/TCOD เท่ากับ 18.4% มีค่าเพิ่มขึ้น 1.41% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 8.29% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

จากการศึกษาบำบัดด้วยความร้อนต่ำ (66°C และ 88°C) พบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 66°C ไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ แต่การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้เล็กน้อย โดยระยะเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 120 นาที โดยมีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 8.29% เมื่อเทียบกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับงานของ นันทน์ภัส (2552) ที่ได้ทำการศึกษการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ให้กับกากตะกอนดีแคนเตอร์ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วน SCOD/TCOD จะมี



ค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 2 ชั่วโมง (120 นาที) หลังจากนั้นค่าอัตราส่วน SCOD/TCOD จะมีค่าคงที่ โดยมีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 8% ส่วนงานวิจัยของ Eskicioglu et al. (2006) พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 96°C ของตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง เป็นระยะเวลา 80 นาที สามารถเพิ่มค่า SCOD/TCOD ได้ 0.27% จาก 0.06% จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อุณหภูมิในการบำบัด 88°C สามารถเพิ่มค่าการละลายของซีโอดี (SCOD/TCOD) ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการละลายของสารอินทรีย์อาจเกิดได้จากการสลายเซลล์ของเซลล์จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนดีแคนเตอร์ และการสลายตัวของสารลิกโนเซลลูโลส เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส รวมไปถึงการละลายของสารจำพวก โปรตีน และไขมัน ซึ่งพบว่ามีส่วนประกอบอยู่ในกากตะกอนดีแคนเตอร์



รูปที่ 3-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C และ 88°C

### 3.3 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

การทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูง (>100°C) โดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อเป็นแหล่งให้ความร้อนและมีการควบคุมความดันให้คงที่ เมื่อกากตะกอนดีแคนเตอร์ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน โดยทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เปลี่ยนไป ดังตารางที่ 3-5 และตารางที่ 3-6 ตามลำดับ โดยมีผลกระทบต่อการละลายของสารอินทรีย์ดังนี้

ตารางที่ 3-5 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C

parameter	unit	contact time (min)				
		0	30	60	90	120
TS	%	19.8	20.5	20.6	20.9	20.5
TDS	%	3.89	4.30	4.38	4.42	4.39

ตารางที่ 3-5 (ต่อ) คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C

parameter	unit	contact time (min)				
		0	30	60	90	120
TDS/TS	%	19.6	21.0	21.2	21.1	21.4
TVS	% dry	87.6	88.0	88.0	87.9	87.8
FVS	% dry	14.1	16.2	17.2	17.4	17.2
FVS/TVS	%	16.1	18.4	19.6	19.8	19.6
TCOD	mg/g dry	1,217	1,235	1,237	1,207	1,201
SCOD	mg/g dry	193	204	210	211	220
SCOD/TCOD	%	15.85	16.6	17.0	17.5	18.3
PCOD	mg/g dry	1,024	1,031	1,027	996	981
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.70	1.11	1.64	2.47
Difference TDS/TS	%	0.00	1.38	1.57	1.49	1.78
Difference FVS/TVS	%	0.00	2.33	3.45	3.74	3.55

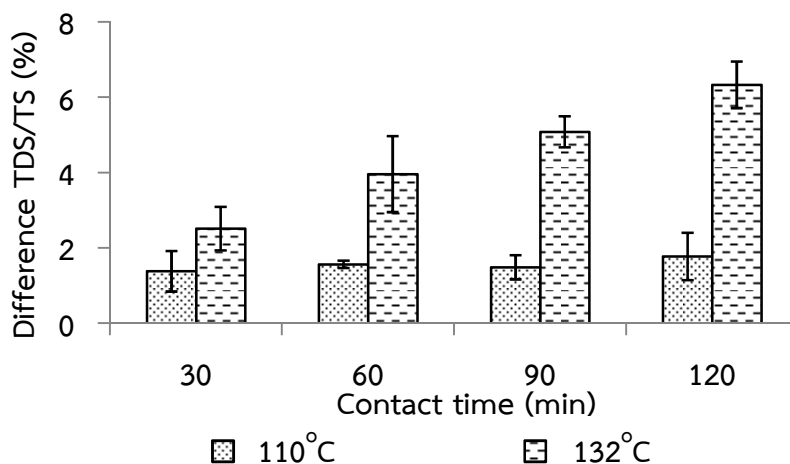
ตารางที่ 3-6 คุณสมบัติของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C

parameter	unit	contact time (min)				
		0	30	60	90	120
TS	%	19.2	20.6	21.2	20.6	20.8
TDS	%	3.78	4.57	5.00	5.11	5.41
TDS/TS	%	19.7	22.2	23.6	24.7	26.0
TVS	% dry	87.9	88.1	88.0	88.1	87.9
FVS	% dry	14.5	18.2	20.1	20.6	22.0
FVS/TVS	%	16.6	20.7	22.9	23.4	25.0
TCOD	mg/g dry	1,215	1,231	1,246	1,240	1,251
SCOD	mg/g dry	190	214	230	250	262
SCOD/TCOD	%	15.7	17.4	18.4	20.2	20.9
PCOD	mg/g dry	1,024	1,016	1,017	990	989
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	1.74	2.76	4.48	5.28
Difference TDS/TS	%	0.00	2.52	3.96	5.09	6.33
Difference FVS/TVS	%	0.00	4.14	6.32	6.85	8.43

1) การละลายของของแข็ง (Solids solubilization)

การละลายของของแข็งจากการเปรียบเทียบค่า TDS/TS กับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้ค่าการละลายของของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Difference TDS/TS) จากการศึกษากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (110°C และ 132°C) พบว่าที่อุณหภูมิในการบำบัดที่อุณหภูมิ 110°C สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้ โดยระยะเวลาในการบำบัดตั้งแต่เวลาที่ 30 จนถึง 120 นาทีสามารถเพิ่มค่า Difference TDS/TS ได้ใกล้เคียง ซึ่งมีค่ามากกว่ากากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (ค่า Difference TDS/TS = 0) และเมื่อพิจารณาค่า TDS/TS ทางสถิติพบว่า ค่า TDS/TS มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value<0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้เท่ากันในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา (30, 60, 90 และ 120 นาที) สำหรับการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาที่ 30 ไปจนถึงเวลาที่ 120 ดังรูปที่ 3-4 โดยเมื่อพิจารณาค่า TDS/TS ทางสถิติพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value<0.05) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiamonti et al. (2012) ได้ทำการบำบัดด้วย Steam Explosion (SE) ของหญ้ามีสแคนทัส (*Miscanthus*) ที่อุณหภูมิ 180°C ถึง 220°C เป็นระยะเวลา 2-10 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้นปริมาณของแข็งในส่ว Solid phase จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จาก 71.2% ที่ระยะเวลาในการบำบัด 3 นาที ไปเป็น 58% ที่ระยะเวลาในการบำบัด 5 นาที โดยพวก Hemicellulose เป็นส่วนหลักที่เกิดการละลายจากการบำบัดเบื้องต้นด้วย SE

ดังนั้นจากการศึกษากการบำบัดด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการละลายของของแข็งสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C มีค่า TDS/TS เท่ากับ 26.0% มีค่าเพิ่มขึ้น 6.33% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 32.1% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

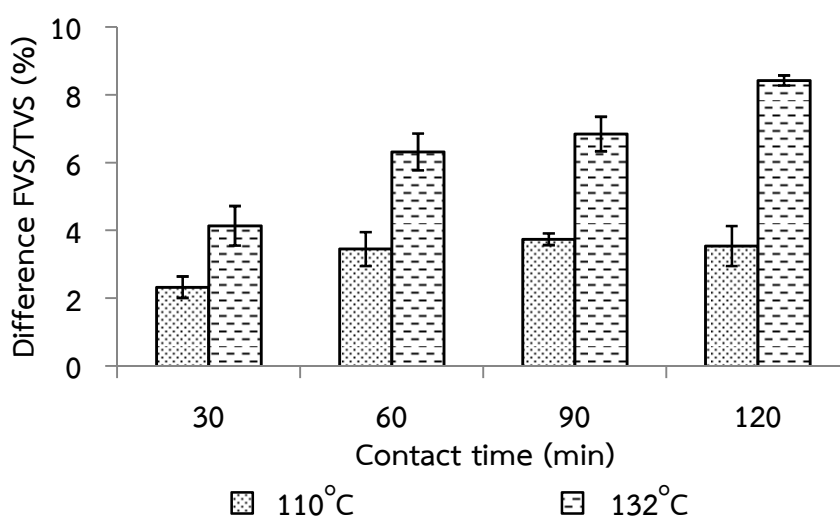


รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS/TS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C

2) การละลายของของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids solubilization)

การละลายของของแข็งระเหยง่ายจากกากตะกอนดีแคแเตอร์ โดยทำการเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้เป็นค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้น (Difference FVS/TVS) จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง 110°C และ 132°C พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C สามารถเพิ่มค่า Difference FVS/TVS ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่นาทีที่ 30 จนถึงนาทีที่ 60 จากนั้นค่า Difference FVS/TVS มีค่าคงที่ในนาทีที่ 60 ไปจนถึงนาทีที่ 120 แต่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C พบว่า ค่า Difference FVS/TVS เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่นาทีที่ 30 ไปจนถึงนาทีที่ 120 ดังรูปที่ 3-5 โดยเมื่อพิจารณาค่า FVS/TVS ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 110°C และ 132°C มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยความร้อนสูง (110°C และ 132°C) สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งระเหยง่ายได้

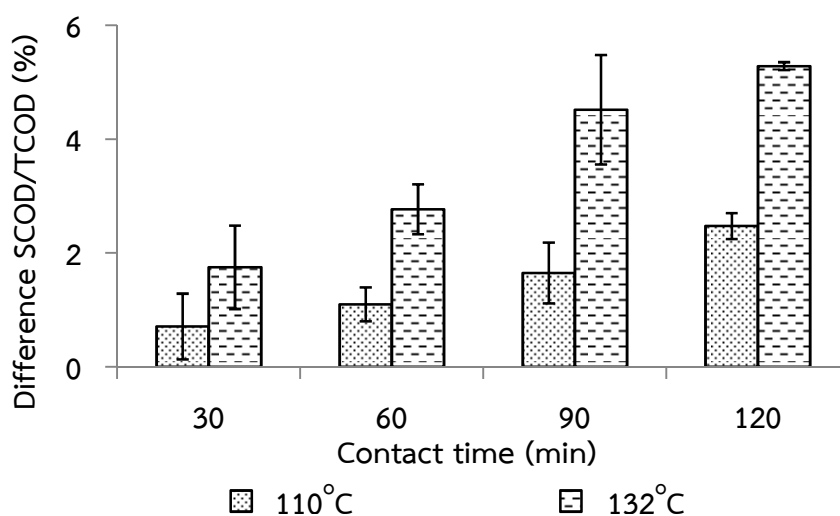
จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C พบว่า ค่าการละลายสูงสุดของของแข็งระเหยง่ายอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ที่อุณหภูมิ 132°C โดยมีค่า FVS/TVS เท่ากับ 25.0% โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 8.43% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 50.8% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Mottet et al. (2009) ซึ่งทำการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110°C ถึง 220°C สำหรับตะกอนจากระบบตะกอนเร่งสามารถเพิ่มการละลายของ VS เพิ่มขึ้นได้ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.9-24.0% ซึ่งจะทำให้สารอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่เปลี่ยนไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ( $< 0.45 \mu\text{m}$ ) จากงานทดลองครั้งนี้เห็นได้ว่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายมีค่าสูงกว่าการละลายของของแข็งเล็กน้อยเหมือนกับการทดลองบำบัดด้วยความร้อนต่ำ



รูปที่ 3-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C

### 3) การละลายของซีโอดี (COD solubilization)

การละลายของซีโอดี ทำได้โดยเปรียบเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน จะได้ค่าการละลายของซีโอดีที่เพิ่มขึ้น (Difference SCOD/TCOD) จากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง 110°C และ 132°C พบว่าสามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้เพิ่มตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่เวลาที่ 30 ไปจนถึงเวลาที่ 120 โดยมีค่า Difference SCOD/TCOD เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ตั้งแต่เวลาที่ 30 ไปจนถึงเวลาที่ 120 ดังรูปที่ 3-6 เมื่อพิจารณาค่า SCOD/TCOD ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 110°C และ 132°C มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มค่าการละลายของซีโอดีได้ แต่เมื่อพิจารณาค่า Difference SCOD/TCOD ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัด 110°C ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} > 0.05$ ) กล่าวคือทุกระยะเวลาที่ทำการศึกษาไม่สามารถเพิ่มค่าการละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการละลายของของแข็ง และของแข็งระเหยง่าย สำหรับที่อุณหภูมิ 132°C พบว่า มีค่า Difference SCOD/TCOD แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) สามารถเพิ่มค่าการละลายของซีโอดีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C

ดังนั้นจากการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110°C และ 132°C พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการละลายสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ที่อุณหภูมิ 132°C โดยมีค่า SCOD/TCOD เท่ากับ 20.9% โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 5.28% จากกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน คิดเป็น 33.6% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน โดยมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ozkan et al. (2011) ทำการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนของ Beet-pulp ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 30 นาที สามารถเพิ่มอัตราการละลายของซีโอดีในรูป SCOD/TCOD ได้จาก 11.8% (Control) ไปเป็น 16.6%

โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 4.8% จากชุดควบคุม และมีค่าใกล้เคียงกับงานของ Mottet et al. (2009) ซึ่งได้ทำการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C ถึง 220°C ในตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง สามารถเพิ่มการละลายของซีโอไซด์ได้ 3.8-27.0% โดยผลการศึกษาของ Bougrier et al. (2008) ได้รายงานเพิ่มเติมว่า การละลายของซีโอไซด์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัด โดยการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130°C สามารถเพิ่มการละลายของคาร์โบไฮเดรตได้สูงกว่าโปรตีน แต่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 170°C พบว่า โปรตีนสามารถละลายได้มากกว่าพวกคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตละลาย (Soluble carbohydrate) สามารถทำปฏิกิริยากับสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตด้วยกันเกิดเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นมาอีกครั้ง เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “Burnt sugar” และถ้าคาร์โบไฮเดรตละลายทำปฏิกิริยากับสารจำพวกโปรตีนจะเกิดสารที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้ง เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “Maillard reaction”

ที่อุณหภูมิในการบำบัด 110°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงการฆ่าเชื้อ (sterilization) สามารถทำให้เซลล์จุลินทรีย์เกิดการสลายตัวได้ จากผลการศึกษาการละลายของของแข็ง การละลายของของแข็งระเหยง่าย และการละลายของซีโอไซด์พบว่า ทุกระยะเวลาในการศึกษาสามารถเพิ่มค่าการละลายได้ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการละลายที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที อาจทำให้เกิดการสลายเซลล์ของเซลล์จุลินทรีย์ได้หมด ดังนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลให้เกิดการละลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยได้มีการรายงานไว้ว่าการบำบัดด้วยความร้อนทั่วไป (Conventional Heating: CH) สามารถทำให้เกิดการรั่วไหลของ Intracellular biopolymers และ Extracellular biopolymers ไปสู่ Liquid phase ได้ (Eskicioglu et al. 2006) สำหรับการศึกษาครั้งนี้ที่อุณหภูมิ 132°C พบว่า มีค่าการละลายได้เพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิ 110°C อาจเนื่องมาจากการละลายของคาร์โบไฮเดรต หรือสารจำพวกกลีโคแซคคาไรด์ เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ละลายได้เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการสลายเซลล์ของจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้ค่าการละลายของสารอินทรีย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น

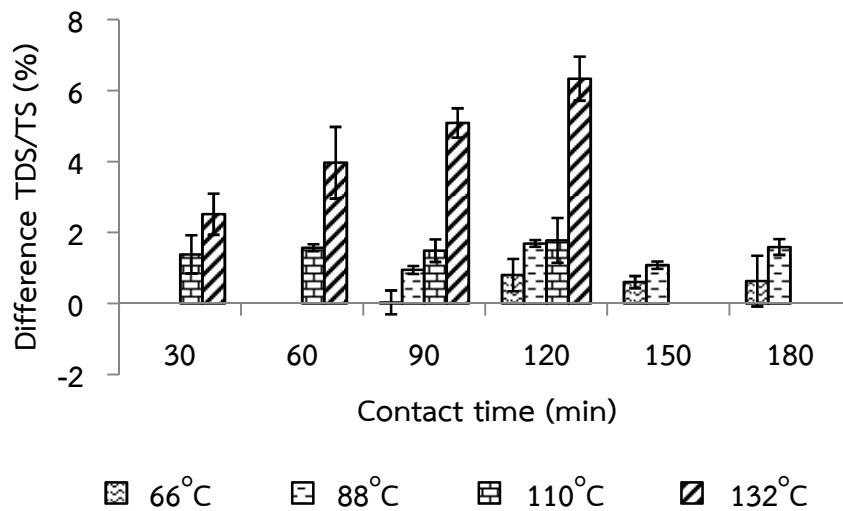
### 3.4 เปรียบเทียบผลการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

จากผลการทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ และสูง ซึ่งเป็นการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) เป็นอุปกรณ์ในการบำบัดเบื้องต้นซึ่งอาศัยไอน้ำในการถ่ายเทความร้อนให้กับกากตะกอนดีแคนเตอร์เพื่อทำการบำบัดเบื้องต้น เนื่องจากกากตะกอนดีแคนเตอร์เป็นของแข็งและมีความเป็นเนื้อเดียวกันต่ำ (Non homogeneous) ในการทดลองทุกๆ อุณหภูมิ จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนของแต่ละสภาวะเพื่อใช้เป็นชุดควบคุม และใช้ในการหาค่า Difference เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าต่างๆ

พิจารณาค่าการละลายของของแข็งจากค่า Difference TDS/TS ที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยความร้อนต่ำและสูง ได้ผลดังรูปที่ 3-7 โดยจะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาในการบำบัดเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่า Difference TDS/TS มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

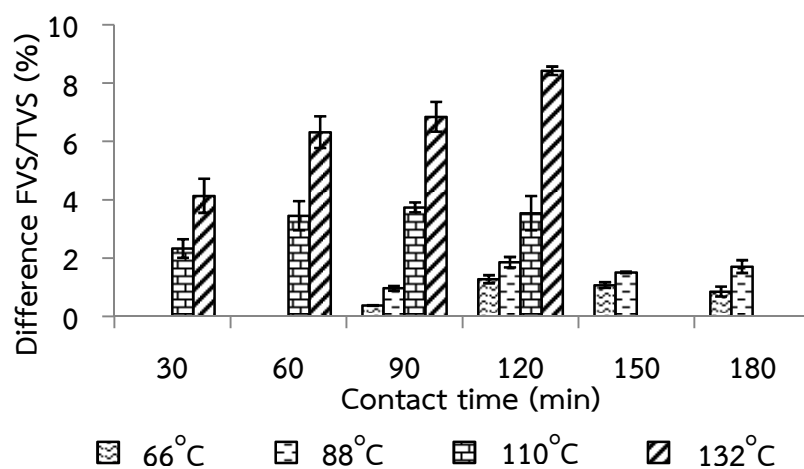
พิจารณาค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายจากค่า Difference FVS/TVS ที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยความร้อนต่ำและสูง ได้ผลดังรูปที่ 3-8 โดยจะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาในการ

บำบัดเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่า Difference FVS/TVS มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการละลายของของแข็ง



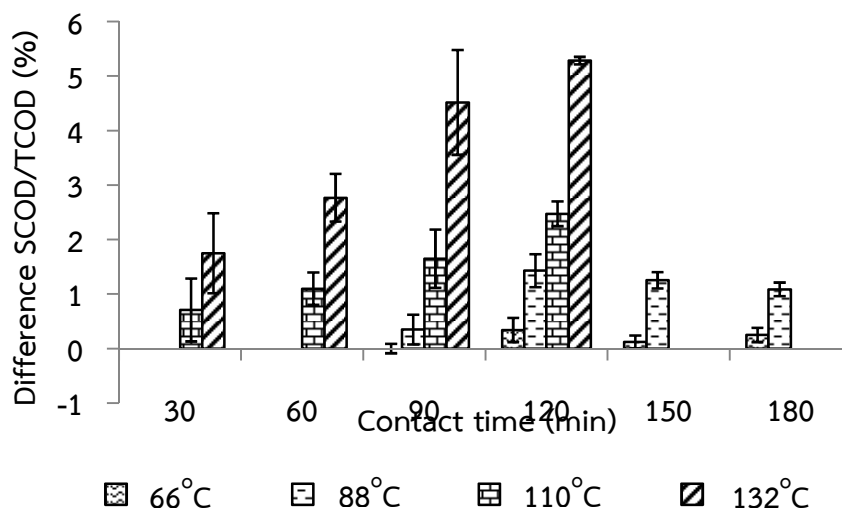
รูปที่ 3-7 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)

พิจารณาค่าการละลายของซีโอดีจากค่า Difference SCOD/TCOD ที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยความร้อนต่ำและสูง ได้ผลดังรูปที่ 3-9 พบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัดเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่า Difference SCOD/TCOD มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valo et al. (2004) ที่พบว่า การละลายของ WAS ขึ้นกับอุณหภูมิในการบำบัดด้วยความร้อน โดยพบว่าค่า SCOD มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25%, 44% และ 60% จากการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130°C, 150°C และ 170°C เป็นระยะเวลา 15 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 3-8 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)

การศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อพบว่า ค่าการละลายของสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดอยู่ที่สภาวะในการบำบัดด้วยอุณหภูมิ 132°C ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที



รูปที่ 3-9 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)

### 3.5 การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ด้วยการใส่เตาอบไมโครเวฟที่ใช้กันในครัวเรือน ของบริษัท LG รุ่น MS2339H มีความถี่คงที่ 2.45 GHz สามารถปรับระดับกำลังไฟฟ้าได้ 5 ระดับคือ 160, 320, 480, 640 และ 800 W ในการทดลองครั้งนี้ใช้ภาชนะในการบรรจุกากตะกอนดีแคนเตอร์เพื่อใช้กับเตาไมโครเวฟเป็นขวดแก้ว (Schott duran) มีขนาด 250 ml ฝาเกลียวสามารถทนอุณหภูมิได้ 140°C เมื่อทำการทดสอบการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าขวดแก้วสามารถทนความร้อนและแรงดันได้ที่สภาวะกำลังไฟฟ้า 800 W เป็นเวลา 7 นาที โดยมีปริมาตรรวมของของเหลวในเตาไมโครเวฟเท่ากับ 200 ml ซึ่งพบว่า ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของของเหลวที่ใส่ในเตาไมโครเวฟ ดังนั้นเมื่อคำนวณในรูปของพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาตรจะได้เท่ากับ 1.68 kJ/ml

ในการทดลองใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g เติมน้ำกลั่นปริมาตร 40 ml เนื่องจากค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟแปรผันตามปริมาตรของของเหลว ดังนั้นค่าพลังงานที่ใช้เท่ากับ 67.2 kJ คิดเป็นระยะเวลาในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 W ได้เท่ากับ 1.24 นาที ปรับให้เป็น 1.30 นาที ซึ่งคิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 72.0 kJ นำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาระยะเวลาสูงสุดที่ กำลังไฟฟ้าต่างๆ (160, 320, 480 และ 640 W) ได้ระยะเวลาในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังตารางที่ 3-7 โดยมีผลกระทบต่อ การละลายของสารอินทรีย์ดังต่อไปนี้



ตารางที่ 3-7 ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ

Power (W)	Contact time (min)	Energy (kJ)
160	2.00, 4.00, 6.00 และ 8.00	19.2, 38.4, 57.6 และ 76.8
320	1.00, 2.00, 3.00 และ 4.00	19.2, 38.4, 57.6 และ 76.8
480	1.00, 1.30, 2.00 และ 2.30	28.8, 43.2, 57.6 และ 72.0
640	0.30, 1.00, 1.30 และ 2.00	19.2, 38.4, 57.6 และ 76.8
800	0.30, 1.00 และ 1.30	24.0, 48.0 และ 72.0

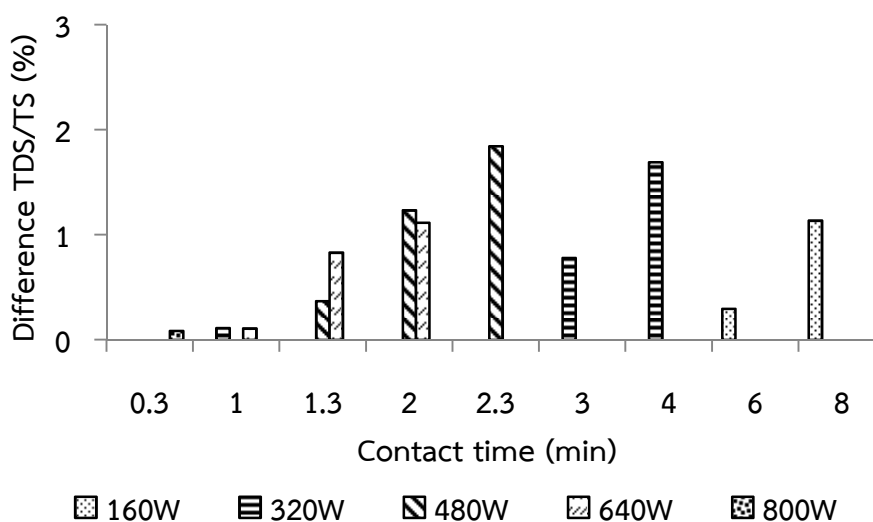
1) การละลายของของแข็ง (Solids solubilization)

พิจารณาค่าการละลายของของแข็งจากค่า Difference TDS/TS ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลดังรูปที่ 3-10 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่า Difference TDS/TS มีค่าเพิ่มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อทำการทดสอบค่า TDS/TS ทางสถิติโดยแยกตามกำลังไฟฟ้า (160, 320, 480 และ 640 W) พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ( $p\text{-value}<0.05$ ) แสดงให้เห็นว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W สามารถเพิ่มค่าการละลายของของแข็งได้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการศึกษานี้ของ Yu et al. (2010) ที่ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตะกอนจากระบบตะกอนเร่งหลังผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่า เกิดการรั่วไหลของสารจำพวก Biopolymer และอนุภาคขนาดเล็กไปสู่ Liquid phase ได้เพิ่มขึ้น ที่พลังงานในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ และระยะเวลาในการบำบัดสูงขึ้น สำหรับการศึกษานี้พบว่า มีเพียงกำลังไฟฟ้า 800 W เท่านั้นที่ไม่สามารถเพิ่มค่า Difference TDS/TS ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า TDS/TS โดยทดสอบค่าทางสถิติที่กำลังไฟฟ้า 800 W พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ( $p\text{-value}>0.05$ )

แสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้ ในขณะที่ระยะเวลาในการบำบัดเท่ากันเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่า มีแนวโน้มในการเพิ่มค่าการละลายของของแข็งเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ก็เพราะว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้า และการเพิ่มระยะเวลานั้นส่งผลให้เกิดอุณหภูมิในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง ดังผลการศึกษานี้ของ Jackowiak et al. (2011) ที่ได้สรุปไว้ว่า ประสิทธิภาพของการละลายของ TS, VS และ COD มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการบำบัดที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีการใช้พลังงานอยู่ที่ 72.0 kJ และ 76.8 kJ ได้ผลดังรูปที่ 3-11 พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า TDS/TS เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W มีค่าใกล้เคียงกัน มีเพียงที่กำลังไฟฟ้า 800 W เท่านั้น ที่มีค่าออกนอกกลุ่มข้อมูล และเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value}<0.05$ ) ทำให้

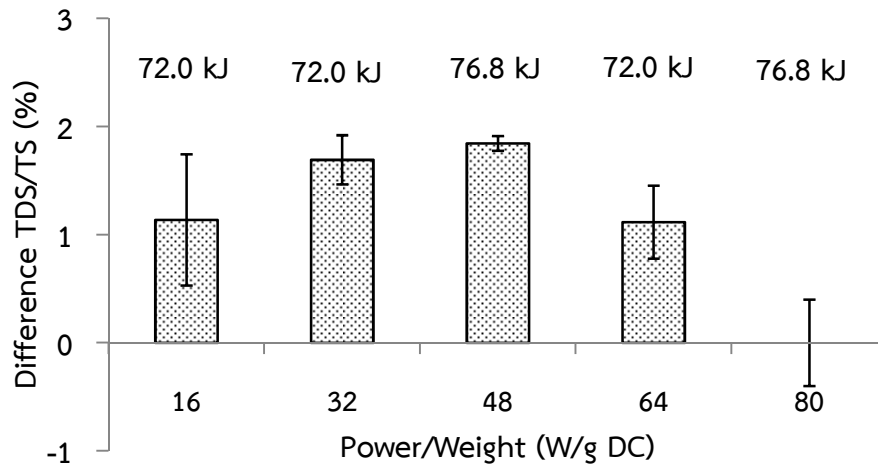
ทราบว่าที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้าจากการศึกษานี้สามารถเพิ่มการละลายของของแข็งได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่กำลังไฟฟ้า 800 W ที่ไม่สามารถเพิ่มค่าการละลายของของแข็งได้



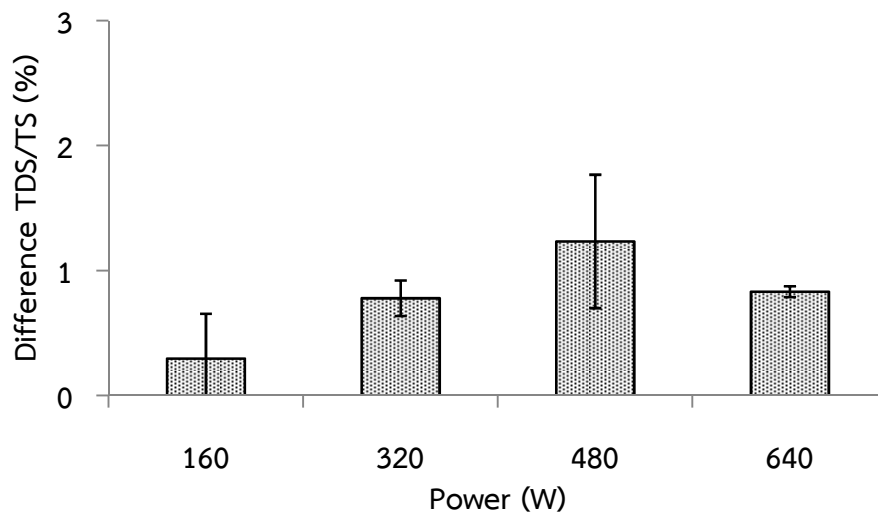
รูปที่ 3-10 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

เมื่อพิจารณาค่าการใช้พลังงานในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เท่ากันคือ 57.6 kJ ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W ได้ผลดังรูปที่ 3-12 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน แต่ใช้พลังงานในการบำบัดเท่ากัน ค่าการละลายของของแข็งโดยพิจารณาจากค่า Difference TDS/TS มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ดังนั้นที่ค่าพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดเท่ากัน (อุณหภูมิในการบำบัดเท่ากัน) ค่าการละลายของของแข็งจึงไม่แตกต่างกัน แต่จะพบแนวโน้มที่ลักษณะของการละลายของแข็งเพิ่มขึ้นตั้งแต่กำลังที่ 160 W ไปจนถึง 480 W จากนั้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปจนถึง 800 W กลับพบว่าค่าการละลายของของแข็งมีค่าลดลง ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้มีค่าเท่ากันแต่จะแตกต่างกันในเรื่องของอัตราการให้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา แสดงให้เห็นว่าค่าการละลายของของแข็งจะมีค่าสูงสุดที่อัตราการให้พลังงานจุดหนึ่ง ในการศึกษาพบว่าค่าอัตราการให้พลังงาน 480 W (480 J/S) มีค่าการละลายสูงสุด (ที่พลังงานในการบำบัดเท่ากัน)

โดยค่าการละลายของของแข็งสูงสุดในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่สภาวะในการบำบัดด้วยกำลังไฟฟ้า 480 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2.30 นาที มีค่า TDS/TS เพิ่มขึ้น 1.85% หรือเท่ากับ 9.09% เมื่อเทียบกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-11 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า

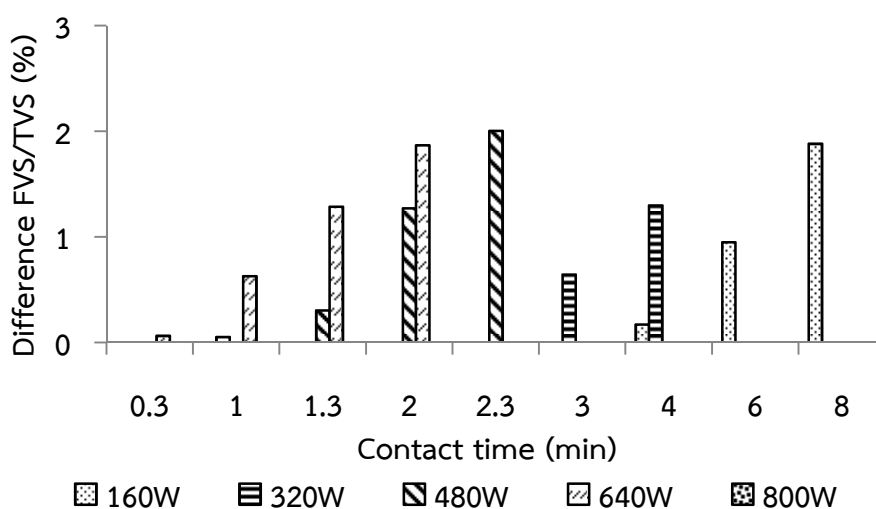


รูปที่ 3-12 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า

2) การละลายของของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids solubilization)

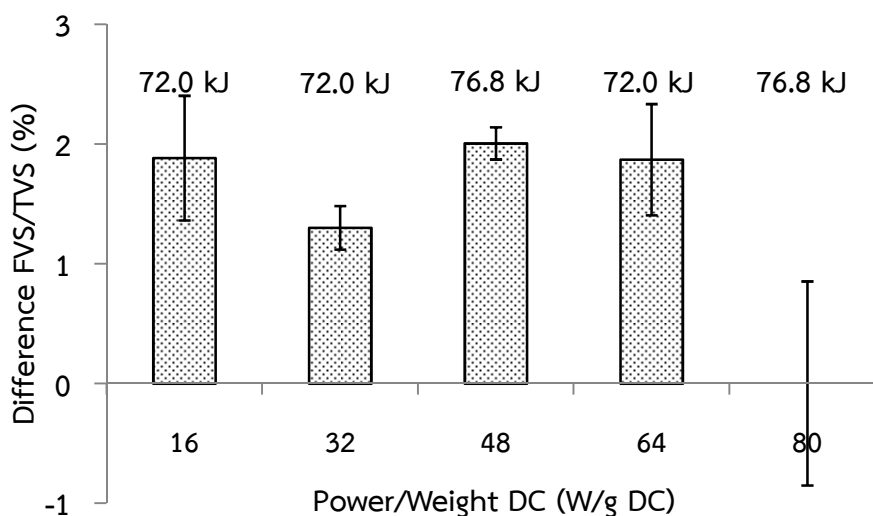
พิจารณาค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายจากค่า Difference FVS/TVS ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลดังรูปที่ 3-13 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่า Difference FVS/TVS มีค่าเพิ่มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่า Difference TDS/TS โดยเมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติของค่า FVS/TVS แยกตามกำลังไฟฟ้า พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับภาคก่อนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W สามารถเพิ่มค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายได้เพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการบำบัด

ที่เพิ่มขึ้น รวมไปถึงการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาของ Beszédes et al. (2011) พบว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเปลี่ยนของแข็งให้ไปอยู่ในรูปของแข็งระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยค่า VS/TS ที่ระดับ 0.5 W/g ระยะเวลาในการบำบัด 10 นาที มีค่าเท่ากับ 16.90% เพิ่มเป็น 29.35% ที่ระดับ 5 W/g ระยะเวลาในการบำบัด 10 นาที และจากผลการศึกษาของ Yu et al. (2010) พบว่า ความเข้มข้นของ Volatile Suspended Solid (VSS) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มพลังงาน และระยะเวลาในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำให้ค่าการละลายของ VSS ละลายได้เพิ่มขึ้น โดยพบว่า เมื่อทำการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 140 วินาที ค่า VSS มีค่าเท่ากับ 24.74%, 25.74% และ 29.60% ที่กำลังไฟฟ้า 500 W, 750 W และ 900 W สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่า มีเพียงกำลังไฟฟ้า 800 W เท่านั้นที่ไม่สามารถเพิ่มค่า Difference FVS/TVS ได้ เมื่อทดสอบค่าทางสถิติที่กำลังไฟฟ้า 800 W พบว่า ค่า FVS/TVS ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ( $p\text{-value}>0.05$ )



รูปที่ 3-13 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

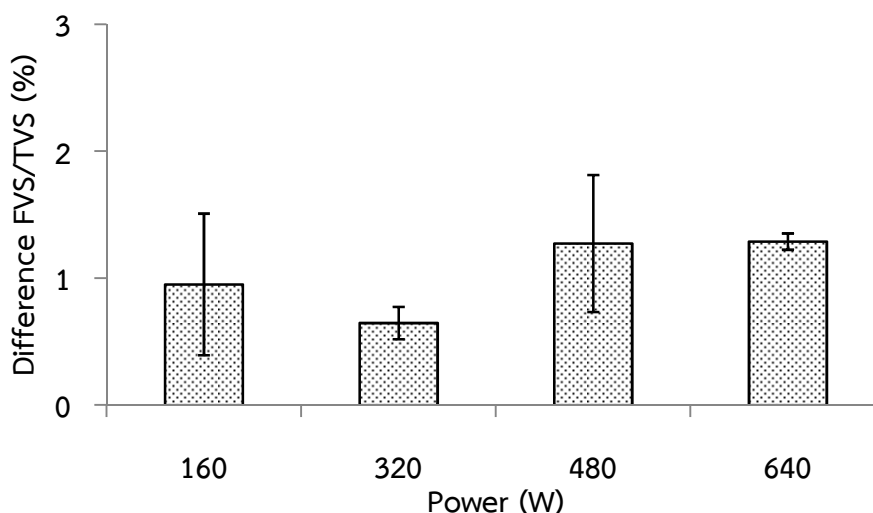
เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีการใช้พลังงานอยู่ที่ 72.0 kJ และ 76.8 kJ ได้ผลดังรูปที่ 3-14 พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า FVS/TVS เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟของกำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W มีค่าใกล้เคียงกัน มีเพียงที่กำลังไฟฟ้า 800 W เท่านั้นที่มีค่าออกนอกกลุ่มข้อมูล และเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value}<0.05$ ) ทำให้ทราบว่าที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้าจากการศึกษานี้สามารถเพิ่มการละลายของแข็งระเหยง่ายได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่กำลังไฟฟ้า 800 W ที่ไม่สามารถเพิ่มค่าการละลายของแข็งได้



รูปที่ 3-14 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference FVS/TVS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายที่ใช้ค่าพลังงานในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟเท่ากันในแต่ละกำลังไฟฟ้า (57.6 kJ) ได้ผลดังรูปที่ 3-15 ยกเว้นที่ 800 W ซึ่งไม่สามารถเพิ่มการละลายของ FVS/TVS ได้ พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W มีค่า Difference FVS/TVS เท่ากัน โดยเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) แต่การละลายของของแข็งระเหยง่ายกลับไม่พบแนวโน้มเช่นเดียวกับการละลายของของแข็งที่ค่าพลังงานในการบำบัดเท่ากัน (แนวโน้มไม่ชัดเจน) อาจเนื่องมาจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูงจะก่อให้เกิดการสูญเสียของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ ซึ่งการสูญเสียสารอินทรีย์ระเหยง่ายแตกต่างกันขึ้นกับภาวะแวดล้อมต่างๆ จากผลการศึกษาของ Eskicioglu et al. (2007a) พบว่า การบำบัดด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูง ( $96^{\circ}\text{C}$ ) จะเกิดการสูญเสีย Volatile organic ขึ้นได้ ในขั้นตอนที่นำภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากเตาไมโครเวฟมาเปิดฝาเพื่อกวนผสม ทำการวัดอุณหภูมิ

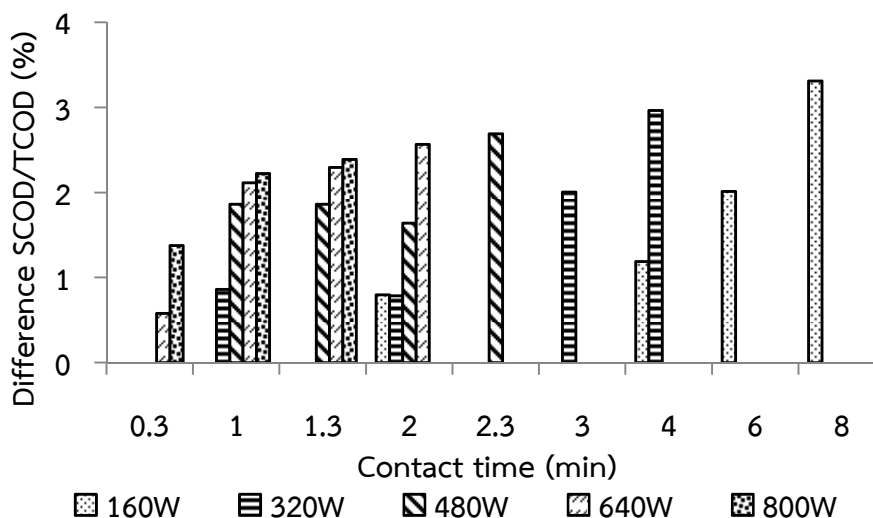
โดยค่าการละลายของของแข็งระเหยง่ายสูงสุดในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่สถานะในการบำบัดด้วยกำลังไฟฟ้า 480 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2.30 นาที มีค่า FVS/TVS เพิ่มขึ้น 2.00% หรือเท่ากับ 12.2% เมื่อเทียบกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-15 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference TDS/TS จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า

### 3) การละลายของซีโอดี (COD solubilization)

พิจารณาค่าการละลายของซีโอดีจากค่า Difference SCOD/TCOD ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลดังรูปที่ 3-16 พบว่า ทุกกำลังไฟฟ้า (160, 320, 480, 640 และ 800 W) เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่า Difference SCOD/TCOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาของ Beszédes et al. (2011) ในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดสามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ โดยเกิดการ hydrolysis ของสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และเกิดการแตกของผนังเซลล์จุลินทรีย์ โดยได้มีการรายงานเพิ่มเติมว่า แนวโน้มของค่า BOD<sub>5</sub>/TCOD นั้นเหมือนกับค่า SCOD/TCOD ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่า BOD<sub>5</sub>/TCOD มีค่าเท่ากับ 27.41% ที่ระดับ 0.5 W/g เพิ่มขึ้นไปเป็น 53.13% ที่ระดับ 5 W/g ที่ระยะเวลาในการบำบัดเท่ากัน (10 นาที) และที่ระดับ 0.5 W/g ค่า BOD<sub>5</sub>/TCOD มีค่าเท่ากับ 27.41%, 35.56%, 44.41% และ 46.23% โดยมีระยะเวลาในการบำบัด 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ สำหรับการทดลองนี้เมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติของค่า SCOD/TCOD แยกตามกำลังไฟฟ้า พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (p-value<0.05) มีเพียงกำลังไฟฟ้า 800 W เท่านั้นที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value>0.05) จากการศึกษาทำให้เห็นว่าที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W สามารถเพิ่มค่า SCOD/TCOD หรือเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ และการละลายของซีโอดีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น แต่ที่กำลังไฟฟ้า 800 W ไม่สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้

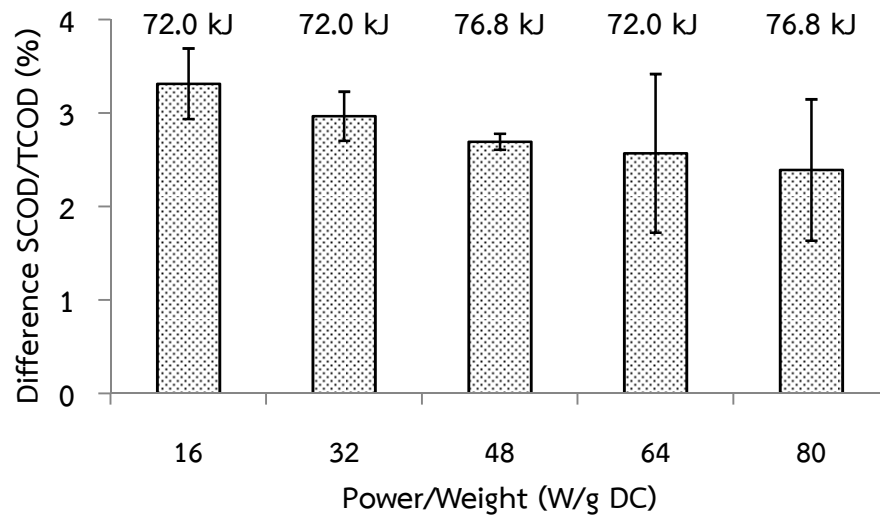


รูปที่ 3-16 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

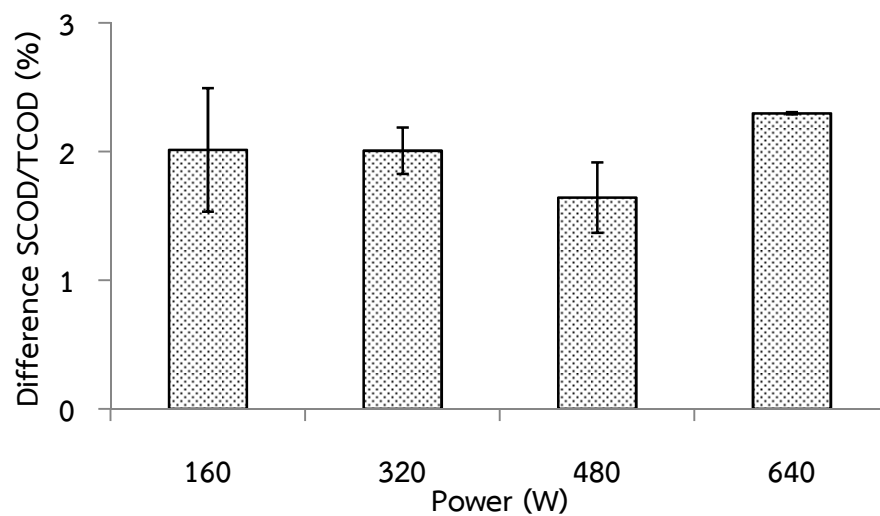
เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีการใช้พลังงานอยู่ที่ 72.0 kJ และ 76.8 kJ ได้ผลดังรูปที่ 3-17 พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟของกำลังไฟฟ้า 160, 320, 480, 640 และ 800 W มีแนวโน้มลดลงตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาของ Eskicioglu et al. (2007) พบว่า ค่า SCOD/TCOD มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนมีค่าต่ำลง (Slower temperature ramp) ที่อุณหภูมิในการบำบัดเท่ากัน โดยได้ทำการศึกษาบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 96°C และได้สรุปไว้ว่า อัตราการให้อุณหภูมิต่ำ (1.2°C/min) มีค่า SCOD/TCOD สูงกว่าที่อัตราการให้อุณหภูมิสูง (18.7°C/min) โดยมีค่า SCOD/TCOD เท่ากับ 22±1% และ 17±1% ตามลำดับ สำหรับตะกอน Thickened WAS สำหรับอัตราการให้อุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยที่กำลังไฟฟ้าสูงจะมีอัตราการให้ความร้อนสูงกว่าที่กำลังไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นการละลายของ COD มีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาค่าการละลายของซีโอดีที่ค่าพลังงานที่ใช้เท่ากันในแต่ละกำลังไฟฟ้า (57.6 kJ) ได้ผลดังรูปที่ 3-18 ยกเว้นที่ 800 W ซึ่งไม่สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดีได้ พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160, 320, 480 และ 640 W มีค่า Difference SCOD/TCOD ได้ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value>0.05) จากผลการศึกษาของ Jackowiak et al. (2011) พบว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟค่าการละลายของ TS, VS และ COD มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบำบัดที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 120-180°C แต่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 100-120°C พบว่าค่า SCOD ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ และยังได้รายงานไว้อีกว่าเกิดการสูญเสียสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic) ที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 96°C โดยค่า SCOD/TCOD มีค่าเท่ากับ 6±0.3% ในชุด Control เพิ่มขึ้นไปเป็น 14±1.1% และ 20±2% เมื่อทำการบำบัดด้วยคลื่น

ไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 50-75°C หลังจากนั้นค่า SCOD/TCOD มีค่าลดลงเหลือ  $18 \pm 0.4\%$  เมื่อบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 96°C (Eskicioglu et al. 2007)



รูปที่ 3-17 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ระยะเวลาสูงสุดของแต่ละกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3-18 การเปลี่ยนแปลงค่า Difference SCOD/TCOD จากการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) โดยใช้พลังงานในการบำบัด 57.6 kJ ของแต่ละกำลังไฟฟ้า

ค่าการละลายของซีโอดีสูงสุดในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่สภาวะในการบำบัดด้วยกำลังไฟฟ้า 160 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8.00 นาที มีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 3.30% หรือเท่ากับ 20.4% เมื่อเทียบกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



จากการศึกษาการบำบัดด้วยความคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนพบว่า การบำบัดที่กำลังไฟฟ้า 160W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8.00 นาที สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์โดยมีค่า SCOD/TCOD มีค่าเท่ากับ 19.5% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3.3% หรือเท่ากับ 20.4% เมื่อเทียบกับภาคตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับการละลายของของแข็งพบว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มการละลายของของแข็ง (TS) และของแข็งระเหยง่าย (TVS) ได้ สำหรับค่า TDS/TS และ FVS/TVS สูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 480W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2.30 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 21.6% และ 18.4% ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 9.09% และ 12.2% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับภาคตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับการละลายของสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิคือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาในการบำบัด โดยที่กำลังไฟฟ้ามากและระยะเวลาในการบำบัดนานจะส่งผลให้อุณหภูมิในการบำบัดสูงขึ้น สำหรับอัตราการให้พลังงาน หรืออัตราการให้ความร้อน (Temperature ramp) พบว่าที่ค่าพลังงานในการบำบัดเท่ากัน อัตราการให้พลังงานสูงจะส่งผลให้การละลายของสารอินทรีย์ลดลง

### 3.6 เปรียบเทียบการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ กับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

จากผลการทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ และสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ พบว่า ที่สภาวะการบำบัดด้วยอุณหภูมิ 132°C เป็นระยะเวลา 120 นาที สามารถเพิ่มการละลายได้มากที่สุด โดยสามารถเพิ่มการละลายของซีโอดี (SCOD/TCOD) ได้ 33.7% และเพิ่มการละลายของของแข็งละลาย (TDS/TS) ได้ 32.2% และเพิ่มการละลายของของแข็งละลายที่ระเหยง่าย (FVS/TVS) ได้ 50.9%

จากผลการทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่า ที่สภาวะการบำบัดด้วยกำลังไฟฟ้า 160 W เป็นระยะเวลา 8.00 นาที สามารถเพิ่มการละลายของซีโอดี (SCOD/TCOD) ได้สูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้น 20.4% สำหรับค่าการละลายของของแข็งละลาย (TDS/TS) มีค่าเพิ่มขึ้น 5.02% และเพิ่มการละลายของของแข็งละลายที่ระเหยง่าย (FVS/TVS) ได้เท่ากับ 10.6% ซึ่งค่า TDS/TS และ FVS/TVS ไม่ใช่ค่าสูงสุดที่เพิ่มได้ของการทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ แต่พบว่า ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสูงสุด ซึ่งอยู่ที่สภาวะกำลังไฟฟ้า 480 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2.30 นาที

สำหรับการละลายของสารอินทรีย์จากภาคตะกอนดีแคนเตอร์นั้น ทั้งนี้อาจเกิดได้จาก 2 กรณีคือ เกิดจากการเพิ่มการละลายของสารจำพวกลิกโนเซลลูโลส ที่เป็นองค์ประกอบหลักของของแข็งในการทดลองครั้งนี้รวมไปถึงสารจำพวกโปรตีน และไขมัน โดยจากการศึกษาของ Hendriks and Zeeman (2009) ได้รายงานไว้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น 150°C จนถึง 180°C สารจำพวก Lignocellulose เริ่มเกิดการละลาย โดย Hemicellulose และสารที่มีขนาดเล็กจะเป็นพวกแรกที่ละลายออกมา และอีกประการหนึ่งของการละลายของสารอินทรีย์อาจเกิดจากการสลายเซลล์ของเซลล์จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในภาคตะกอนดีแคนเตอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยใน

ของแข็ง จากผลการศึกษาของ Banik et al. (2003) พบว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 45°C, 47°C และ 50°C สามารถเพิ่มอัตราการตายของเซลล์ *Escherichia coli* ได้มากกว่าการฆ่าเชื้อโดยทั่วไปที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นถ้าอุณหภูมิในการบำบัดต่ำ การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มการละลายได้ดีกว่าในกรณีที่มีพวกจุลชีพอาศัยอยู่

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าการละลายของสารอินทรีย์จะขึ้นกับอุณหภูมิในการบำบัดทั้งวิธีที่ใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และวิธีที่ใช้เตาไมโครเวฟ ดังจะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อซึ่งมีอุณหภูมิในการศึกษาสูงถึง 132°C สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ดีกว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีอุณหภูมิในการบำบัดต่ำกว่า (ประมาณ 110°C)

### 3.7 การหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบทีละเท

การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนเทียบกับกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยใช้การหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบทีละเท (Batch) ทำการหมักที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จากผลการศึกษาของ เพ็ญศิริ (2551) ในการหมักด้วยถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกและถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก ให้ค่าปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 507 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>remove</sub> มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับ 51.65% สำหรับปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก ส่วนถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกค่าการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 459 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>remove</sub> มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับ 52.38% ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหมักแบบไร้ออกซิเจน ต่อจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ กับการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยเลือกสภาวะที่ดีที่สุดในการเพิ่มการละลายของซีโอดีเป็นหลัก ในการเลือกตัวอย่างมาศึกษาต่อด้วยการหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบทีละเท

ในการทดลองการหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบทีละเท ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกเป็นชุดการทดลองที่เลือกตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ส่วนอีกชุดการทดลองเป็นชุดการทดลองที่เลือกตัวอย่างจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยแต่ละชุดการทดลองได้มีการทำแบลนด์ (Blank) ด้วยกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนหรือคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดังนี้

- 1) ผลการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

ในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ซึ่งมีค่า SCOD/TCOD สูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C เป็นระยะเวลา 120 นาที จึงได้เลือกตัวอย่างกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C ที่ระยะเวลาในการบำบัด 30, 60, 90 และ 120 นาที โดยใช้ชื่อตัวอย่างเป็น S4T1, S4T2, S4T3 และ S4T4 ตามลำดับ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ และระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และได้เลือกตัวอย่างเพิ่มอีก 3 ตัวอย่างจากการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่เหลือ คือ 66°C, 88°C และ 110°C โดยระยะเวลาในการบำบัดของแต่ละอุณหภูมิคือ 90, 90 และ 120 นาที โดยใช้ชื่อตัวอย่าง

เป็น S1T1, S2T1 และ S3T4 ตามลำดับ ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีทั้งก่อนเริ่มการหมักและสิ้นสุดการหมักแบบไร้ออกซิเจน ได้ผลดังตารางที่ 3-8 และ 3-9 จากนั้นนำมาคำนวณหาคุณสมบัติที่ถูกบำบัด และหาประสิทธิภาพที่บำบัดได้ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยมีผลดังตารางที่ 3-10 และ 3-11 ตามลำดับ

**ตารางที่ 3-8** คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (วันแรกของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)

Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	TS (mg/l)	TDS (mg/l)	TVS (mg/l)	FVS (mg/l)	PCOD (mg/l)
Control	23,659	3,151	26,840	9,170	17,565	3,650	20,508
S1T1	24,384	3,132	29,600	9,120	19,505	3,580	21,252
S2T1	24,762	3,028	30,665	9,070	20,245	3,530	21,734
S3T4	26,498	3,358	32,565	9,410	21,685	3,840	23,140
S4T1	26,877	3,434	32,015	9,340	21,205	3,650	23,443
S4T2	26,498	3,566	32,285	9,620	21,345	3,990	22,932
S4T3	26,488	3,679	32,440	9,760	21,450	4,080	22,809
S4T4	26,120	3,726	32,150	9,840	21,185	4,140	22,394

**ตารางที่ 3-9** คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (วันสุดท้ายของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)

Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	TS (mg/l)	TDS (mg/l)	TVS (mg/l)	FVS (mg/l)	PCOD (mg/l)
Control	15,285	1,469	23,305	7,855	13,370	1,925	13,816
S1T1	16,931	1,486	25,245	7,970	14,735	2,035	15,445
S2T1	17,748	1,435	26,165	7,835	15,425	1,960	16,313
S3T4	18,503	1,446	26,760	7,950	16,080	2,100	17,057
S4T1	19,384	1,503	27,120	7,940	16,250	2,165	17,882
S4T2	19,487	1,514	26,845	8,030	15,980	2,235	17,973
S4T3	19,556	1,542	27,135	8,050	16,230	2,160	18,013
S4T4	19,487	1,554	26,995	8,060	16,265	2,275	17,933

ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติทางเคมีที่ถูกกำจัดโดยชุดหมักซึ่งใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

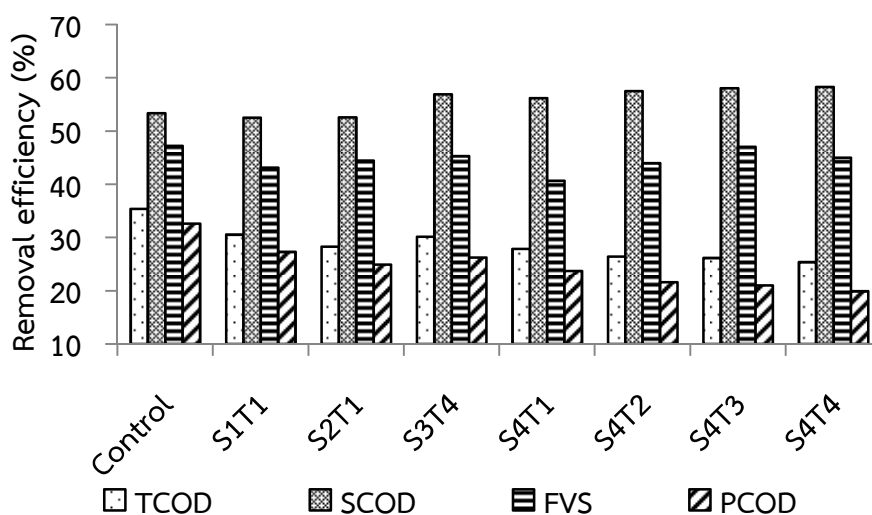
Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	TS (mg/l)	TDS (mg/l)	TVS (mg/l)	FVS (mg/l)	PCOD (mg/l)
Control	8,374	1,682	3,535	1,315	4,195	1,725	6,692
S1T1	7,453	1,646	4,355	1,150	4,770	1,545	5,807
S2T1	7,014	1,593	4,500	1,235	4,820	1,570	5,421
S3T4	7,995	1,912	5,805	1,460	5,605	1,740	6,083
S4T1	7,493	1,931	4,895	1,400	4,955	1,485	5,561
S4T2	7,011	2,052	5,440	1,590	5,365	1,755	4,959
S4T3	6,933	2,137	5,305	1,710	5,220	1,920	4,796
S4T4	6,633	2,173	5,155	1,780	4,920	1,865	4,460

ตารางที่ 3-11 ประสิทธิภาพการบำบัดของชุดหมักที่ใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

Sample	TCOD (%)	SCOD (%)	TS (%)	TDS (%)	TVS (%)	FVS (%)	PCOD (%)
Control	35.4	53.4	13.2	14.3	23.9	47.3	32.6
S1T1	30.6	52.6	14.7	12.6	24.5	43.2	27.3
S2T1	28.3	52.6	14.7	13.6	23.8	44.5	24.9
S3T4	30.2	56.9	17.8	15.5	25.8	45.3	26.3
S4T1	27.9	56.2	15.3	15.0	23.4	40.7	23.7
S4T2	26.5	57.5	16.8	16.5	25.1	44.0	21.6
S4T3	26.2	58.1	16.4	17.5	24.3	47.1	21.0
S4T4	25.4	58.3	16.0	18.1	23.2	45.0	19.9

จากตารางที่ 3-11 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการบำบัดด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD ลดลงต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 66°C, 88°C และ 110°C สำหรับที่อุณหภูมิ 132°C พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการบำบัดด้วยความร้อนก่อนนำมาทำการหมักแบบไร้ออกซิเจนมีส่วนทำให้เกิดการสลายเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในกากตะกอนดีแคแเตอร์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งได้ดีสำหรับที่อุณหภูมิในการบำบัดต่ำยังคงมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกากตะกอนดีแคแเตอร์ลงเหลืออยู่ ซึ่งทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD ที่อุณหภูมิสูงมีค่าต่ำกว่ากากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน หรือกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่ต่ำกว่า

132°C ดังรูปที่ 3-19 โดยได้มีการรายงานไว้ว่า การหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีการปรับสภาพให้เหมาะสมกับแหล่งอาหารสามารถให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ที่ไม่มีการปรับสภาพ (Eskicioglu et al. 2007b)

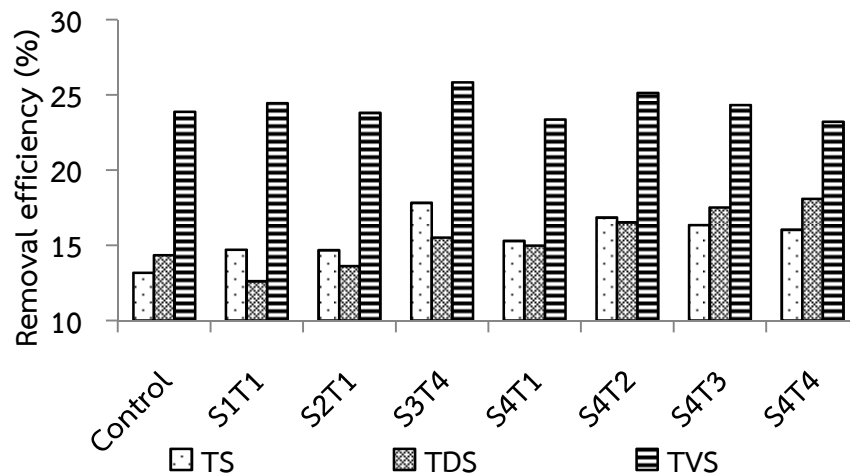


รูปที่ 3-19 ประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, PCOD และ FVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

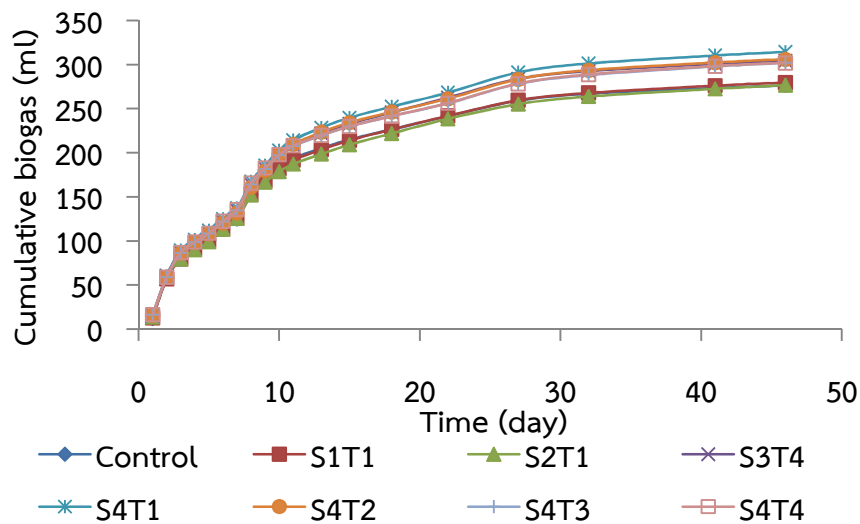
สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD พบว่า มีแนวโน้มที่แตกต่างกับ TCOD และ PCOD โดยจะเห็นได้ว่า การบำบัดกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD นั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อบำบัดกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ด้วยอุณหภูมิสูงที่ 110°C และ 132°C ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดที่อุณหภูมิ 132°C พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดให้นานขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 3-19 สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD เมื่ออุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น (>100°C) ระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากก่อนที่จะทำการหมัก ชุดการทดลองที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูงจะมีค่า SCOD เริ่มต้นสูงกว่าชุดการทดลองที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ จึงทำให้การย่อยสลาย SCOD เกิดได้มากขึ้นนั่นเอง

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TVS และ FVS นั้นพบว่า ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนในการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3-19 และ 3-20 สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด TDS พบว่า ที่อุณหภูมิในการบำบัดด้วยความร้อนต่ำ (ระยะเวลาในการบำบัด 90 นาที) มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ใกล้เคียงกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน สำหรับการบำบัดด้วยความร้อนสูง 110°C ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที และที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C ระยะเวลา ในการบำบัด 120 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัด TDS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาการบำบัดกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ด้วยความร้อน 132°C พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ

บำบัดเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัด TDS มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพในการบำบัด TDS มีแนวโน้มเช่นเดียวกับประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD สืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ TDS จากการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนก่อนทำการหมัก จึงทำให้มีค่า TDS เริ่มต้นสูง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงสูงตามไปด้วย



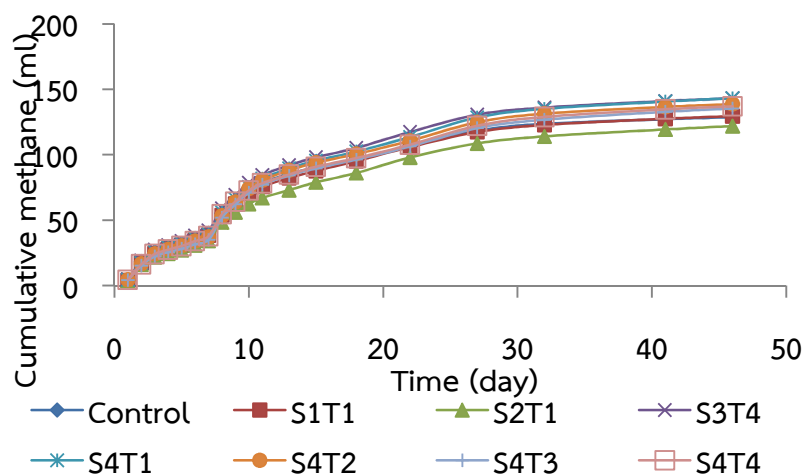
รูปที่ 3-20 ประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TDS และ TVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน



รูปที่ 3-21 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

จากการศึกษาการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับการทดลองบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูง คือที่อุณหภูมิในการบำบัดสูงขึ้น ระยะเวลาในการบำบัดด้วยความร้อนนานขึ้นสามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น

ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3-21 จะเห็นได้ว่าเป็นไปได้ว่าสามารถจำแนกกลุ่มก๊าซชีวภาพสะสมได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่เกิดก๊าซชีวภาพสะสมสูงจะประกอบไปด้วยตัวอย่าง S3T4, S4T1, S4T2, S4T3 และ S4T4 ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำการบำบัดด้วยความร้อนสูงทั้งสิ้น และการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมนั้นยังมีความสอดคล้องกับผลการศึกษการละลายของสารอินทรีย์ในการบำบัดด้วยความร้อนสูงอีกด้วย



รูปที่ 3-22 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

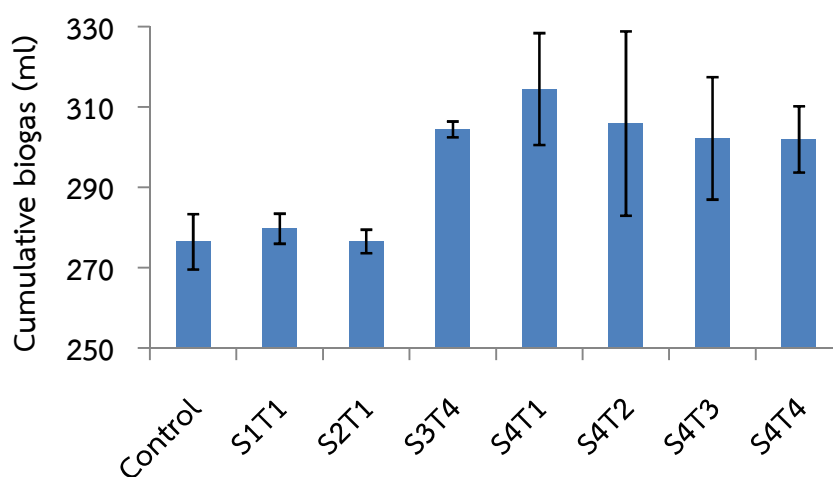
ตารางที่ 3-12 ปริมาณก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

Sample	Biogas (ml)	Methane (ml)	Methane* (%)	Methane yield (ml CH <sub>4</sub> /g COD <sub>Remove</sub> )
Seed	20.4	5.1	24.8	-
Control	276.4	128.8	46.6	246.3
S1T1	279.7	129.5	46.3	278.3
S2T1	276.5	121.9	44.1	277.7
S3T4	304.4	143.2	47.0	288.0
S4T1	314.5	143.3	45.6	307.5
S4T2	305.9	138.9	45.4	318.1
S4T3	302.2	135.5	44.8	313.5
S4T4	301.9	137.1	45.4	331.8

หมายเหตุ : \* คำนวณจากค่า (Methane/Biogas)x100

จากตารางที่ 3-12 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำ (S1T1 และ S2T1) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมไม่แตกต่างกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการ

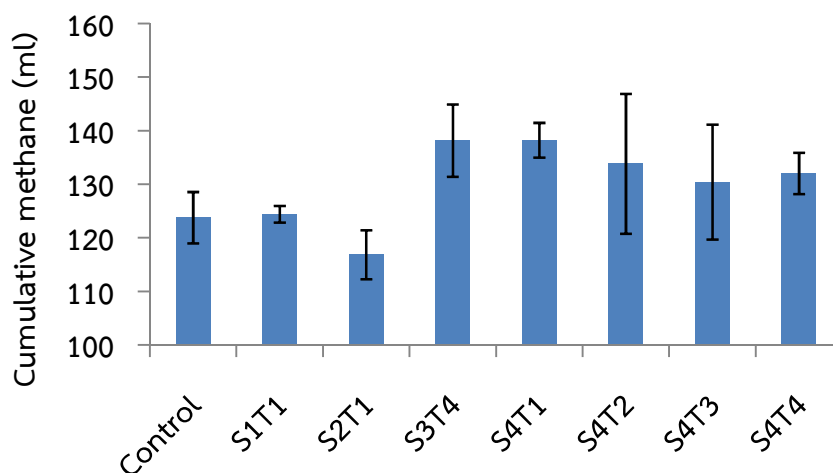
บำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อน สำหรับการบำบัดที่อุณหภูมิสูง พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 3-23 และเมื่อทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C ถึง 132°C มีค่าการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas production) ของกากตะกอนดีแคนเตอร์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-14% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน จากผลการศึกษาของ Bougrier et al. (2007) ซึ่งได้ศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนที่ 70°C หรือ 120°C สำหรับตะกอนจากระบบตะกอนเร่ง สามารถเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ 20-30% ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าการผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่างานของ Bougrier et al. (2007) เนื่องจากในงานศึกษานี้องค์ประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุหมักเป็นสารจำพวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งยากต่อการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ สำหรับก๊าซชีวภาพสะสมพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C ไม่มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณตัวอย่างที่ใช้มีปริมาณน้อยเกินไป 2 g/60 ml (3.33% W/V) ซึ่งค่าสารอินทรีย์ที่ละลายเพิ่มขึ้นมีไม่มากนักจึงไม่ส่งผลให้เห็นอย่างเด่นชัด



รูปที่ 3-23 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

สำหรับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมพบว่า การบำบัดที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไม่แตกต่างกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน สำหรับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนสูงพบว่า มีแนวโน้มในการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นได้ โดยกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยอุณหภูมิ 110°C ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที และที่อุณหภูมิ 132°C ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที มีค่าเท่ากัน (143 ml CH<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นค่าก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด ดังรูป 3-24 แต่เมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ยพบว่า ทุกตัวอย่างมีความสัดส่วนก๊าซมีเทนไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 44.1-47.0% และเมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ





รูปที่ 3-24 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

ค่า Methane yield จากตารางที่ 3-12 พบว่า การบำบัดด้วยความร้อนทั้งอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง เมื่อพิจารณาการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  และ  $132^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที (S3T4 และ S4T4) เมื่ออุณหภูมิในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่า Methane yield จะมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 288 และ 332 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{remove}}$  ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิในการบำบัด  $132^{\circ}\text{C}$  เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30 นาทีไปจนถึง 90 นาที ค่า Methane yield มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นค่า Methane yield จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในนาทีที่ 120

ค่า Methane yield สูงสุดอยู่ที่การบำบัดด้วยความร้อน  $132^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที โดยมีค่า Methane yield เท่ากับ 332 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{Remove}}$  ซึ่งคิดเป็น 84% จากค่าตามทฤษฎี (395 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{Remove}}$  อ้างอิงที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$ ) และมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม 85.5 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{Remove}}$  หรือเพิ่มขึ้น 35% จากชุดควบคุม

- 2) ผลการศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้เลือกตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สถานะที่ดีที่สุดคือ กำลังไฟฟ้า 160 W ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 8.00 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น และได้มีการเลือกตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการเกิดก๊าซชีวภาพจากกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป โดยได้เลือกตัวอย่างที่กำลังไฟฟ้า 160 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2.00, 4.00, 6.00 และ 8.00 นาที ใช้ชื่อตัวอย่างเป็น P1T1, P1T2, P1T3 และ P1T4 ตามลำดับ และได้เลือกตัวอย่างเพิ่มอีก 4 ตัวอย่างจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่เหลือ คือ 320, 480, 640 และ 800 W โดยระยะเวลาในการบำบัดของแต่ละอุณหภูมิคือ 4.00, 2.30, 2.00 และ 1.30 นาที โดยใช้ชื่อตัวอย่างเป็น P2T4, P3T4, P4T4 และ P5T3 ตามลำดับ ทำการทดลองด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจน และได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีทั้งก่อนเริ่มการหมักและหลังจากสิ้นสุดการหมัก ได้ผลดังตารางที่ 3-13

และ 3-14 จากนั้นนำมาคำนวณหาคุณสมบัติที่ถูกบำบัด และหาประสิทธิภาพที่บำบัดได้ด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน โดยมีผลดังตารางที่ 3-15 และ 3-16 ตามลำดับ

**ตารางที่ 3-13** คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วันแรกของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)

Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	TS (mg/l)	TDS (mg/l)	TVS (mg/l)	FVS (mg/l)	PCOD (mg/l)
Control	27,857	3,224	33,635	8,930	22,125	3,210	24,634
P1T1	28,323	3,196	33,745	8,880	22,240	3,230	25,127
P1T2	28,882	3,280	33,785	8,940	22,310	3,290	25,602
P1T3	28,137	3,345	34,035	9,170	22,650	3,390	24,792
P1T4	29,348	3,475	34,495	8,970	23,030	3,370	25,873
P2T4	30,373	3,624	35,485	9,370	23,740	3,540	26,748
P3T4	30,373	3,578	35,120	9,210	23,515	3,530	26,795
P4T4	30,186	3,522	34,960	9,320	23,380	3,600	26,664
P5T3	29,086	3,559	34,755	9,190	23,210	3,560	25,527

**ตารางที่ 3-14** คุณสมบัติทางเคมีของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วันสุดท้ายของการหมักด้วยชุดหมักไร้ออกซิเจน)

Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	TS (mg/l)	TDS (mg/l)	TVS (mg/l)	FVS (mg/l)	PCOD (mg/l)
Control	19,322	1,453	28,010	7,780	16,585	2,060	17,869
P1T1	19,661	1,559	27,780	7,900	16,490	2,020	18,102
P1T2	20,056	1,542	27,950	7,900	16,600	2,045	18,515
P1T3	19,887	1,536	27,725	7,850	16,510	2,150	18,351
P1T4	21,356	1,559	27,985	8,050	16,625	2,075	19,797
P2T4	20,650	1,609	28,405	8,180	16,950	2,110	19,041
P3T4	21,017	1,592	28,625	8,035	17,070	2,130	19,425
P4T4	20,650	1,620	28,345	8,060	16,855	2,145	19,030
P5T3	19,718	1,598	28,125	7,960	16,745	2,205	18,120

ตารางที่ 3-15 คุณสมบัติทางเคมีที่ถูกกำจัดโดยชุดหมักซึ่งใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Sample	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	TS (mg/L)	TDS (mg/L)	TVS (mg/L)	FVS (mg/L)	PCOD (mg/L)
Control	8,535	1,771	5,625	1,150	5,540	1,150	6,764
P1T1	8,662	1,637	5,965	980	5,750	1,210	7,025
P1T2	8,825	1,738	5,835	1,040	5,710	1,245	7,088
P1T3	8,250	1,808	6,310	1,320	6,140	1,240	6,441
P1T4	7,992	1,916	6,510	920	6,405	1,295	6,075
P2T4	9,723	2,015	7,080	1,190	6,790	1,430	7,708
P3T4	9,356	1,985	6,495	1,175	6,445	1,400	7,370
P4T4	9,536	1,902	6,615	1,260	6,525	1,455	7,635
P5T3	9,369	1,961	6,630	1,230	6,465	1,355	7,407

จากตารางที่ 3-16 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD ที่กำลังไฟฟ้า 160 W มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสลายเซลล์ของจุลินทรีย์เดิมในกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายของแข็ง เช่นเดียวกันกับการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในการบำบัดด้วยไมโครเวฟไม่สูง ซึ่งจากผลการศึกษาของ Banik et al. (2003) ได้ยืนยันถึงความสามารถในการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 45°C, 47°C และ 50°C สำหรับกำลังไฟฟ้าในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่า มีเพียงที่กำลังไฟฟ้า 160 W เท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD ต่ำกว่าที่กำลังไฟฟ้าอื่นๆ โดยกำลังไฟฟ้าที่เหลือมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัตราการให้พลังงานที่ต่ำสามารถที่จะเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ (Eskicioglu et al. 2007b) หรือเพิ่มการสลายเซลล์ของเซลล์จุลินทรีย์ได้ดีนั่นเอง สำหรับค่าประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD และ PCOD สูงสุดอยู่ที่การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ 800 W เป็นระยะเวลา 1.30 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 32.2% และ 29.0% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าการบำบัดที่กำลังไฟฟ้า 800 W ไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ ที่กำลัง 800 W อาจเป็นไปได้ที่ไม่สามารถทำให้เซลล์จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนดีแคนเตอร์เกิดการสลายเซลล์ได้นั่นเอง จึงทำให้ที่กำลัง 800 W ยังคงมีจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของแข็งหลงเหลืออยู่

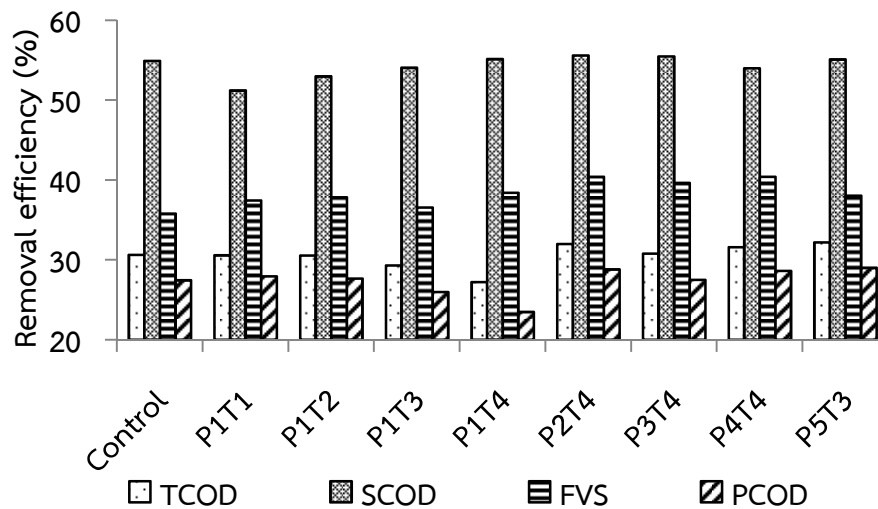
สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD พบว่า ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ ดังรูปที่ 3-25 ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยเกินไป (3.33% W/V) โดยที่การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟเพิ่มการละลายของ SCOD ได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ จึงทำให้ไม่เห็นแนวโน้มที่ชัดเจน

ตารางที่ 3-16 ประสิทธิภาพการบำบัดของชุดหมักโดยใช้กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

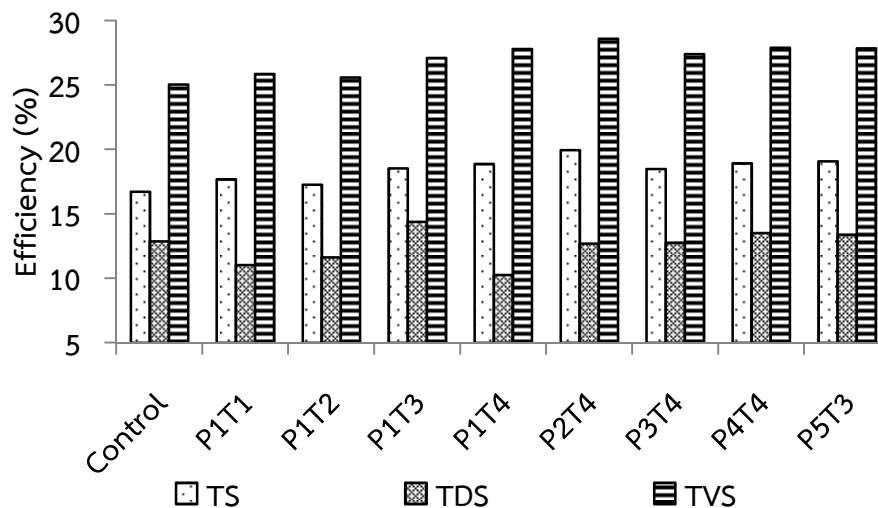
Sample	TCOD (%)	SCOD (%)	TS (%)	TDS (%)	TVS (%)	FVS (%)	PCOD (%)
Control	30.6	54.9	16.7	12.9	25.0	35.8	27.5
P1T1	30.6	51.2	17.7	11.0	25.9	37.5	28.0
P1T2	30.6	53.0	17.3	11.6	25.6	37.8	27.7
P1T3	29.3	54.1	18.5	14.4	27.1	36.6	26.0
P1T4	27.2	55.1	18.9	10.3	27.8	38.4	23.5
P2T4	32.0	55.6	20.0	12.7	28.6	40.4	28.8
P3T4	30.8	55.5	18.5	12.8	27.4	39.7	27.5
P4T4	31.6	54.0	18.9	13.5	27.9	40.4	28.6
P5T3	32.2	55.1	19.1	13.4	27.9	38.1	29.0

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 160 W ประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่พลังงานในการบำบัดใกล้เคียงกันพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันทุกกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 160 W ถึง 800 W ซึ่งมีแนวโน้มที่แตกต่างกับประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD นั้นอาจเป็นเพราะว่าการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นมีผลกระทบอีกส่วนหนึ่งที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อนที่เกิดจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ หรือผลของ Athermal effect โดยการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ถูกอธิบายไว้ว่าจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออน และการสั่นของขั้วไฟฟ้าของโมเลกุลภายในวัสดุที่ทำการบำบัด ทำให้เกิดความร้อนและเกิดการชนกันอย่างรุนแรงภายในโมเลกุล ข้อดีของการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำความร้อนคือ ต้องการพลังงานต่ำกว่าแบบทั่วไป และเกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วทั่วทั้งวัตถุ และเมื่อทำการบำบัดกับสารจำพวกลิกโนเซลลูโลสด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการแตกโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสารลิกโนเซลลูโลส โดยเป็นผลจาก Athermal effect ที่มาจากการให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารลิกโนเซลลูโลส ทำให้เกิดความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทั้งทางเคมี และทางชีวภาพ (Tomás-Pejó et al. 2011)

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานในการบำบัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอาจมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารจำพวกลิกโนเซลลูโลสได้มากขึ้นตามค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการหมักแบบไร้ออกซิเจน จุลินทรีย์จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS สูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 320 W เป็นระยะเวลา 4.00 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 20.0% และ 28.6% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด TDS และ FVS พบว่า ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนและมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3-25 และ 3-26



รูปที่ 3-25 ประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, PCOD และ FVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-26 ประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TDS และ TVS ด้วยชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการศึกษาการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบแนวโน้มที่แตกต่างกันกับการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ โดยที่หม้อนึ่งฆ่าเชื้อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปละลายได้มากกว่าในรูปของแข็ง เนื่องจากผลการศึกษาการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อสามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ดีกว่าการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าน้อยกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ แต่การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของแข็งได้ดีกว่าการบำบัดด้วยความร้อน แสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอาจมีส่วนใน

การทำให้โครงสร้างของอนุภาคสารอินทรีย์ โดยเฉพาะพวกสารลิกโนเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

**ตารางที่ 3-17** ปริมาณก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

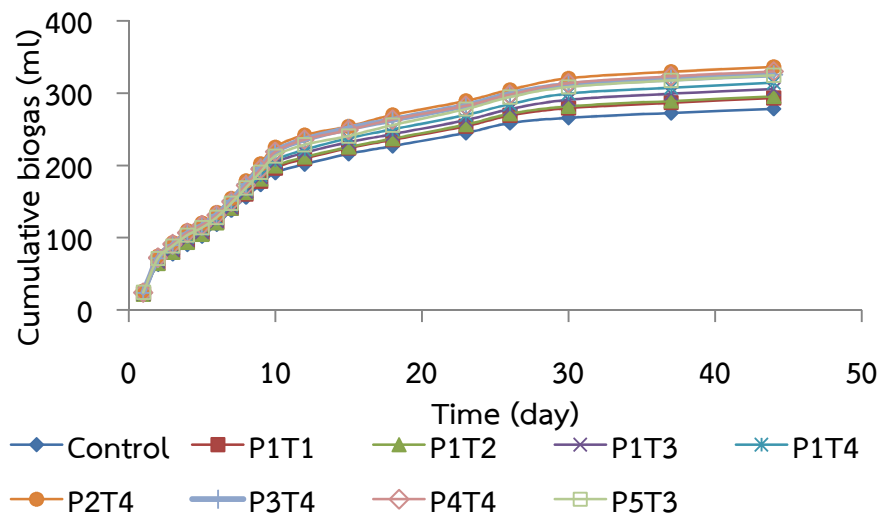
Sample	Biogas (ml)	Methane (ml)	Methane* (%)	Methane yield (ml CH <sub>4</sub> /g COD <sub>Remove</sub> )
Seed	18.8	5.4	28.6	-
Control	278.3	132.7	47.7	248.7
P1T1	293.4	141.7	48.3	262.3
P1T2	295.4	142.2	48.1	258.4
P1T3	305.7	145.6	47.6	283.3
P1T4	314.3	154.0	49.0	309.9
P2T4	336.3	169.8	50.5	281.9
P3T4	325.4	162.9	50.1	280.7
P4T4	329.8	161.5	49.0	272.9
P5T3	324.8	160.2	49.3	275.6

หมายเหตุ : \* คำนวณจากค่า (Methane/Biogas)x100

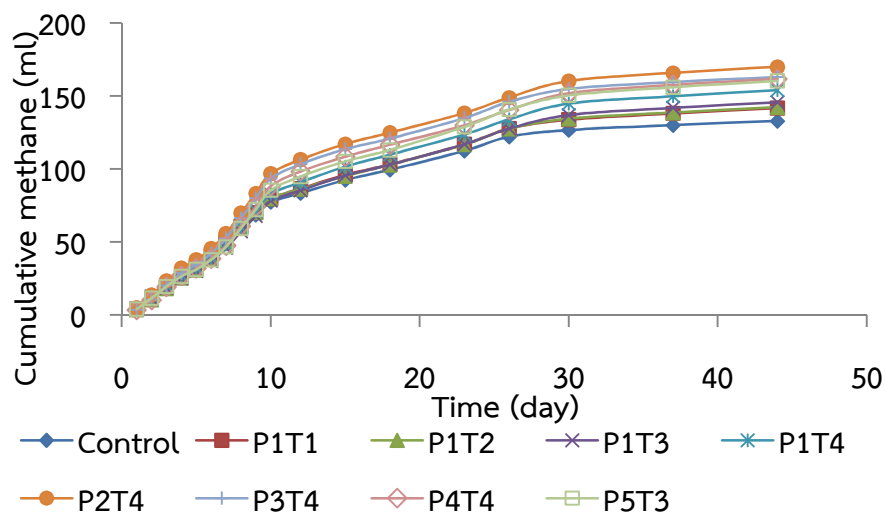
จากตารางที่ 3-17 พิจารณาที่กำลังไฟฟ้า 160 W เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่ใช้ในการบำบัด สอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS เมื่อจุลินทรีย์เข้าทำปฏิกิริยากับสารอาหารได้มากขึ้นย่อมส่งผลให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นตามไปด้วยที่พลังงานสูงสุดของแต่ละกำลังมีค่าในช่วง 72.0 kJ และ 76.8 kJ สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ 36-58 ml โดยมีค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 320 W ระยะเวลาในการบำบัด 4 นาที ซึ่งเป็นสถานะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ TVS สูงสุดในการทดลองครั้งนี้ แต่ที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3-27 และ 3-29 เมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของทุกตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 320 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 4.00 นาที มีค่าเท่ากับ 336 ml

สำหรับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสะสมได้ โดยที่กำลังไฟฟ้า 160 W เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่ที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไม่พบว่ามีแนวโน้มที่ชัดเจนโดยแต่ละกำลังมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3-28 และ 3-30 เมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของทุกตัวอย่างมีความแตกต่างกัน

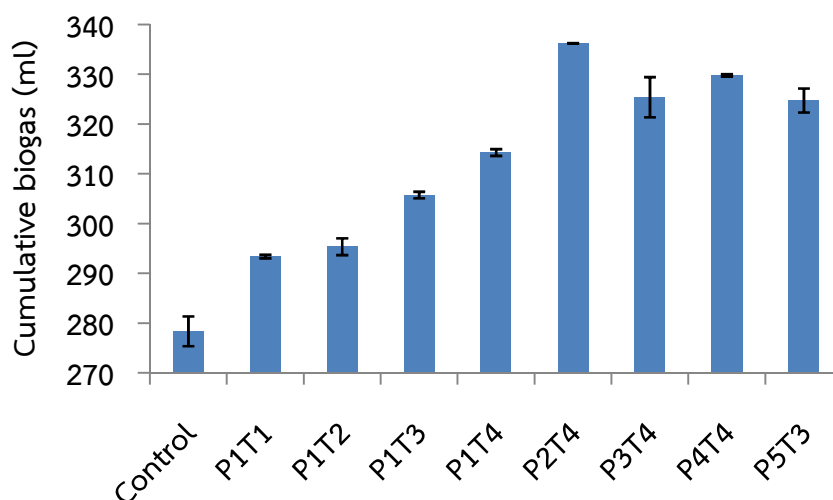
อย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 320 W ระยะเวลาในการบำบัด 4.00 นาที มีค่าเท่ากับ 170 ml CH<sub>4</sub> สำหรับเปอร์เซ็นต์สัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย ทุกตัวอย่างมีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์มีเทนอยู่ในช่วง 47.6-50.5%



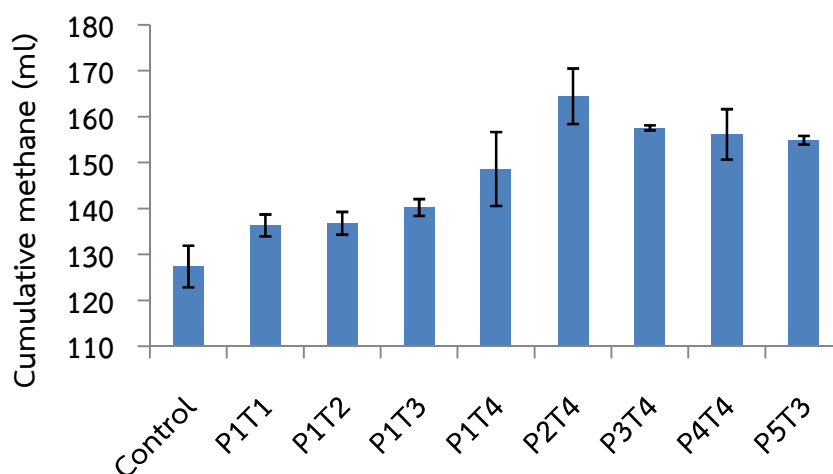
รูปที่ 3-27 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-28 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-29 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3-30 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ค่า Methane yield จากการหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่า ที่การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มค่า Methane yield ได้ โดยที่ กำลังไฟฟ้า 160 W เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่า Methane yield มีค่าเพิ่มตามระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดได้ จากผลการศึกษาของ Saha et al. (2011) พบว่า ค่า Specific Methane Yield (SMY) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการบำบัดด้วย MW เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในการทดลองครั้งนี้ยังพบว่า ที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ค่าพลังงานในการบำบัดใกล้เคียงกัน แต่อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น) ค่า Methane yield มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่า Methane yield สูงสุดอยู่ที่การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ 160 W เป็นระยะเวลา 8.00 นาที มีค่าเท่ากับ 310



ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> ซึ่งคิดเป็น 78% จากค่าตามทฤษฎีซึ่งมีค่าอยู่ที่ 395 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> (อ้างอิงที่อุณหภูมิ 35°C) และมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม 61.2 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> หรือเพิ่มขึ้น 25% จากชุดควบคุม

### 3.8 เปรียบเทียบผลการหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบที่ละเทของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลีนไมโครเวฟ

สำหรับเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่า แม้ว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลีนไมโครเวฟนั้นจะไม่มีผลแตกต่างกับชุดควบคุม แต่ก็พบว่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนของชุดการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 47.0% ซึ่งมีค่ามากกว่าชุดควบคุม (46.6%) อยู่ 0.4% แต่ชุดการบำบัดด้วยคลีนไมโครเวฟพบว่า เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ที่ 50.5% ซึ่งมากกว่าชุดควบคุม (47.7%) อยู่ 2.8% ซึ่งมีค่ามากกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของสารลิกโนเซลลูโลสซึ่งทำให้จุลินทรีย์ในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น อีกทั้งการบำบัดด้วยคลีนไมโครเวฟมีส่วนทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ Total Volatile Fatty Acids (TVFA) (Saifuddin and Fazlil 2009) ซึ่งเป็นสารที่ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงกว่าเล็กน้อย

จากค่า Methane yield ของการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ทำการบำบัดด้วยความร้อนทั้งอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ สามารถเพิ่มค่า Methane yield ได้ โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการเพิ่มค่า Methane yield อยู่ที่อุณหภูมิในการบำบัด 132°C ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที โดยมีค่า Methane yield เท่ากับ 332 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> มีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม 85.5 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> หรือเพิ่มขึ้น 34.7% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม

สำหรับค่า Methane yield ของการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ทำการบำบัดด้วยคลีนไมโครเวฟโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ สภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถเพิ่มค่า Methane yield ได้สูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 160 W ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8.00 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 310 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> และมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม 61.2 ml CH<sub>4</sub>/g COD<sub>Remove</sub> หรือเพิ่มขึ้น 24.6% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม

จากการหมักด้วยระบบไร้ออกซิเจนแบบที่ละเท พบว่า สภาวะที่มีค่า Methane yield สูงสุดของแต่ละวิธีในการบำบัดด้วยความร้อนทั้งหม้อนึ่งฆ่าเชื้อและคลีนไมโครเวฟ พบว่า ค่า Methane yield จากการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่สภาวะที่ดีที่สุดสามารถเพิ่ม Methane yield ได้มากกว่าการบำบัดด้วยคลีนไมโครเวฟที่สภาวะที่ดีที่สุด โดยเพิ่มได้มากกว่าการบำบัดด้วยคลีนไมโครเวฟถึง 10.1% จากผลการศึกษาของ Eskicioglu et al. (2006) ได้ทำการศึกษากากบำบัดด้วยความร้อนแบบทั่วไป (CH) และคลีนไมโครเวฟ (MW) ที่มีอุณหภูมิในการบำบัดเท่ากันพบว่า ทั้ง 2 วิธีสามารถทำให้เกิดการสลายเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ทั้งคู่ ซึ่งทำให้เกิดการรั่วไหลของ Extracellular biopolymers และ Intracellular biopolymers เช่นพวกโปรตีน และน้ำตาล จากตะกอนของระบบตะกอนเร่ง โดยสามารถเพิ่มการละลายของอนุภาคของชีโอดี (Particle COD) เพิ่มขึ้นได้ถึงแม้ว่าการบำบัดทั้ง 2 วิธีนั้น มีอุณหภูมิในการบำบัดเท่ากัน แต่ระดับการละลายของชีโอดี และสาร

จำพวก Biopolymers มีค่าการละลายที่แตกต่างกันใน 2 วิธี โดยวิธีการบำบัดด้วยความร้อนนั้นจะให้ อัตราการละลายของ COD และน้ำตาลละลายน้ำ (Soluble sugar) ได้ดีกว่าวิธีการบำบัดด้วยคลื่น ไมโครเวฟ แต่ค่าการละลายของโปรตีนละลายน้ำ (Soluble protein) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ทั้งหมด (TVFA) ของวิธีการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าวิธีการบำบัดด้วยความร้อน เนื่องมาจากการบำบัดด้วยความร้อนนั้นมีระยะเวลาในการบำบัด (80 นาที) นานกว่าวิธีการบำบัดด้วย คลื่นไมโครเวฟ (5 นาที) ซึ่งเกิดมาจากข้อจำกัดในเรื่องของอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ของเครื่องมือแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนละลายเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนีย และเกิด การสูญเสียกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ในขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อน และยังได้รายงานเพิ่มเติมอีก ว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพนั้นจะมีค่าแปรผันตรงกับระดับของการละลายของตะกอน (WAS solubilization) โดยในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าการละลายของ ซีโอดีจากการบำบัดด้วยความร้อน ( $132^{\circ}\text{C}$ , 120 min; S4T4) และการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (160 W, 8 min; P1T4) มีค่าการ ละลายเพิ่มขึ้นของซีโอดีเท่ากับ 33.1% และ 20.4% ตามลำดับ โดยมีค่า Methane yield เท่ากับ 332 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{Remove}}$  และ 310 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{Remove}}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Eskicioglu et al. (2006)

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ระดับเท่ากันพบว่า การบำบัดกากตะกอน ดีแคนเตอร์ด้วยคลื่นไมโครเวฟทุกๆสภาวะที่ทำการทดลองสามารถลดระยะเวลาในการหมักลงได้จาก ชุดควบคุม แต่การบำบัดด้วยความร้อนต่ำไม่สามารถลดระยะเวลาในการหมักลงได้ สำหรับการบำบัด ด้วยความร้อนสูงพบว่า สามารถลดระยะเวลาในการหมักลงได้เล็กน้อยโดยผลการศึกษาของ Jackowiak et al. (2011) พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ 216 ml  $\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{TVS}}$  ในตัวอย่างที่ไม่ผ่าน การบำบัดด้วย MW เกิดขึ้นในวันที่ 26 ของการหมัก ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วย MW จะ เกิดขึ้นในวันที่ 19, 18, 17 และ 18 ของการหมักจากตัวอย่างที่ผ่านการหมักด้วย MW ที่อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ  $180^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าที่สภาวะที่ดีที่สุดในการหมักด้วยชุดหมัก แบบไร้ออกซิเจน ซึ่งมีค่า Methane yield เท่ากับ 332 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{remove}}$  อยู่ที่อุณหภูมิ  $132^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 120 นาที ใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 95.53 kJ/g DC ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน เพิ่มได้ 4.15 ml  $\text{CH}_4/\text{g DC}$  คิดเป็นค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.16 kJ/g DC เห็นได้ว่าค่าพลังงาน ที่ใช้ในการบำบัดมีค่ามากกว่าค่าพลังงานที่ได้จากการผลิตก๊าซมีเทนมากถึง 95.37 kJ/g DC

สำหรับการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะที่ดีที่สุดในการหมักแบบไร้ ออกซิเจนซึ่งมีค่า Methane yield อยู่ที่ 310 ml  $\text{CH}_4/\text{g COD}_{\text{remove}}$  อยู่ที่สภาวะในการบำบัดด้วย กำลังไฟฟ้า 160W เป็นระยะเวลา 8 นาที ใช้พลังงานในการบำบัดเท่ากับ 7.68 kJ/g DC สามารถเพิ่ม ปริมาณก๊าซมีเทนได้ 13.8 ml  $\text{CH}_4/\text{g DC}$  คิดเป็นค่าพลังงานได้เท่ากับ 0.54 kJ/g DC สำหรับการ บำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่า ค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดมีค่าสูงกว่าพลังงานที่ได้จากการผลิตก๊าซ มีเทนอยู่ 7.14 kJ/g DC ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการบำบัดโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

การบำบัดด้วยความร้อนทั้ง 2 วิธี ทั้งหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลื่นไมโครเวฟ จาก การศึกษานี้พบว่ายังไม่คุ้มในเรื่องของพลังงาน กล่าวคือมีการใช้พลังงานในการบำบัดมากในขณะที่ พลังงานที่ได้กลับคืนมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ แต่จากการศึกษาพบประเด็นที่ว่า ค่าพลังงานที่ใช้ใน

การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น มีการใช้พลังงานที่น้อยกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อถึง 87.85 kJ/g DC คิดเป็น 92% เมื่อเทียบกับพลังงานของหม้อนึ่งฆ่าเชื้อที่ใช้ไป แต่สามารถเพิ่มพลังงานที่ได้กลับคืนในรูปก๊าซมีเทนมากกว่าถึง 0.38 kJ/g DC คิดเป็น 238% เมื่อเทียบกับค่าพลังงานที่ได้กลับคืนมาในรูปก๊าซมีเทนหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้พลังงานในการบำบัดน้อยกว่า และให้ปริมาณก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้นมากกว่า

## บทที่ 4

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนดีแคแเตอร์พบว่า มีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งอยู่ 20% ค่าความชื้น 80% สำหรับสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีละลายมีค่าเท่ากับ 17.3% และซีไอดีในรูปของแข็ง 82.7% ดังนั้น กากตะกอนดีแคแเตอร์มีสารอินทรีย์ในรูปของแข็งเป็นส่วนใหญ่ จึงควรมีการบำบัดเบื้องต้นก่อนนำไปใช้เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทน

1) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (<math> < 100^{\circ}\text{C}</math>) พบว่าที่อุณหภูมิในการบำบัด  $66^{\circ}\text{C}$  ไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ แต่ที่อุณหภูมิในการบำบัด  $88^{\circ}\text{C}$  สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้เล็กน้อย โดยมีระยะเวลาในการบำบัดเท่ากับ 90, 120, 150 และ 180 นาที เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มการละลายได้เล็กน้อยตั้งแต่ 30 นาที จนถึง 120 นาที หลังจากนั้นค่าการละลายจะคงที่ โดยที่ค่าการละลายที่มากที่สุดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที ซึ่งมีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 8.29% เมื่อเทียบกับกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

2) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (>math> > 100^{\circ}\text{C}</math>) พบว่าทั้งอุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  และ  $132^{\circ}\text{C}$  สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้ โดยที่อุณหภูมิในการบำบัด  $110^{\circ}\text{C}$  สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้เล็กน้อยที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที หลังจากนั้นค่าการละลายมีค่าคงที่ สำหรับอุณหภูมิในการบำบัด  $132^{\circ}\text{C}$  พบว่า สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้สูงสุดในการศึกษาครั้งนี้ โดยระยะเวลาในการบำบัด ตั้งแต่ 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่า ค่าการละลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดที่นานขึ้น สำหรับการละลายของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิในการบำบัด  $132^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าการละลายสูงสุดของชุดการทดลองนี้อยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด 120 นาที มีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 33.1% เมื่อเทียบกับกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

3) การบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟพบว่า กากตะกอนดีแคแเตอร์ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Thermal effect) จากผลการทดลองพบว่า ความร้อนที่เกิดจากการแผ่คลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อ การละลายของสารอินทรีย์ โดยค่าการละลายของสารอินทรีย์จะแปรผันตรงตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการแผ่คลื่นไมโครเวฟ สำหรับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบำบัด โดยที่พลังงานที่ใช้ในการบำบัดจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ดังนั้นเมื่อใช้ค่าพลังงานในการบำบัดเท่ากันค่าการละลายของสารอินทรีย์ที่ได้จึงไม่แตกต่างกัน สำหรับอัตราการให้ความร้อนขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด โดยที่กำลังไฟฟ้าสูงอัตราการให้ความร้อนจะสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ที่สภาวะอัตราการให้ความร้อนสูงในระยะเวลาสัมผัสที่สั้นอาจส่งผลโดยตรงต่อการดูดกลืนพลังงานของกากตะกอนดีแคแเตอร์

เตอร์จากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้ที่กำลังไฟฟ้า 800 W (ระยะเวลาสัมผัส 1.30 นาที) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดในการทดลองนี้ซึ่งไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์ได้ ถึงแม้จะมีค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าอื่นๆที่ทำการศึกษา สำหรับค่าการละลายของสารอินทรีย์สูงสุดอยู่ที่กำลังไฟฟ้า 160 W ระยะเวลาในการบำบัด 8.00 นาที มีค่า SCOD/TCOD เพิ่มขึ้น 20.4% เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

4) จากการทดลองการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำและสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสรุปได้ว่า การละลายของสารอินทรีย์ในรูปของของแข็ง (Solids) รวมไปถึงของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และซีโอดี (COD) มีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบำบัดที่สูงขึ้นไม่ว่าจะใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ หรือคลื่นไมโครเวฟก็ตาม โดยการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อค่าการละลายของสารอินทรีย์จะแปรผันตามปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่ง ใน 2 อย่างคือ อุณหภูมิ หรือระยะเวลาสัมผัส สำหรับการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟค่าการละลายจะแปรผันตามอุณหภูมิในการบำบัดเท่านั้น เพราะอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการบำบัดขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ และระยะเวลาสัมผัส แต่ค่าการละลายของสารอินทรีย์โดยวิธีการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟจะไม่ได้ผลดีหากใช้กำลังไฟฟ้าสูง และระยะเวลาสัมผัสที่สั้นถึงแม้ว่าจะมีอุณหภูมิในการบำบัดเท่ากันก็ตาม

5) การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีทางความร้อนจากหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ และคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อสามารถเพิ่มค่าการละลายของซีโอดีได้มากกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้ค่า Methane yield มีค่าสูงกว่า โดยพบว่า ค่า Methane yield ขึ้นกับ SCOD ที่เพิ่มขึ้นจากการบำบัดเบื้องต้นซึ่งเป็นผลจากความร้อนที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้น สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดของชุดหมักไร้ออกซิเจนพบว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด SCOD, TS และ TDS ได้เพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม ในขณะที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด TS, TVS และ FVS ได้เพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม แต่ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน และก๊าซมีเทนสะสมกลับพบว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากกว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

6) การศึกษาค่าพลังงานที่ใช้และได้กลับคืนมาในรูปก๊าซมีเทนสรุปได้ว่า การบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟให้ค่าที่ดีกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เพราะมีความต้องการในการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อในการให้ความร้อน เนื่องจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอัตราการให้ความร้อนสูงกว่าการบำบัดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

## 4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษาหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟของกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่เตรียมในรูปของเหลวเพื่อเพิ่มการละลายของสารอินทรีย์สำหรับใช้เป็นอาหารในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่างกากตะกอนดีแคแเตอร์ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ ควรมีความสามารถในการทนแรงดัน และอุณหภูมิสูง

- 3) เพิ่มการวัดอุณหภูมิที่เกิดจากการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟอย่างแม่นยำ ใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยความร้อนแบบทั่วไปเพื่อให้เกิดความชัดเจนมากยิ่งขึ้น
- 4) ควรศึกษาพารามิเตอร์อื่นเพิ่มเติม เช่น เหมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน รวมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

### บรรณานุกรม

- นันทน์ภัส ชันธีวราพันธ์ชัย. 2552. ผลของอุณหภูมิและการบำบัดเบื้องต้นต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล, และอรรฎ หันพงค์กิตติกุล. 2533. กระบวนการผลิต การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งและคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม. ว. สงขลานครินทร์. 12 (2): 169-176.
- เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล. 2551. ผลของอุณหภูมิและสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อภิสิทธิ์ แสนคำ. 2545. สมรรถนะเครื่องกรองไร้อากาศชนิดไหลขึ้นของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Anderson, N.J., Dixon, D.R., Harbour, P.J., Scales, P.J., 2002. Complete characterization of thermally treated sludges. *Water Sci. Technol.*, 46(10): 51–54.
- APHA, AWWA, WEF, 2005. In: Greenberg, A.E., Clesceri, L.S., Eaton, A.D., Franson, M.A.H. (Eds.), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. American Public Health Association.
- Azuma, J., Tanaka, F., Koshijima, T., 1984. Enhancement of enzymatic susceptibility of lignocellulosic wastes by microwave irradiation. *J. Ferment. Technol.*, 62: 377-384.
- Banik, S., Bandyopadhyay, S., Ganguly, S. 2003. Bioeffects of microwave-a brief review. *Bioresource Technology* 87: 155-159.
- Barjenbruch, M., Kopplow, O., 2003. Enzymatic, mechanical and thermal pretreatment of surplus sludge. *Adv. Environ. Res.*, 7(3): 715–720.

- Batstone, D.J., Balthes, C., Barr, K., 2010. Model Assisted Startup of Anaerobic Digesters Fed with Thermally Hydrolysed Activated Sludge. *Water Sci. Technol.*, 62(7): 1661-1666.
- Batstone, D.J., Tait, S., Starrenburg, D., 2009. Estimation of hydrolysis parameters in full-scale anaerobic digesters. *Biotechnol. Bioeng.*, 102(5): 1513–1520.
- Beszédes, S., László, Z., Horváth, Z.H., Szabó, G., Hodúr, C., 2011. Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy- and meat-industry. *Bioreource technology* 102: 814-821.
- Binod, P., Satyanagalakshmi, K., Sindhu, R., Janu, K.U., Sukumaran, R.K., Pandey, A., 2012. Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse. *Renewable Energy* 37: 109-116.
- Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J.P., Carrère, H., 2006a. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chemical Engineering and Processing* 45: 711–718.
- Bourgrier, C., Carrère, H., Delgenès, J.P., 2005. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment. *Chem. Eng. J.*, 106: 163–169.
- Bougrier, C., Delgenés, J.P., Carrère, H. 2006b. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process safety and environmental protection* 84(B4): 280-284.
- Bougrier, C., Delgenés, J.P., Carrère, H. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilization, physical properties and anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal* 139: 236-244.
- Bradford, M.M., 1976. A rapid sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem. Tech.*, 72: 248-254.



- Brooks, R.B., Grad, I., 1968. Heat treatment of activated sludge. *Wat. Poll. Control* 67: 592-601.
- Carrère, H., Bougrier, C., Castets, D., Delgenés, J.P., 2008. Impact of initial biodegradability on sludge anaerobic digestion enhancement by thermal pretreatment. *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 43(13): 1551–1555.
- Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenés, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I., 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: review. *Journal of Hazardous Materials* 183: 1-15.
- Chauzy, J., Cretenot, D., Bausseon, A., 2007. Anaerobic digestion enhanced by thermal hydrolysis: First reference BIOTHELYS® at Saumur, France. Facing sludge diversities: challenges, risks and opportunities (2007). Antalya, Turkey.
- Chiu, Y.C., Chang, C.N., Lin, J.G., Huang, S.J., 1997. Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.*, 36: 155–162.
- Choi, I.B., Ifwang, K.Y., Shin, E.B., 1997. Effect on anaerobic digestion of sewage sludge pretreatment. *Water Sci. Technol.*, 35: 207-211.
- Climent, M., Ferrer, I., Baeza, M.M., Artola, A., Vázquez, F., Font, X., 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal* 133: 335-342.
- David, C., Matteo, P., Simone, F., Luis, O., Piero, O., Paolo, T., Francesco, C. 2012. Review of pretreatment process for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. *Biomass and Bioenergy* xxx: I-II. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.04.020.
- Dohanyos, M., Zabranska, J., Kutil, J., Jenicek, P., 2004. Improvement of anaerobic digestion of sludge, *Water Sci. Technol.*, 49(10): 89–96.

- Duff, S.J.B., Murray, W.D., 1996. Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review. *Bioresource Technology* 55: 1–33.
- Dwyer, J., Starrenburg, D., Tait, S., Barr, K., Batstone, D.J., Lant, P., 2008. Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability. *Water Res.*, 42(18): 4699–4709.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K.J., Droste, R.L. 2006. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment. *Water Research* 40: 3725-3736.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K.J., Droste, R.L. 2007a. Enhancement of batch waste activated sludge digestion by microwave pretreatment. *Water environment research* 79(11): 2304-2317.
- Eskicioglu, C., Kennedy, K.J., Droste, R.L., 2009. Enhanced disinfection and methane production from sewage sludge by microwave irradiation. *Desalination* 248 (1–3): 279–285.
- Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K.J., Droste, R.L., Hamoda, M. 2007b. Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *Water research* 41: 2457-2466.
- Everett, J.G., 1974. Dewatering of wastewater sludge by heat treatment. *JWPCF* 44: 92-100.
- Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. 2009. Pretreatment to enhance the digestability of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100: 10-18.
- Fernandez-Polanco, F., Velazquez, R., Perez-Elvira, S.I., Casas, C., del Barrio, D., Cantero, F.J., Fdz-Polanco, M., Rodriguez, P., Panizo, L., Serrat, J., Rouge, P., 2008. Continuous thermal hydrolysis and energy integration in sludge anaerobic digestion plants. *Water Sci. Technol.*, 57(8): 1221–1226.

- Ferrer, I., Ponsa, S., Vazquez, F., Font, X., 2008. Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochem. Eng. J.*, 42(2): 186–192.
- Fisher, R.A., Swanwick S.J., 1971. High temperature treatment of sewage sludge. *Water Pollut. Control* 71(3): 255–370.
- Fjordside, C., 2001. An operating tale from Næstved Sewage Treatment Plant, in: *Municipal wastewater treatment Nordic Conference, Copenhagen (Denmark)*.
- Frostell, B., 1985. Process Control in Anaerobic Wastewater Treatment. *Water Science Technology* 17: 173-189.
- Gavala, H.N., Yenal, U., Skiadas, I.V., Westermann, P., Ahring, B.K., 2003. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Res.*, 37: 4561–4572.
- Graja, S., Chauzy, J., Fernandes, P., Patria, L., Cretenot, D., 2005. Reduction of sludge production from WWTP using thermal pretreatment and enhanced anaerobic methanisation. *Water Sci. Technol.*, 52(1–2): 267–273.
- Grous, W.R., Converse, A.O., Grethlein, H.E., 1986. Effect of steam explosion pretreatment on pore size and enzymatic hydrolysis of poplar, *Enzyme Microb. Technol.*, 8: 274–280.
- Hamzah, F. and Idris, A., 2008. Enzymatic hydrolysis of treated palm oil empty fruit bunches fibre (EFB) using combination alkali-microwave techniques. *Journal of Biotechnology* 136S: S402–S459
- Haug, R.T., 1977. Sludge processing to optimize digestibility and energy production. *JWPCF* , 49: 1713-1721.
- Haug, R.T., LeBrun, T.J., Tortorici, L.D., 1983. Thermal pretreatment of sludges - a field demonstration. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 55: 23–34.

- Haug, R.T., Stuckey, D.C., Gossett, J.M., McCarty, P.L., 1978. Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges. *J. Water Pol. Control Fed.* 5(1): 73–85.
- Hiraoka, M., Takeda, N., Sakai, S., Nagai, K., Koyayashi, N., 1986. Pilot plant study of anaerobic digestion system with thermal pretreatment. *J. Jpn Sewage Works Assoc.*, 23: 38-49.
- In, W.N., Yun, W.K., Kyung, Y.H., Woong, K.S., 2000. Mechanical pretreatment of waste activated sludg for anaerobic digestion process. *Wat. Res.*, 34(8): 2362-2368.
- Jackowiak, D., Bassard, D., Pauss, A., Ribeiro, T., 2011. Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production. *Bioresource Technology* 102: 6750-6756.
- Jin, W., Zheng, B.Y., Tian, H.C., Shu, C.P., Han, Q.Y., Hong, Z.C., 2010. Anaerobic digestibility and fiber composition of bulrush in response to steam explosion. *Bioresource Technology* 101: 6610–6614.
- Kepp U., Machenbach I., Weisz N., Solheim O.E., 2000. Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis – three years of experience with full scale plant. *Water Sci. Technol.*, 42 (9): 89–96.
- Kim J., Park C., Kim T., Lee M., Kim S., Kim S.W., Lee J., 2003. Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 95(3): 271-275.
- Leyla O., Tuba, H.E., Goksel, N.D., 2011. Effects of pretreatment methods on solubilization of beet-pulp and bio-hydrogen production yield. *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 382-389.
- Li, Y., Noike, T., 1989. The effect of thermal pretreatment and retention time on the degradation of waste activated sludge in anaerobic digestion. *Jpn J. Wat. Poll. Res.*, 12: 112-121.

- Li, Y., Noike, T., 1992. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment. *Water Sci. Technol.*, 26: 857-866.
- Lin, J.G., Chang C.N., Chang S.C., 1997. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization. *Biores. Technol.*, 62: 85-90.
- Morjanoff, P.J., Gray, P.P., 1987. Optimization of steam explosion as method for increasing susceptibility of sugarcane bagasse to enzymatic saccharification. *Biotechnol. Bioeng.*, 29: 733-741.
- Mottet, A., Steyer, J.P., Deleris, S., Vedrenne, F., Chauzy, J., Carrere, H., 2009. Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. *Biochem. Eng. J.*, 46(2): 169-175.
- Müller, J.A., 2000. Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge. *Water Sci. Technol.*, 42: 167-174.
- Nah, L.W., Kang, Y.W., Hwang, K.Y., Song, W.K., 2000. Mechanical pretreatment of waste activated[ sludge for anaerobic digestion process. *Water Res.*, 34: 2362-2368.
- Nielsen, H.B., Mladenovska, Z., Westermann, P., Ahring, B.K., 2004. Comparison of two-stage thermophilic (68°C/55°C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55°C) digestion of cattle manure. *Biotechnol. Bioeng.*, 86: 291-300.
- Onwueme, I.C. Sinha, T.D., 1991. Field crop production in tropical Africa. CTA (The Technical Centre for Agricultural and Rural Co-operation), Ede, The Netherlands: 1-480.
- Paepatung, N., Nopharatana, A., Songkasiri, W., 2009. Bio-Methane Potential of Biological Solid Materials and Agricultural Wastes. *J. Energy Env.*, 10(01): 19-27.
- Parkin, G.F., Owen, W.E., 1986. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal Environmental Engineering* 112(5): 867-920.

- Penaud, V., Delgenés, J.P., Moletta, R., 1999. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. *Enzyme Microb. Technol.*, 25: 258-263.
- Prasertsan, S. Prasertsan, P., 1996. BIOMASS RESIDUES FROM PALM OIL MILLS IN THAILAND: AN OVERVIEW ON QUANTITY AND POTENTIAL USAGE. *Biomass and Bioenergy* 11(5): 387-395.
- Rajan, R.V., Lin, J.G., Ray, B.T., 1989. Low-level chemical pretreatment for enhanced sludge solubilization. *Res. J. Water Pollut. Control Fed.*, 61: 1678-1683.
- Ray, B.T., Rajan, R.V., Lin, J.G., 1990. Low-level alkaline solubilization for enhanced anaerobic digestion. *Res. J. Water Pollut. Control Fed.*, 62: 81-87.
- Saha, M., Eskicioglu, C., Marin, J., 2011. Microwave, ultrasonic and chemo-mechanical pretreatments for enhancing methane potential of pulp mill wastewater treatment sludge. *Bioresource Technology* 102: 7815-7826.
- Saifuddin, N., Fazlil, S.A., 2009. Effect of Microwave and Ultrasonic Pretreatments on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2(1): 139-146.
- Sawayama, S., Inoue, S., Tsnkahara, K., Ogi, T., 1996. Thermochemical liquidization of anaerobically digested and dewatered sludge and anaerobic retreatment. *Biores. Technol.*, 55: 141-144.
- Shimizu, T., Kudo, K. Nasu, Y., 1992a. Ultrasonic pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *J. Wat. Waste (Jpn)* 34: 221-226.
- Shimizu, T., Kudo, K. Nasu, Y., 1992b. Anaerobic digestion of a solubilized waste activated sludge. *J. Wat. Waste (Jpn)* 34: 413-418.
- Shimizu, T., Kudo, K. Nasu, Y., 1992c. Improvement of efficiency for anaerobic digestion process of waste activated sludge. *J. Wat. Waste (Jpn)* 34: 497-502.

- Singh, R.P., Embrandiri, A., Ibrahim, M.H., Esa, N., 2011. Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling* 55(4): 423-434.
- Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Lu J., Ahring, B.K., 2004. Thermal pretreatment of primary and secondary sludge at 70°C prior to anaerobic digestion, in: *Proceedings of the 10th World Congress, vol. 2, Anaerobic Digestion 2004: Anaerobic Bioconversion. Answer for Sustainability, Montreal, Canada, 2004.*
- Stering Jr., M.C., Lacey, R.E., Engler, C.R., Ricke, S.C., 2001. Effect of Ammonia Nitrogen on H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> during Anaerobic Digestion of Dairy Cattle Manure. *Bioresource Technology* 77: 9-18.
- Stuckey, D.C. McCarty, P.L., 1978a. Thermochemical pretreatment of nitrogenous materials to increase methane yield. *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 8: 219-233.
- Stuckey, D.C., McCarty, P.L., 1978b. The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge. *Wat. Res.* 18: 1343-1353.
- Stuckey, D.C., McCarty, P.L., 1984. The effect of thermal pre-treatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge, *Water Res.* 18: 1343-1353.
- Sun, Y., Cheng, J., 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology* 83(1): 1-11.
- Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K.L, Bildan, M.L.N.S., 1997. Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Sci. Technol.*, 35: 209-215.
- Thostenson, E.T., Chou, T.W., 1999. Microwave processing: fundamentals and applications, *Composites: Part A* 30, 1055-1071.
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., Neis, U., 2001. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Water Res.*, 35: 2003-2009.

- Tomás-Pejó, E., Alvira, P., Ballesteros, M., Negro, M.J., 2011. Pretreatment technologies for Lignocellulose-to-Bioethanol conversion. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, Elsevier Inc. 160-161.
- Valo, A., Carrère, H., Delgenès, J.P., 2004. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79: 1197–1203.
- Vlyssides, A.G., Karlis, P.K., 2004. Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 91: 201-206.
- Wang, Q., Kuninobu, M., Kakimoto, K., Ogawa, H. I., and Kato, Y., 1999. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment. *Biores. Technol.*, 68: 309-313.
- Wastewater Engineering Treatment and Reuse, Fourth Edition 2004, Metcalf&Eddy Figure 7-26: 631.
- Weemaes M.P.J., Verstraete W., 1998. Evaluation of current wet sludge disintegration techniques, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 73: 83–92.
- Wilson, C.A., Novak, J.T., 2009. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. *Water Research*, 43: 4489-4498.
- Wood, N., Tran, H., Master, E., 2009. Pretreatment of pulp mill secondary sludge for high-rate anaerobic conversion to biogas. *Bioresource Technology* 100: 5729–5735.
- Wright, J.D., 1998. Ethanol from biomass by enzymatic hydrolysis, *Chem. Eng. Prog.*, 84(8): 62–74.
- Xiong, J., Liang, W.Z., Fan, P.M., 2000. Influence of microwave on the ultrastructure of cellulose I. *J. South China Univ. Technol.*, 28: 84-89.



- Yahya, A., Sye, C.P., Ishola, T.A., Suryanto, H., 2010. Effect of adding palm oil mill decanter cake slurry with regular turning operation on the composting process and quality of compost from oil palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology* 101: 8736–8741.
- Yang, X., Wang, X., Wang, L., 2010. Transferring of components and energy output in industrial sewage sludge disposal by thermal pretreatment and two-phase anaerobic process. *Bioresour. Technol.*, 101(8): 2580–2584.
- Yilmazer, G., Yenigun, O., 1999. Two-phase anaerobic treatment of cheese whey. *Wat. Sci. Tech.* 40(1): 289-295.
- Yu, Q., Lei, H., Li, Z., Li, H., Chen, K., 2010. Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment. *Water research* 44: 2841-2849.
- Zabranska, J., Dohanyos, M., Jenicek, P., Kutil, J., Cejka, J., 2006. Mechanical and rapid thermal disintegration methods of enhancement of biogas production- Full scale applications, in: *IWA Specialized conference: Sustainable sludge management: state of the art, challenges and perspectives*, Moscow, Russia, 2006.
- Zheng, J., Kennedy, K.J., Eskicioglu, C., 2009. Effect of low temperature microwave pretreatment on characteristics and mesophilic digestion of primary sludge. *Environ. Technol.*, 30(4): 319–327.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (พพ.) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (2555-2564): AEDP. สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2556 จาก <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. (มพส.) ความรู้เรื่องพลังงานหมุนเวียน (Online). สืบค้นเมื่อ: 11 กุมภาพันธ์ 2554 จาก: <http://www.efc.or.th/efc-book.php?task=22>
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (สวก.) ปาล์มน้ำมัน. สืบค้นเมื่อ 7 มกราคม 2556 จาก: <http://www.arda.co.th/kaSetinfo/south/plam/history/01-02.php>

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์

#### 1. การวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดและความเป็นด่างทั้งหมด (Dilallo and Albertson, 1961)

##### 1.1 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

- 1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)
- 2) เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- 3) เครื่องกวนผสม (Magnetic stirrer)
- 4) ปีกเกอร์ขนาด 50 มล. (Beaker 50 ml)
- 5) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. (Flask 250 ml)
- 6) บิวเรตขนาด 10 และ 50 มล. (Buret 10 and 50 ml)

##### 1.2 สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์พีเอช 4.01, 7.01 และ 10.01 (Standard buffer pH 4.01, 7.01 and 10.01)
- 2) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.05 N (Sodium carbonate solution 0.05 N)

อบสารมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต (Primary standard  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 3-5 g ที่อุณหภูมิ  $250^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ซึ่งสารมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนตที่อบแล้วมา 2.5 g จดน้ำหนักที่แน่นอน (A) ละลายแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 L

- 3) สารไตรเตรตมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 N (Standard  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02 N)

ปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) มา 0.55 ml ปรับปริมาตรเป็น 1 L ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.05 N โดยปิเปตสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตมา 15 ml ใส่ลงใน Flask จากนั้นเติมสารละลายบอริคอินดิเคเตอร์ลงไป 10 ml แล้วทำการไตเตรตด้วยสารมาตรฐานกรดซัลฟูริก จดบันทึกปริมาณไตเตรนต์ที่ใช้ (B) คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนได้จากสมการ ก-1

$$[\text{H}_2\text{SO}_4](N) = \frac{(A) \times 15}{(53 \times B)} \quad (\text{ก-1})$$

- 4) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator solution) ซึ่งสารฟีนอล์ฟทาลีนมา 0.1 g ละลายด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 100 ml

- 5) สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 0.05 N ( $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$  0.05 N)  
 บดสารโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตประมาณ 15-20 g นำไปอบที่อุณหภูมิ  $120^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น จากนั้นชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตที่อบแล้วมา  $10+0.5$  g ละลายและปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น
- 6) สารไตรเตรตมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 N (Standard NaOH 0.01 N)  
 ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 0.4 g ละลายและปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 0.05 N โดยปิเปตมา 5 ml ใส่ลงใน Flask หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ลงไป 3-5 หยด จากนั้นนำไปไตเตรตด้วยสารมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ จดบันทึกปริมาณไตเตรนต์ที่ใช้ ( $D$ ) คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนได้จากสมการ ก-2

$$[\text{NaOH}](N) = \frac{50}{(204.2 \times D)} \quad (\text{ก-2})$$

### 1.3 วิธีการทดลอง

- 1) การเตรียมตัวอย่างของแข็ง ชั่งตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์มา 5 g ละลายด้วยน้ำกลั่น 100 ml จากนั้นคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งให้ตกตะกอน สำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลวให้ตั้งตัวอย่างให้ตกตะกอน
- 2) นำสารละลายส่วนใสข้างบนของตัวอย่างที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์บันทึกปริมาตรที่แน่นอน ( $C$ ) ทำการวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วย pH meter จากนั้นนำมาไตเตรตด้วยสารไตรเตรตมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 N ให้ได้ pH เท่ากับ 4.00 บันทึกปริมาตรสารไตรเตรนต์ที่ใช้ ( $E$ )
- 3) ทำการไตเตรตด้วยสารมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 N ให้ได้ pH เท่ากับ 3.30-3.50 ไม่ต้องจดปริมาตรไตเตรนต์ที่ใช้ในขั้นตอนนี้
- 4) นำตัวอย่างที่ปรับ pH ให้ได้ 3.30-3.50 มาตั้งบนเตาให้ความร้อน โดยให้ความร้อนปานกลางเพื่อให้เกิดการเดือดเบาๆ ต้มประมาณ 3 นาที เพื่อไล่ก๊าซ  $\text{CO}_2$  จากนั้นนำปรับ pH ด้วยสารมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 N ให้ได้ pH เท่ากับ 4.00 ไม่ต้องบันทึกปริมาตรไตเตรนต์ที่ใช้
- 5) ทำการไตเตรตด้วยสารมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 N ต่อให้ได้ค่า pH เท่ากับ 7.00 จดปริมาตรไตเตรนต์ที่ใช้ ( $F$ )

### 1.4 การคำนวณ

(กรณีตัวอย่างเป็นของเหลว)

$$\text{Alkalinity (mg/l as CaCO}_3) = \frac{E \times 50,000 \times [\text{H}_2\text{SO}_4]}{C} \quad (\text{ก-3})$$

(กรณีตัวอย่างเป็นของแข็ง)

$$\text{Alkalinity (mg/g Dry as CaCO}_3) = \frac{E \times 1,000 \times [H_2SO_4]}{C \times TS} \quad (\text{ก-4})$$

(กรณีตัวอย่างเป็นของเหลว)

$$\text{Volatile acid alkalinity (mg/l as CaCO}_3) = \frac{F \times 50,000 \times [NaOH]}{C} \quad (\text{ก-5})$$

(กรณีตัวอย่างเป็นของแข็ง)

$$\text{Volatile acid alkalinity (mg/l Dry as CaCO}_3) = \frac{F \times 1,000 \times [NaOH]}{C \times TS} \quad (\text{ก-6})$$

(กรณี Volatile acid alkalinity > 180 mg/l as CaCO<sub>3</sub>)

$$\text{Volatile acid} = \text{Volatile acid alkalinity} \times 1.5 \quad (\text{ก-7})$$

(กรณี Volatile acid alkalinity < 180 mg/l as CaCO<sub>3</sub>)

$$\text{Volatile acid} = \text{Volatile acid alkalinity} \times 1.0 \quad (\text{ก-8})$$

## ภาคผนวก ข



รูปที่ ข- 1 ตัวอย่างกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ลานทิ้งตะกอน



รูปที่ ข- 2 ตัวอย่างอุปกรณ์ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนต่ำ และสูงโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ



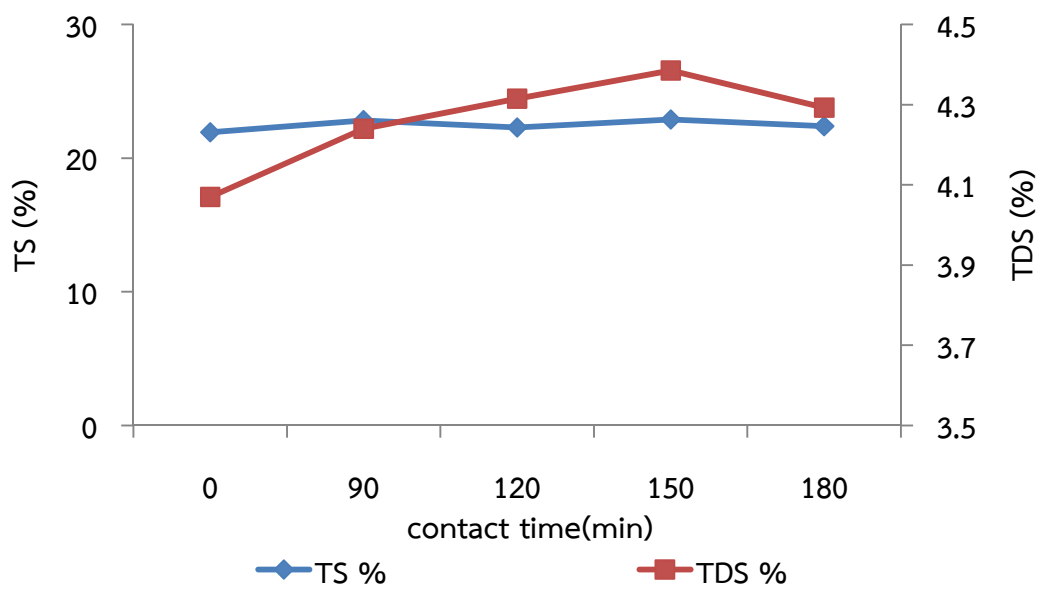
รูปที่ ข- 3 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven) สำหรับใช้ในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ ข- 4 ภาพขณะใส่ตัวอย่างในการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

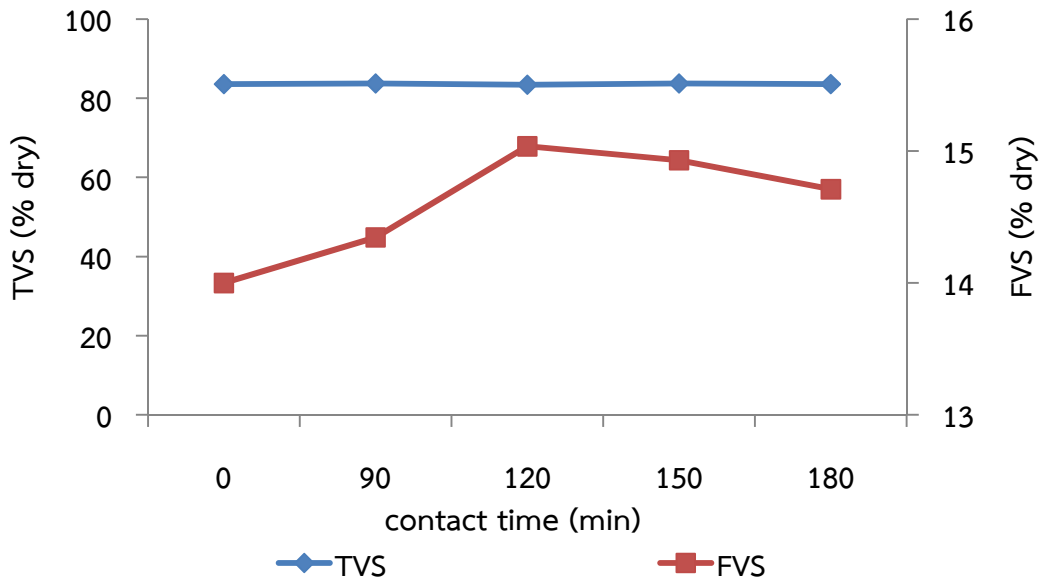


รูปที่ ข- 5 ตัวอย่างชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจน

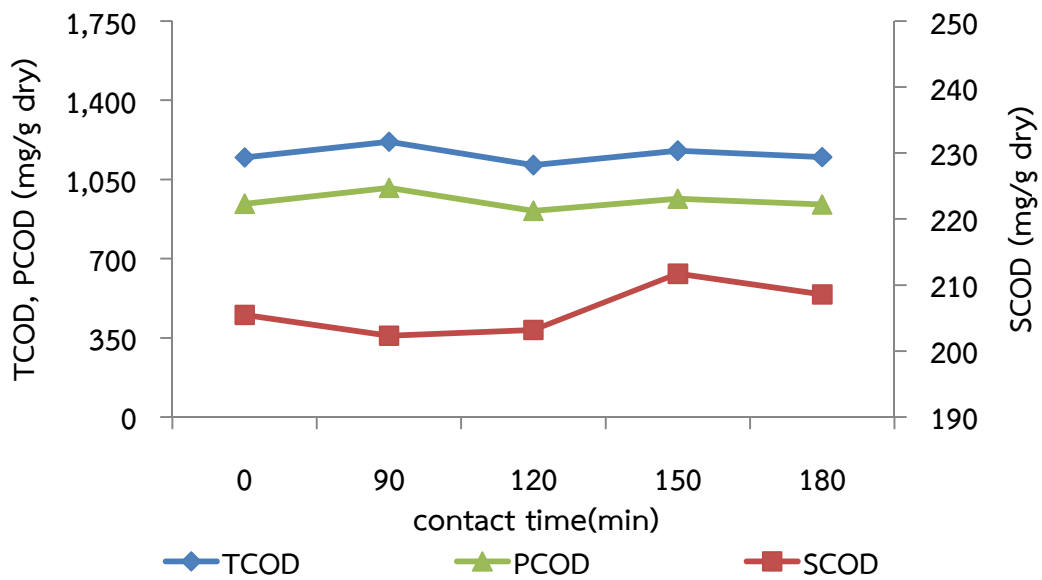


รูปที่ ข- 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C

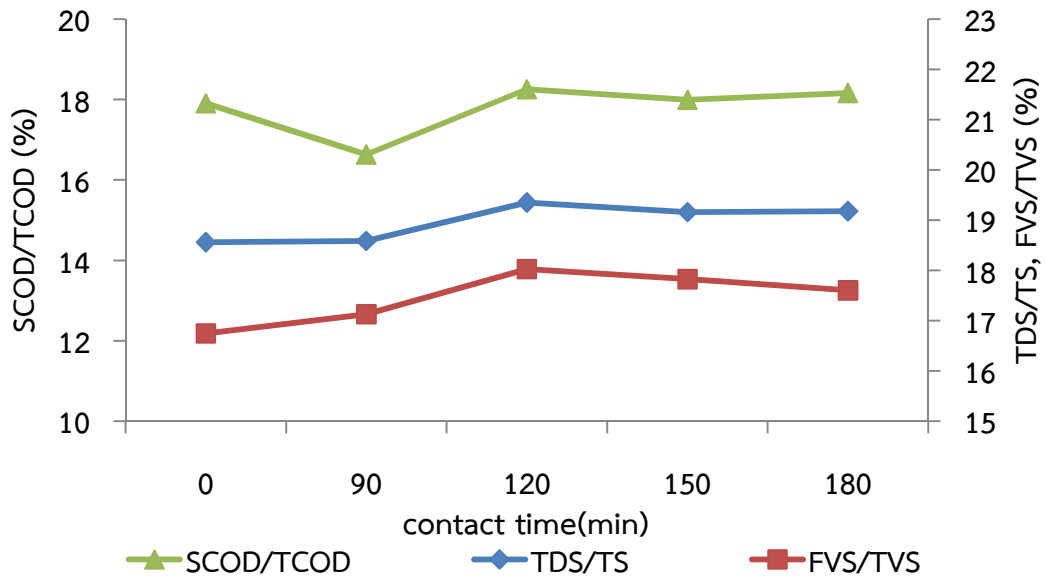




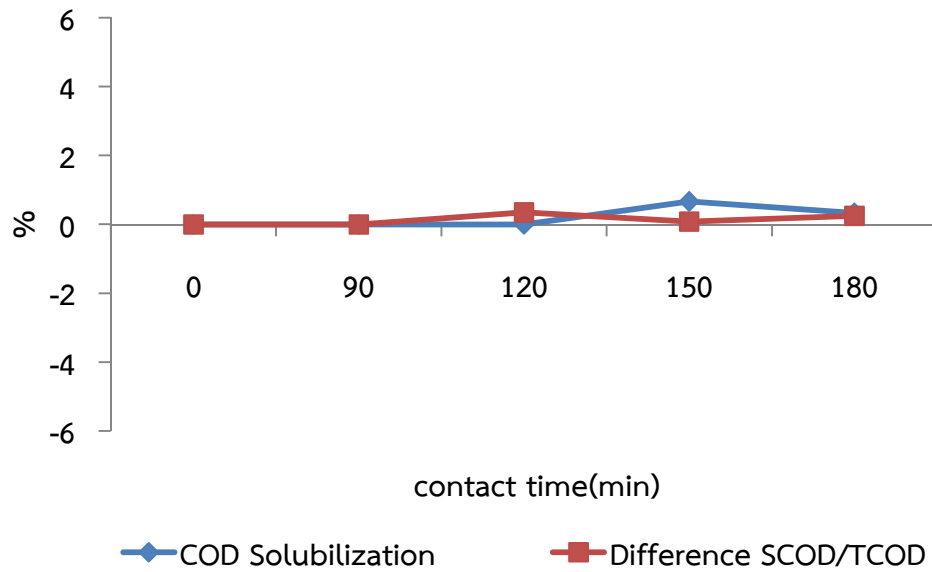
รูปที่ ข- 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C



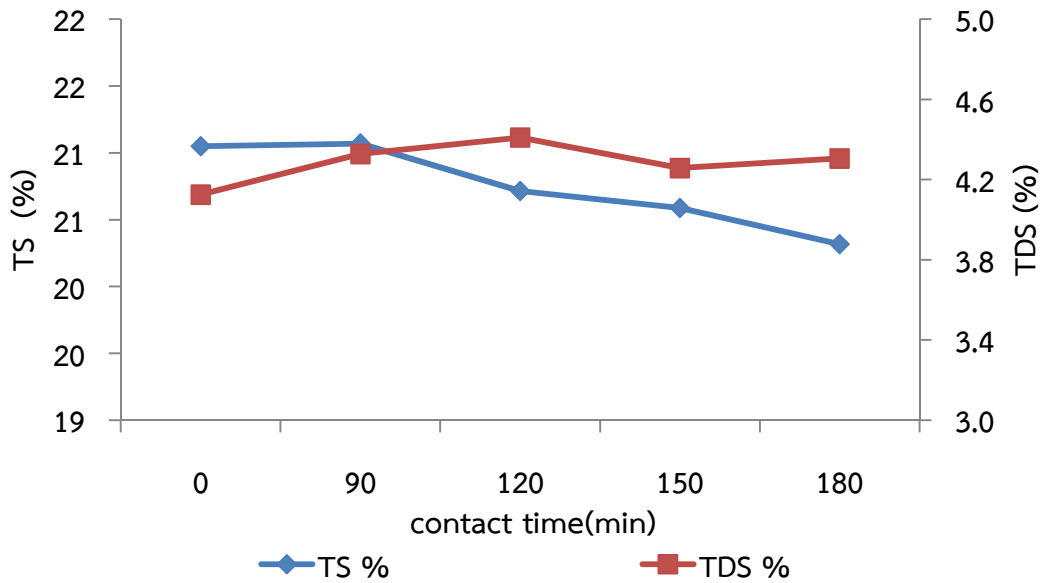
รูปที่ ข- 8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C



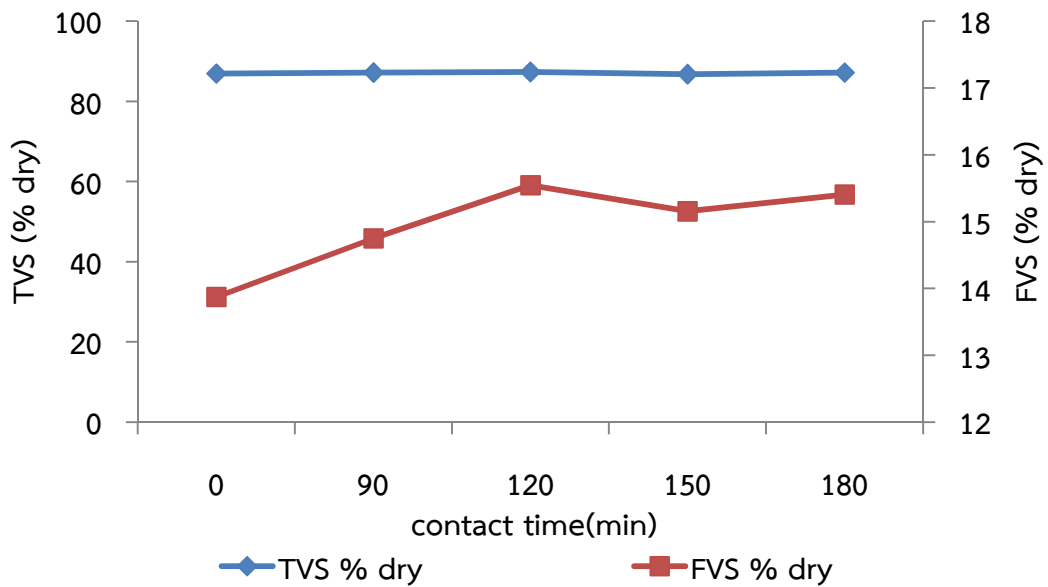
รูปที่ ข- 9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C



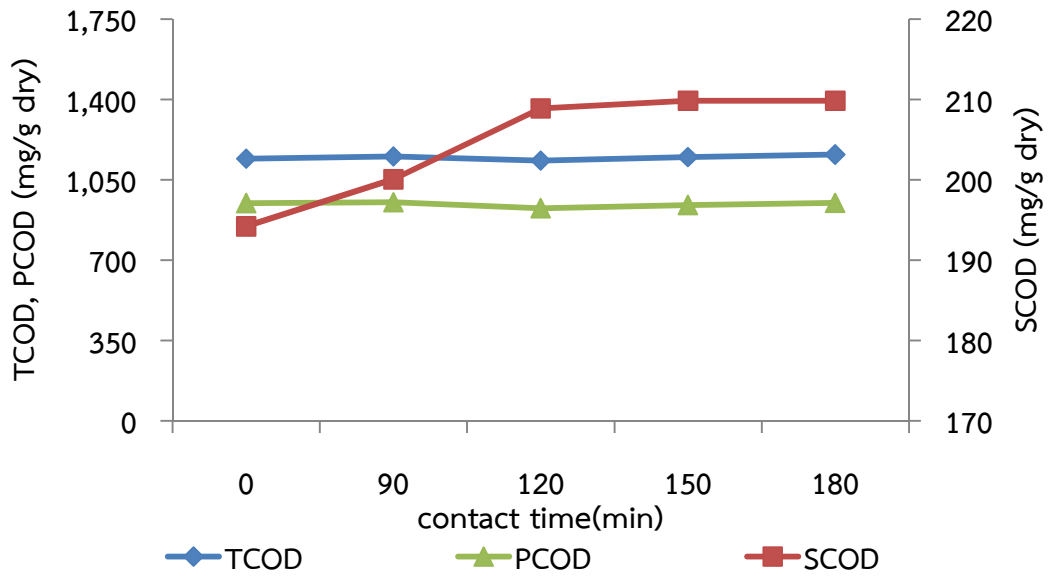
รูปที่ ข- 10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 66°C



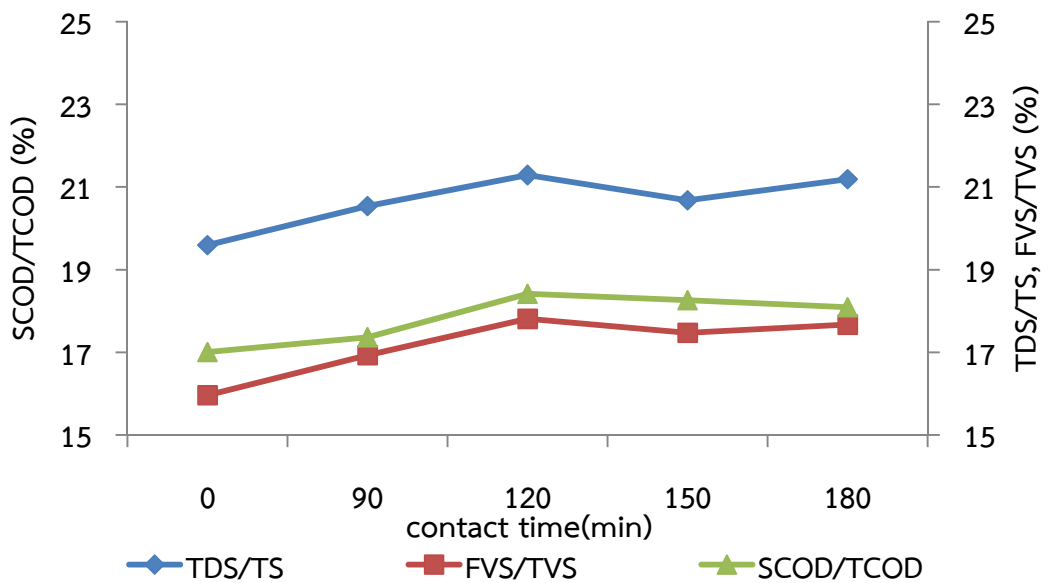
รูปที่ ข- 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C



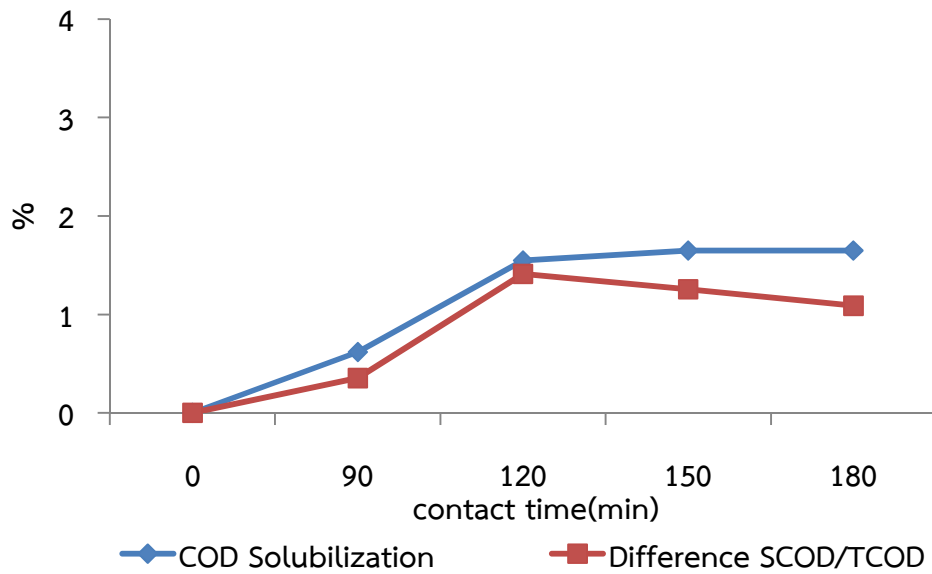
รูปที่ ข- 12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C



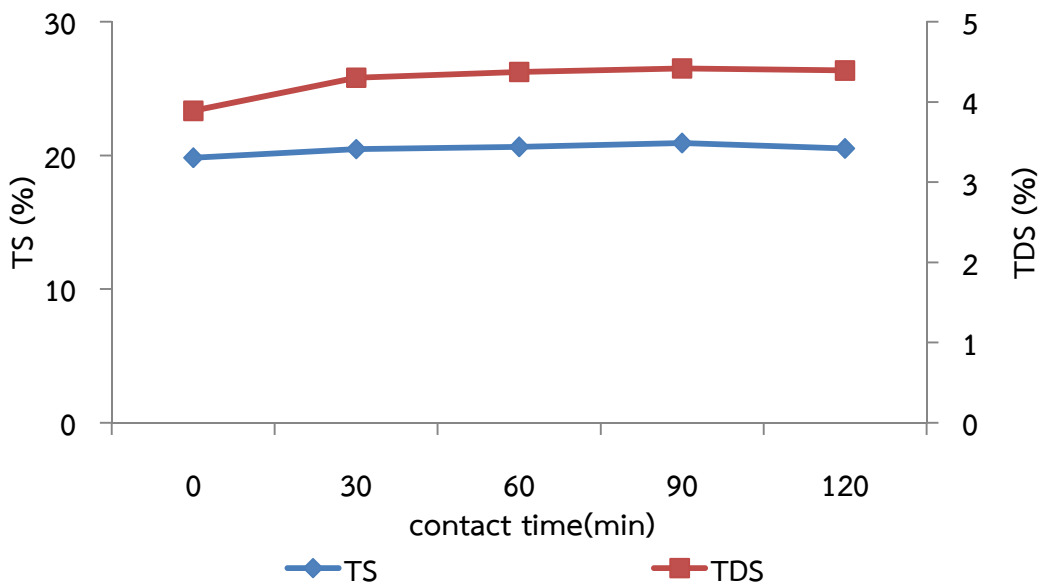
รูปที่ ข- 13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C



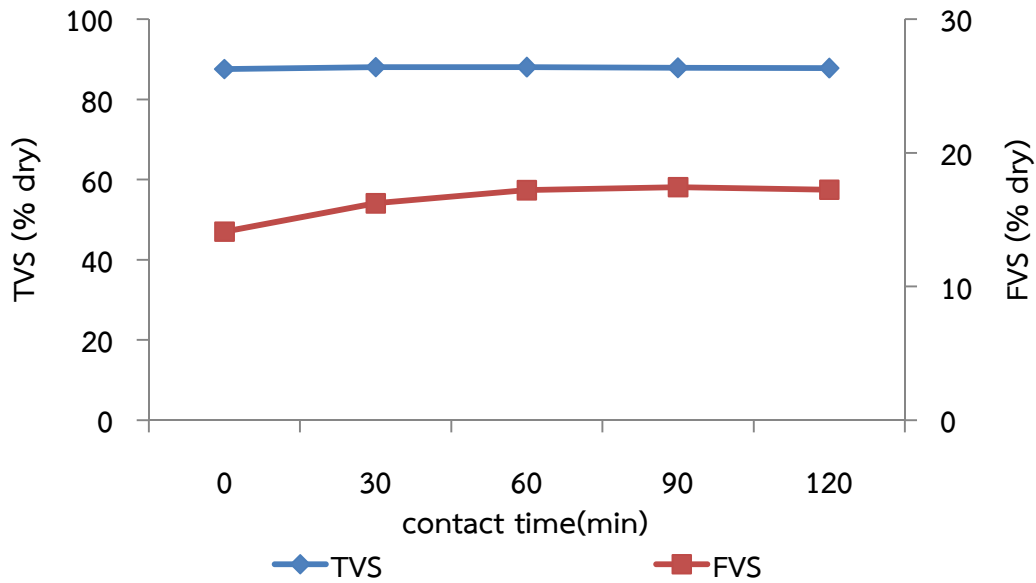
รูปที่ ข- 14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C



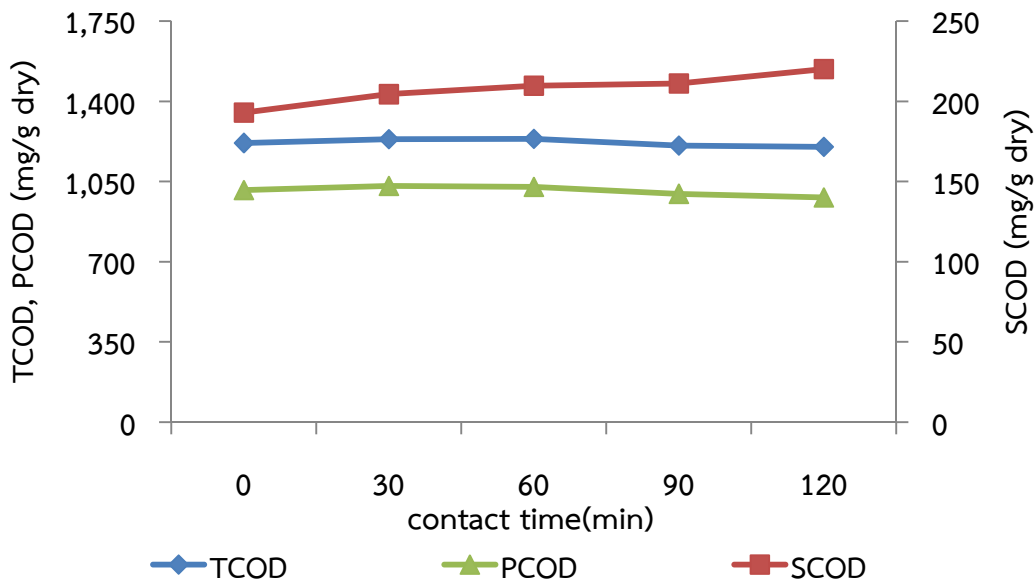
รูปที่ ข- 15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 88°C



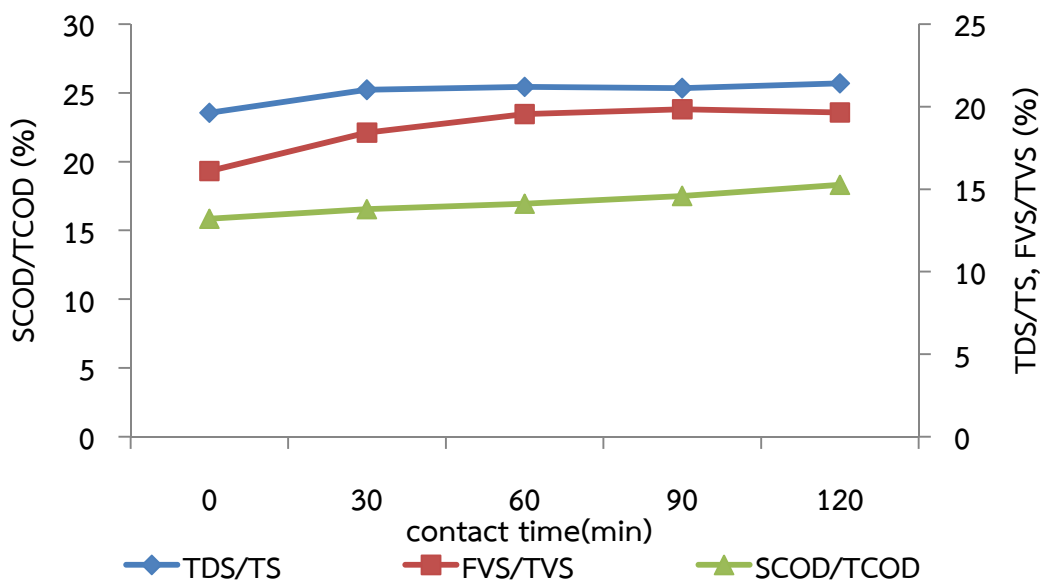
รูปที่ ข- 16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C



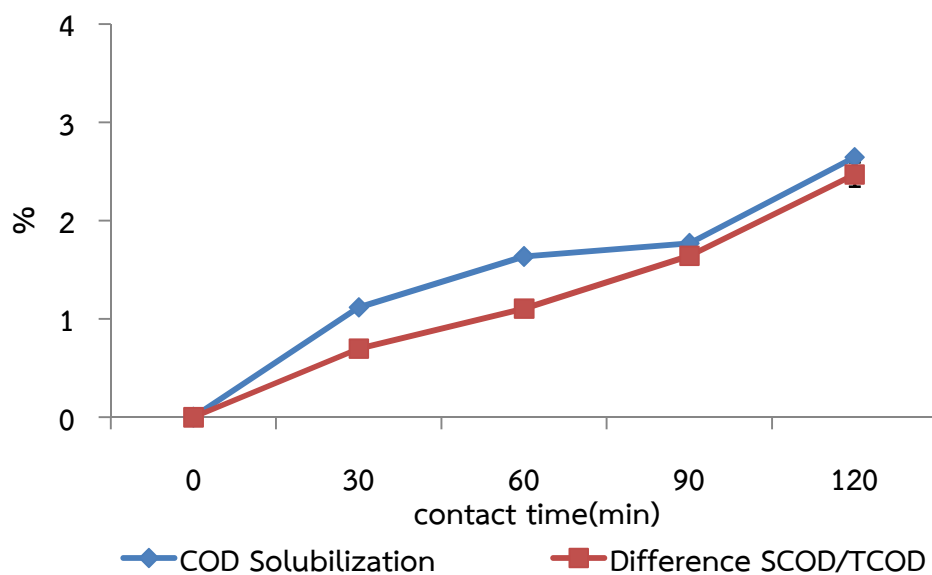
รูปที่ ข- 17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C



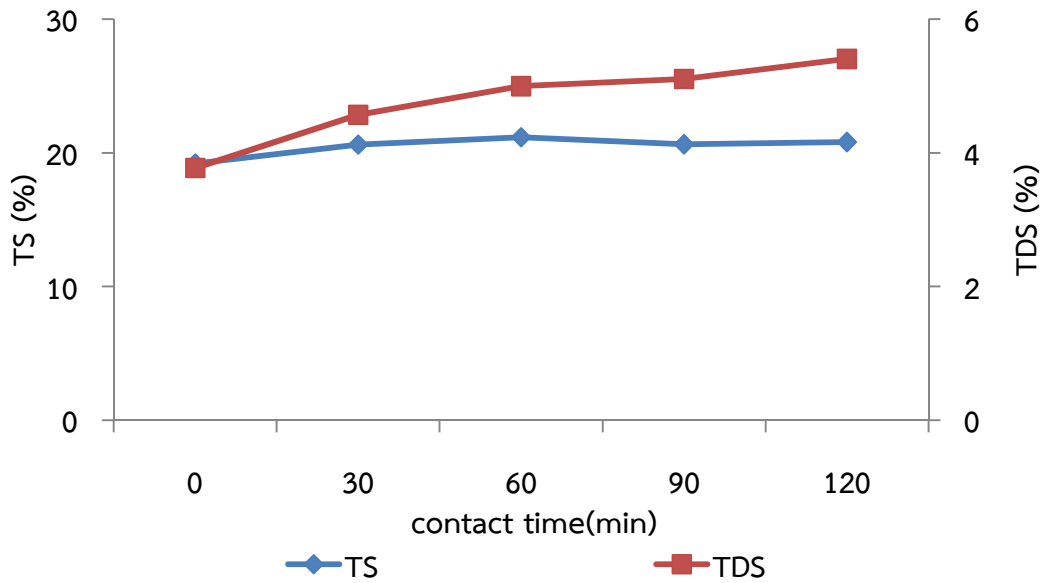
รูปที่ ข- 18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C



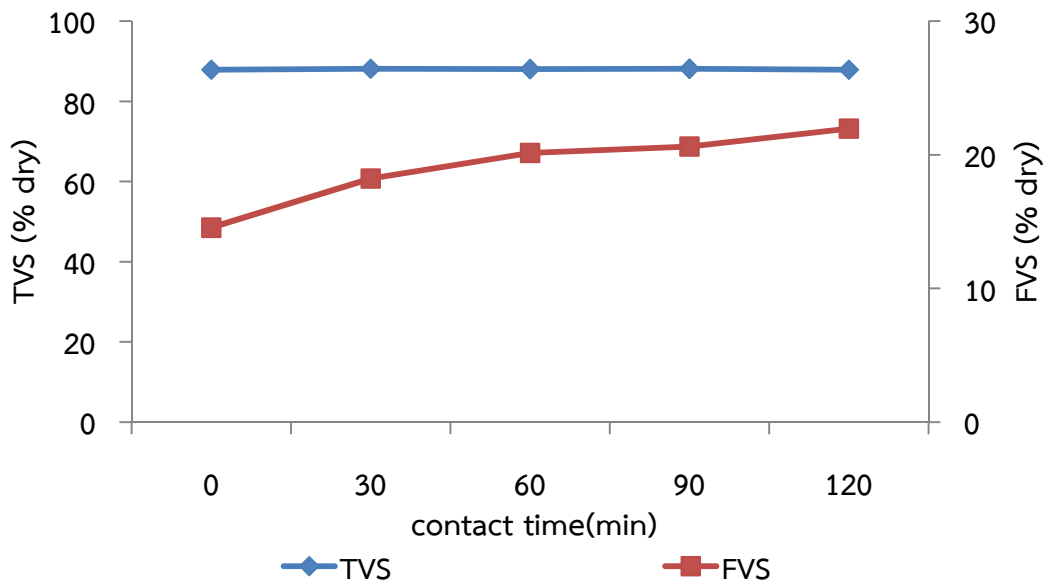
รูปที่ ข- 19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C



รูปที่ ข- 20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C

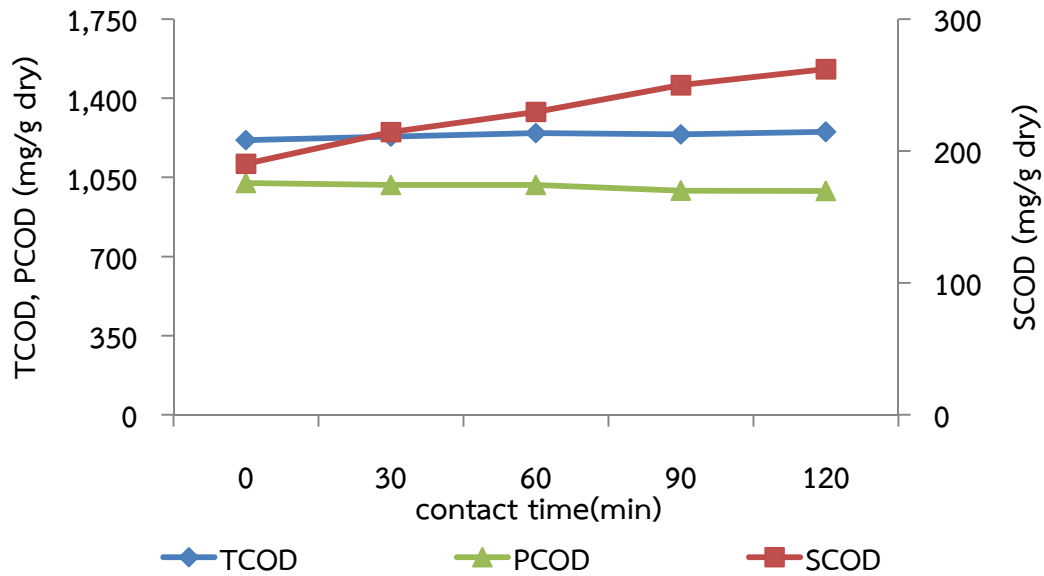


รูปที่ ข- 21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C

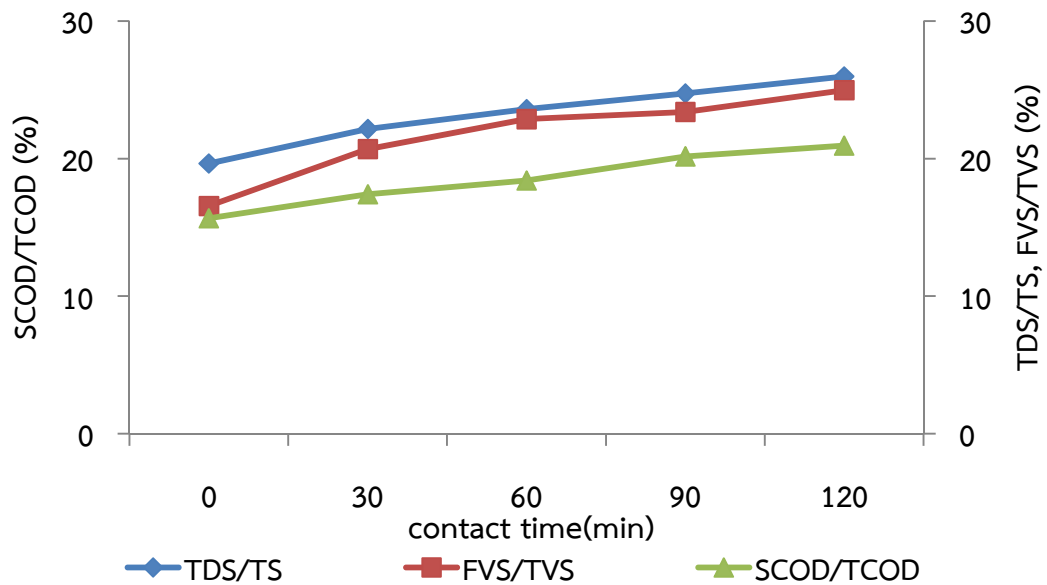


รูปที่ ข- 22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C

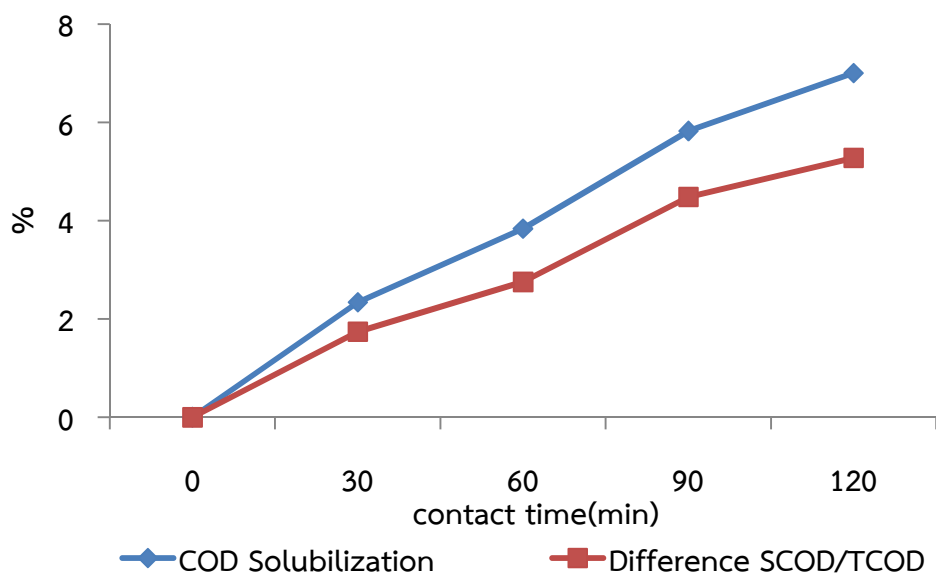




รูปที่ ข- 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C



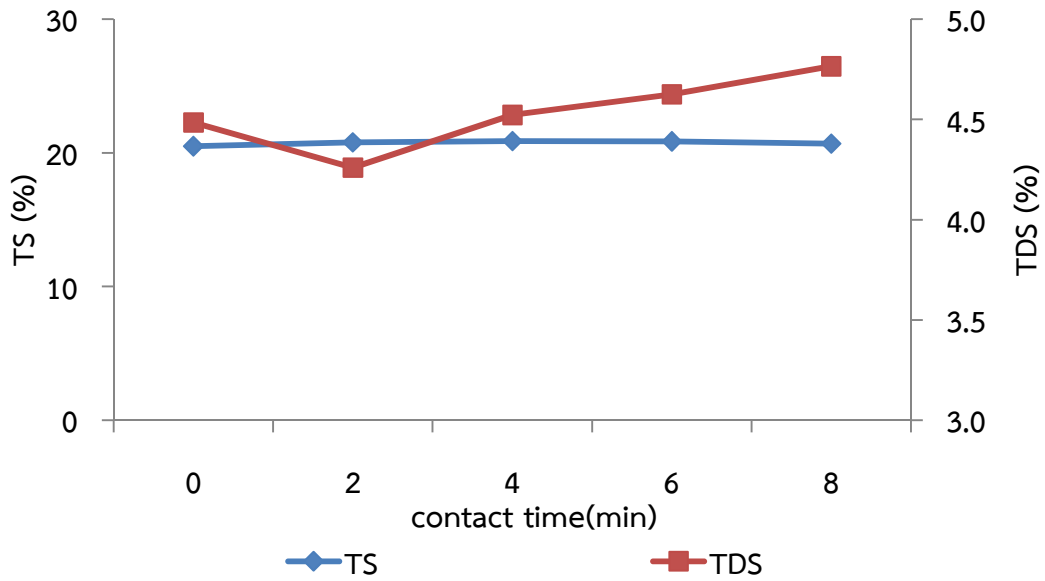
รูปที่ ข- 24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132°C



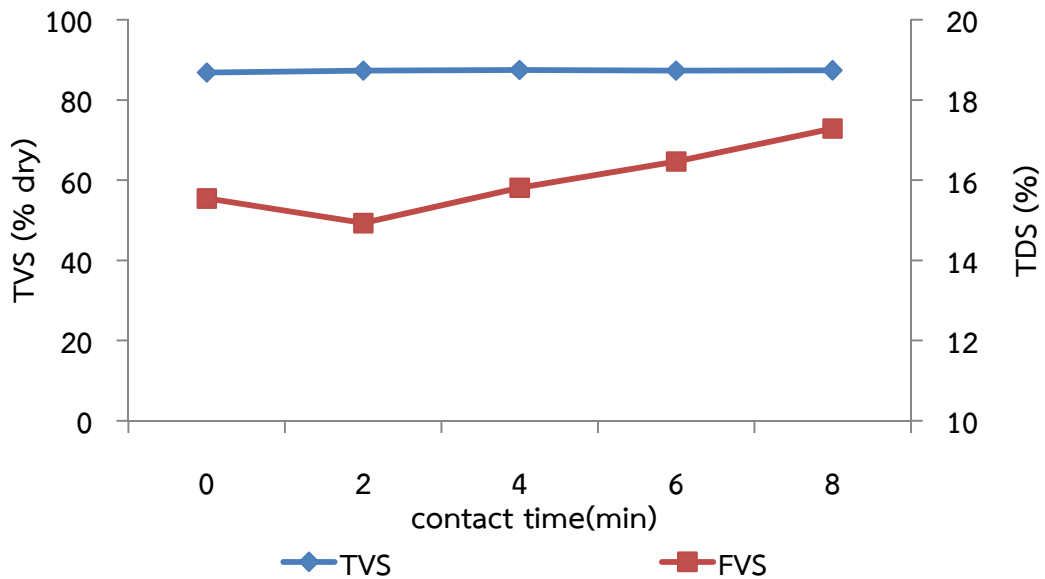
รูปที่ ข- 25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 132 °C

ตารางที่ ข- 1 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W

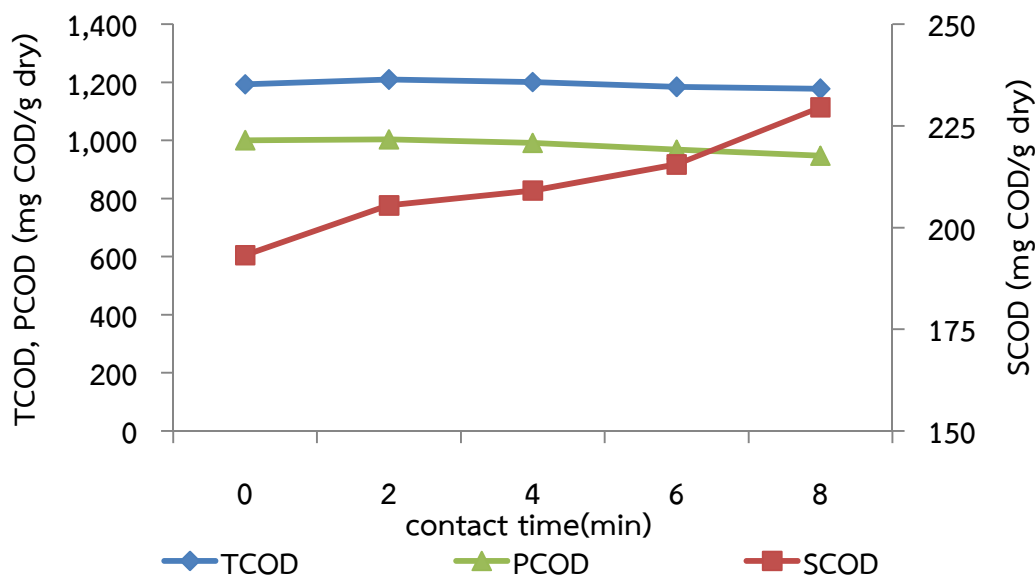
parameter	unit	contact time (min)				
		0	2	4	6	8
TS	%	20.5	20.8	20.9	20.8	20.7
TDS	%	4.48	4.26	4.52	4.63	4.77
TDS/TS	%	21.9	20.5	21.7	22.2	23.0
TVS	% dry	86.8	87.3	87.5	87.3	87.4
FVS	% dry	15.5	14.9	15.8	16.5	17.3
FVS/TVS	%	17.9	17.1	18.1	18.9	19.8
TCOD	mg/g dry	1,193	1,209	1,201	1,184	1,177
SCOD	mg/g dry	193	205	209	216	230
SCOD/TCOD	%	16.2	17.0	17.4	18.2	19.5
PCOD	mg/g dry	1,000	1,004	992	968	947
COD Solubilization	%	0.00	1.22	1.59	2.23	3.64
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.80	1.22	2.01	3.31
Difference TDS/TS	%	0.00	0.00	0.00	0.30	1.14
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.00	0.17	0.95	1.88



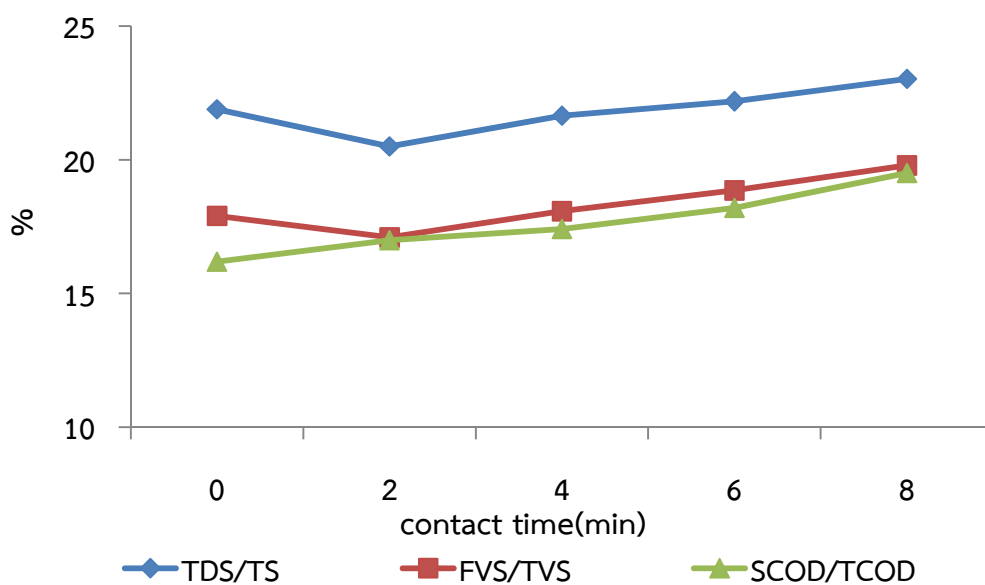
รูปที่ ข- 26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W



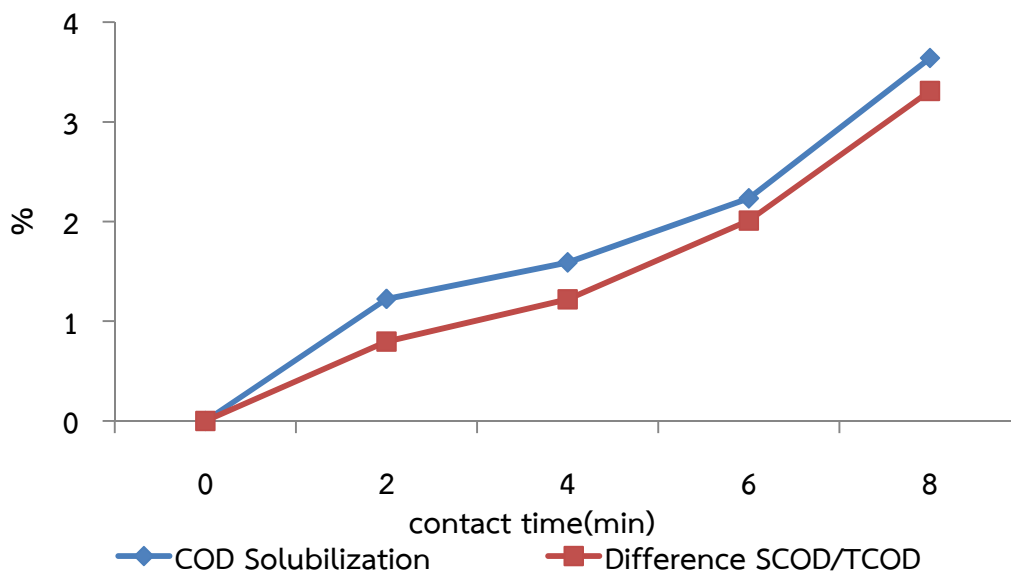
รูปที่ ข- 27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W



รูปที่ ข- 28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD, และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W



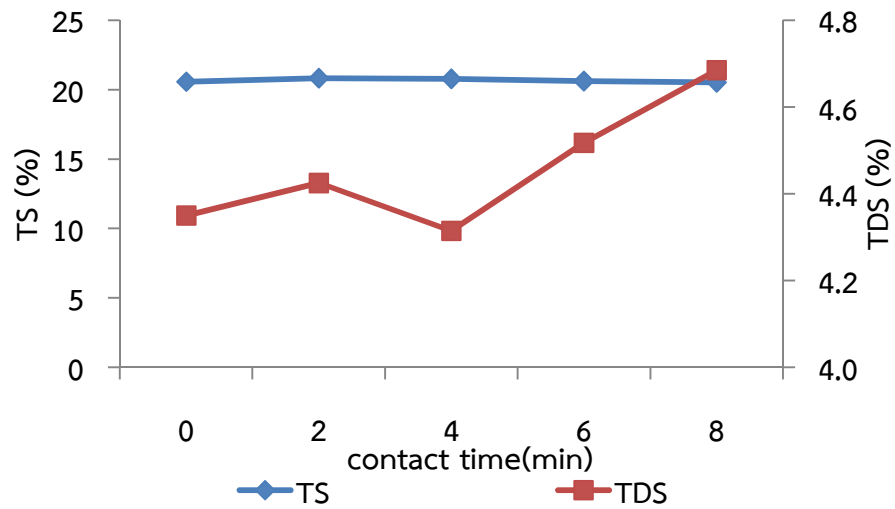
รูปที่ ข- 29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W



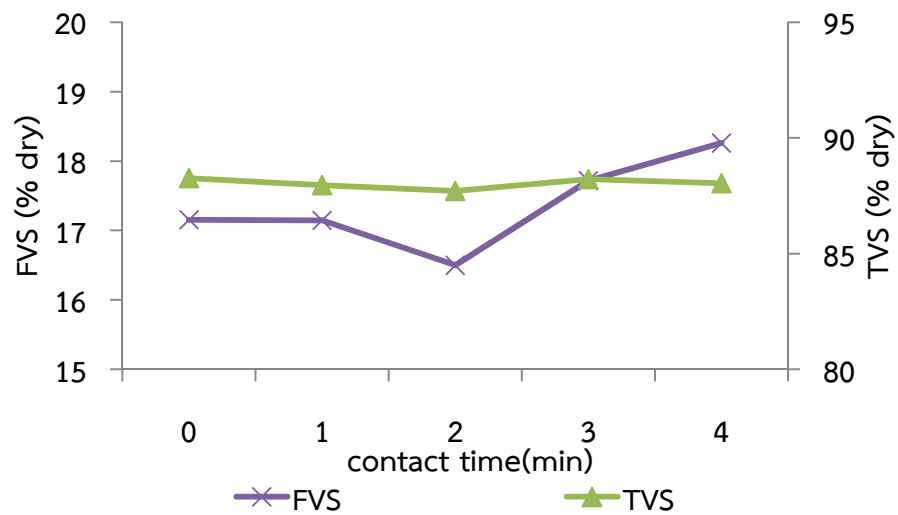
รูปที่ ข- 30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 160 W

ตารางที่ ข- 2 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W

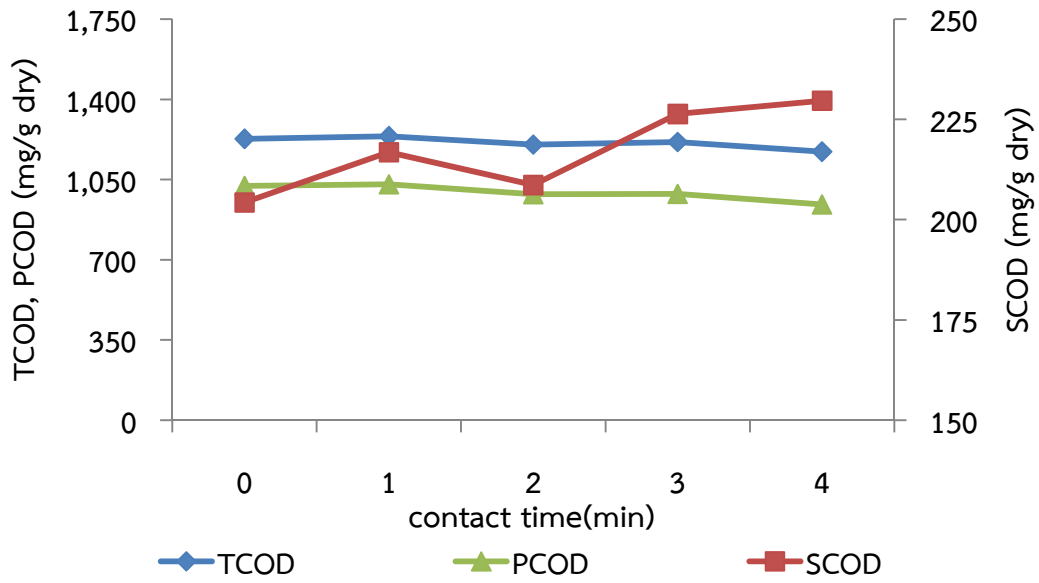
parameter	unit	contact time (min)				
		0	1	2	3	4
TS	%	20.6	20.8	20.8	20.6	20.5
TDS	%	4.35	4.42	4.31	4.52	4.69
TDS/TS	%	21.1	21.3	20.8	21.9	22.8
TVS	% dry	88.3	88.0	87.7	88.2	88.1
FVS	% dry	17.2	17.1	16.5	17.7	18.3
FVS/TVS	%	19.4	19.5	18.8	20.1	20.7
TCOD	mg/g dry	1,227	1,239	1,203	1,214	1,171
SCOD	mg/g dry	204	217	209	226	230
SCOD/TCOD	%	16.6	17.5	17.3	18.6	19.6
PCOD	mg/g dry	1,023	1,030	986	988	942
COD Solubilization	%	0.00	1.23	0.43	2.16	2.48
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.86	0.71	2.00	2.96
Difference TDS/TS	%	0.00	0.11	0.00	0.77	1.69
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.06	0.00	0.65	1.30



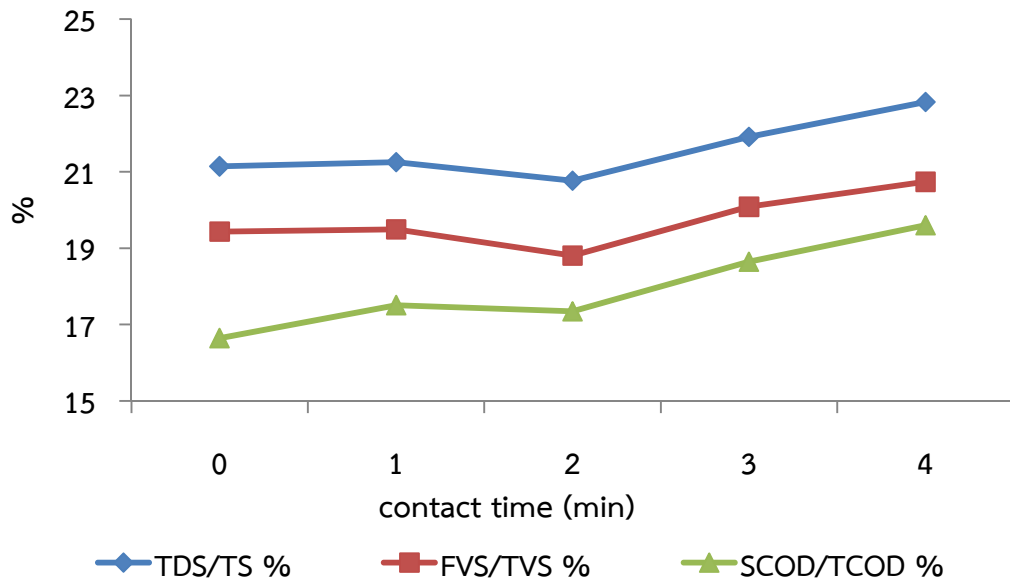
รูปที่ ข- 31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W



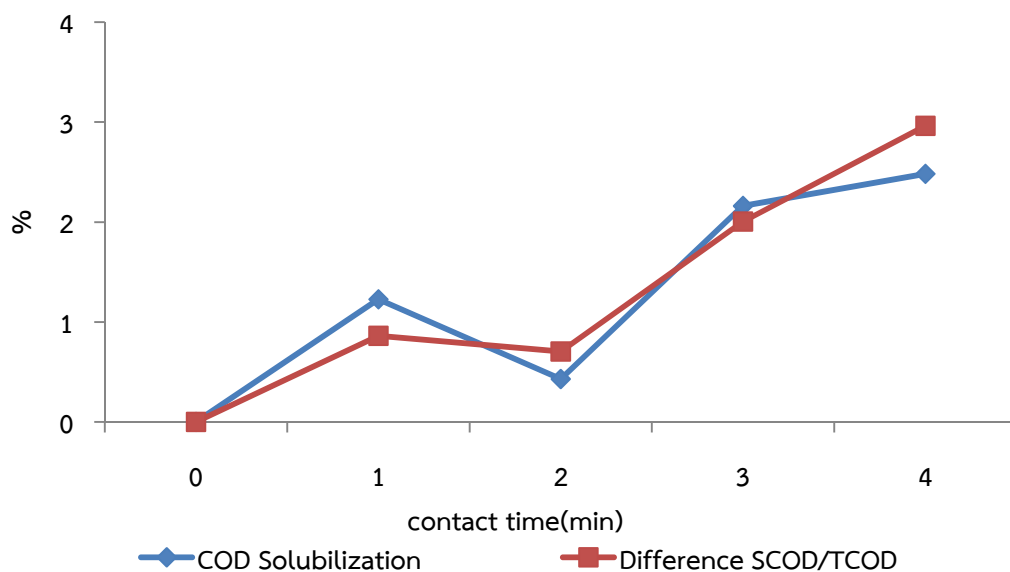
รูปที่ ข- 32 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W



รูปที่ ข- 33 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W



รูปที่ ข- 34 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W

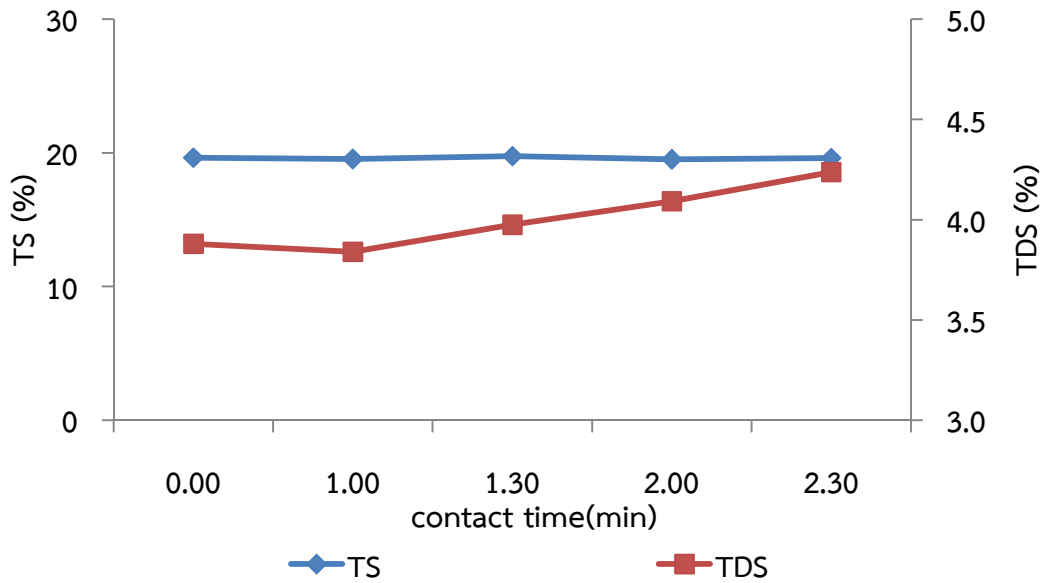


รูปที่ ข- 35 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 320 W

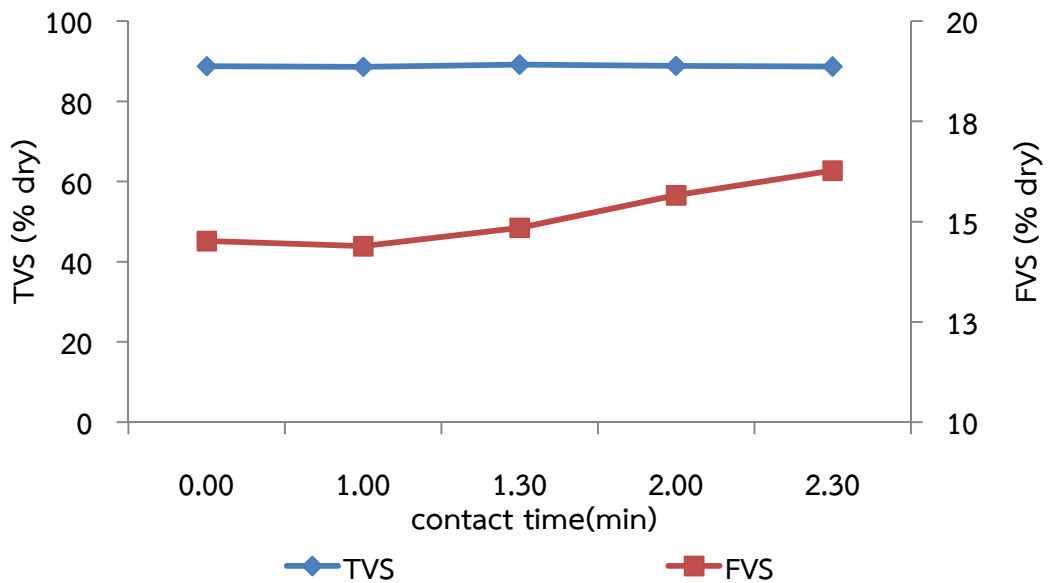
ตารางที่ ข- 3 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W

parameter	unit	contact time (min)				
		0.00	1.00	1.30	2.00	2.30
TS	%	19.6	19.5	19.8	19.5	19.6
TDS	%	3.88	3.84	3.97	4.09	4.24
TDS/TS	%	19.8	19.7	20.1	21.0	21.6
TVS	% dry	88.8	88.6	89.1	88.8	88.6
FVS	% dry	14.5	14.4	14.8	15.7	16.3
FVS/TVS	%	16.4	16.2	16.7	17.6	18.4
TCOD	mg/g dry	1,233	1,171	1,179	1,199	1,194
SCOD	mg/g dry	193	205	206	207	219
SCOD/TCOD	%	15.6	17.5	17.5	17.3	18.3
PCOD	mg/g dry	1,041	966	973	992	975
COD Solubilization	%	0.00	1.15	1.28	1.39	2.50
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	1.85	1.86	1.64	2.69
Difference TDS/TS	%	0.00	0.00	0.36	1.22	1.84
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.00	0.31	1.27	2.00

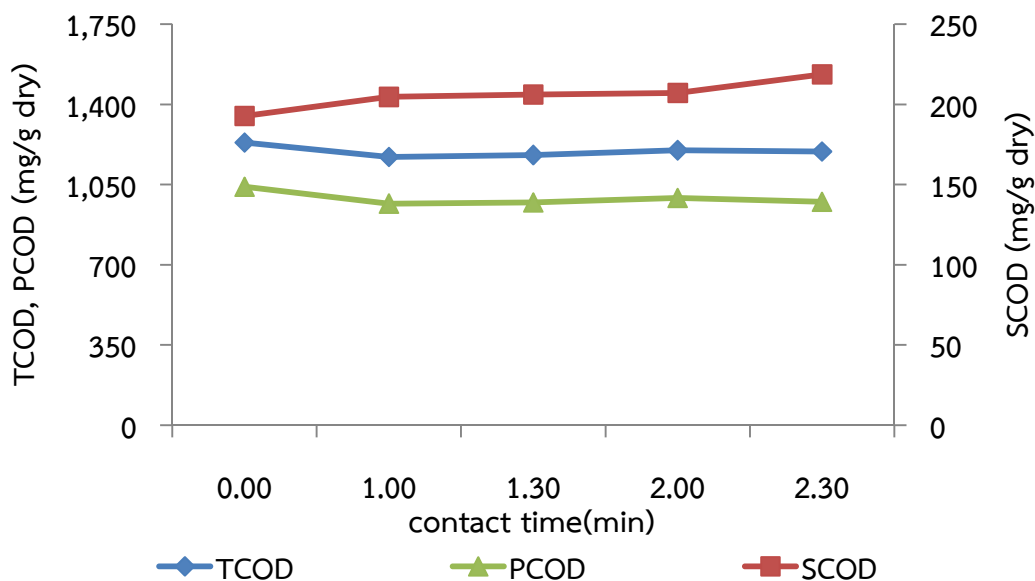




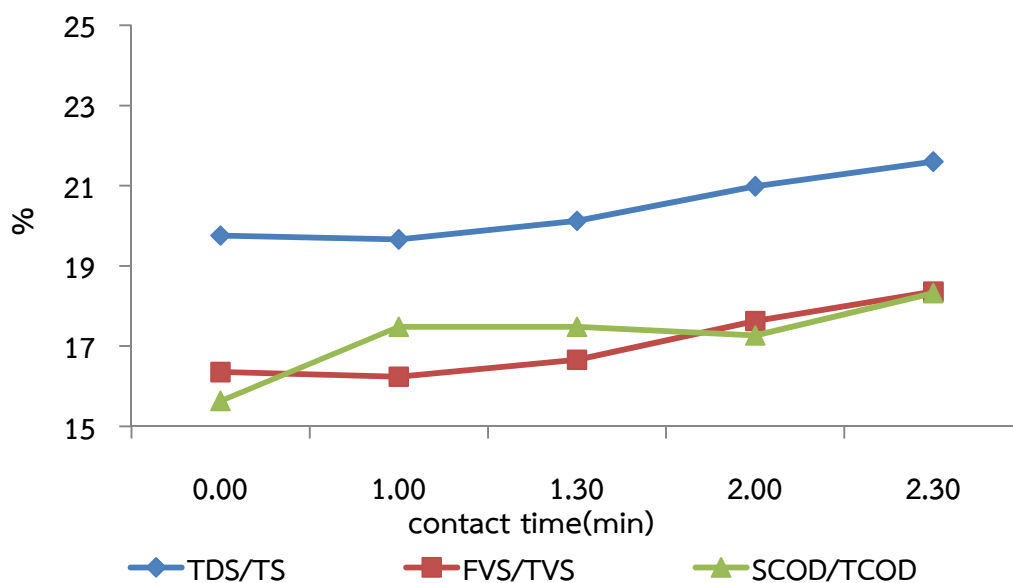
รูปที่ ข- 36 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และ Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W



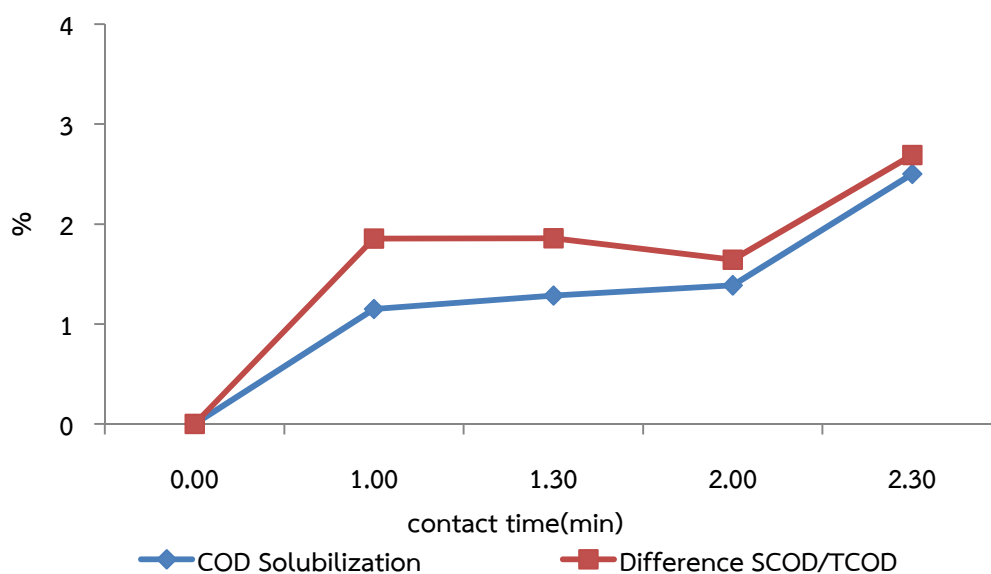
รูปที่ ข- 37 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W



รูปที่ ข- 38 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W



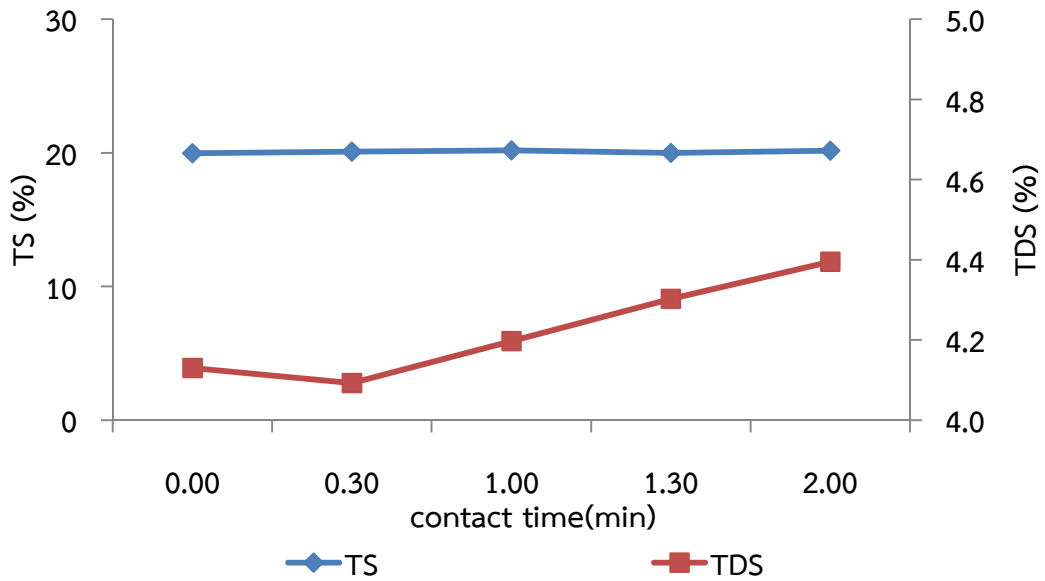
รูปที่ ข- 39 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W



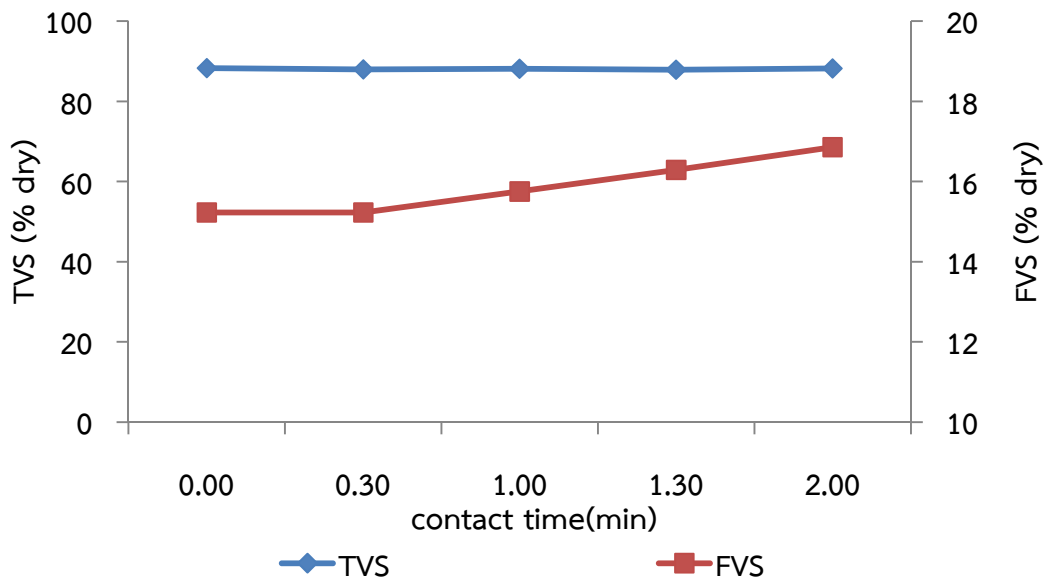
รูปที่ ข- 40 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 480 W

ตารางที่ ข- 4 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 640 W

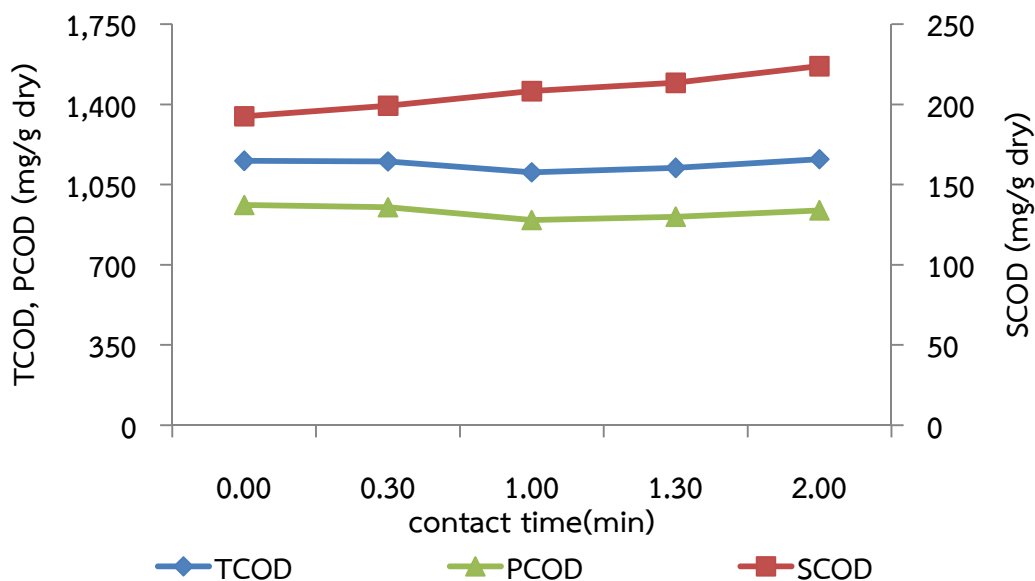
parameter	unit	contact time (min)				
		0.00	0.30	1.00	1.30	2.00
TS	%	20.0	20.1	20.2	20.0	20.2
TDS	%	4.13	4.09	4.20	4.30	4.40
TDS/TS	%	20.7	20.4	20.8	21.5	21.8
TVS	% dry	88.3	88.0	88.1	87.9	88.2
FVS	% dry	15.2	15.2	15.8	16.3	16.9
FVS/TVS	%	17.2	17.3	17.9	18.5	19.1
TCOD	mg/g dry	1,153	1,151	1,104	1,122	1,161
SCOD	mg/g dry	193	199	208	213	224
SCOD/TCOD	%	16.7	17.3	18.9	19.0	19.3
PCOD	mg/g dry	961	952	896	909	937
COD Solubilization	%	0.00	0.68	1.63	2.17	3.25
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	0.60	2.16	2.32	2.59
Difference TDS/TS	%	0.00	0.00	0.11	0.83	1.12
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.07	0.63	1.29	1.87



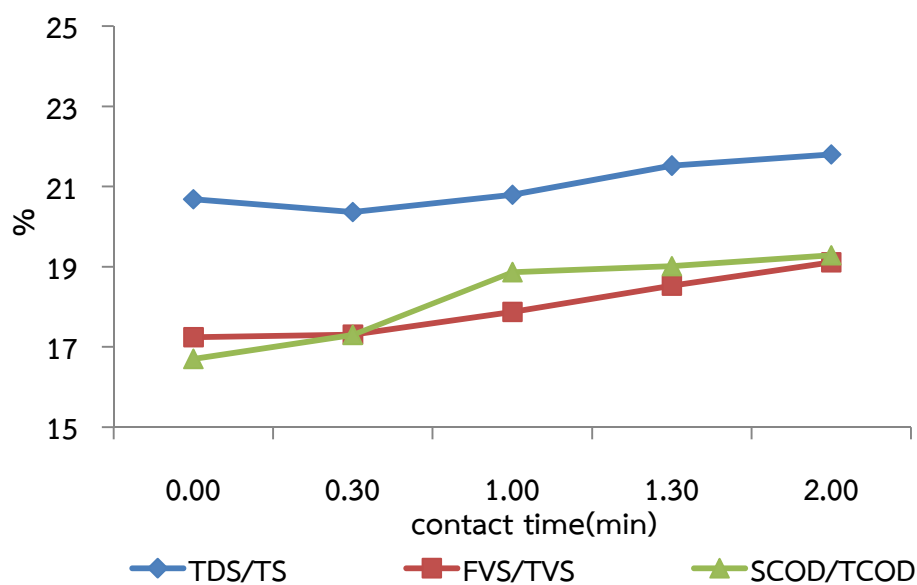
รูปที่ ข- 41 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid และค่า Total Dissolved Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W



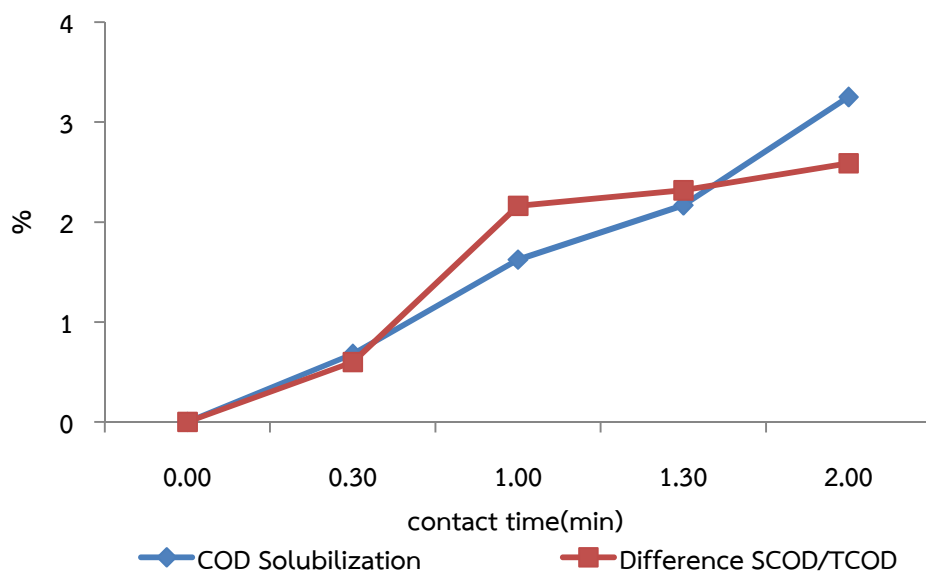
รูปที่ ข- 42 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Volatile Solid และ Filtrate Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W



รูปที่ ข- 43 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W



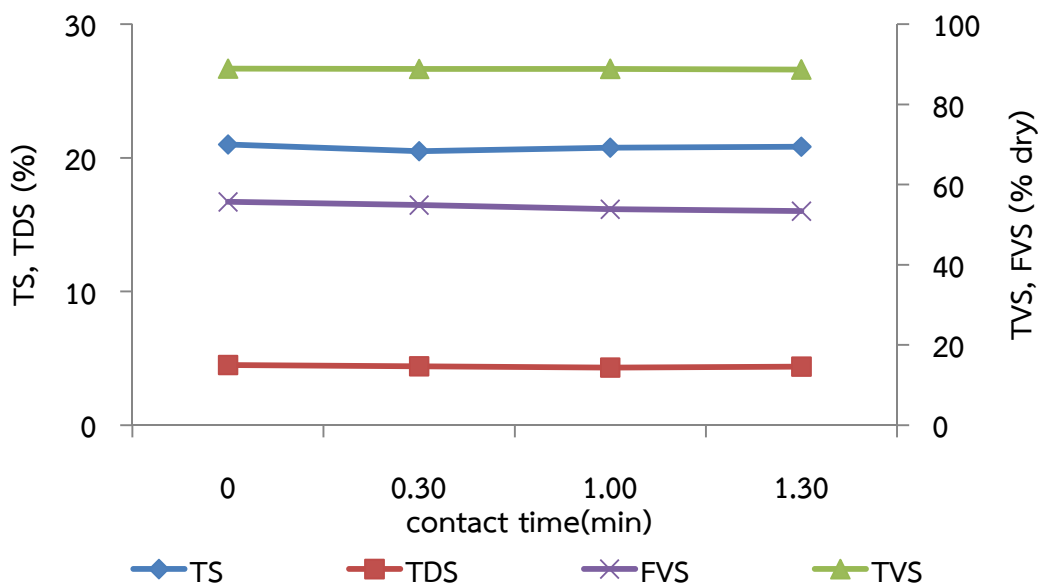
รูปที่ ข- 44 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W



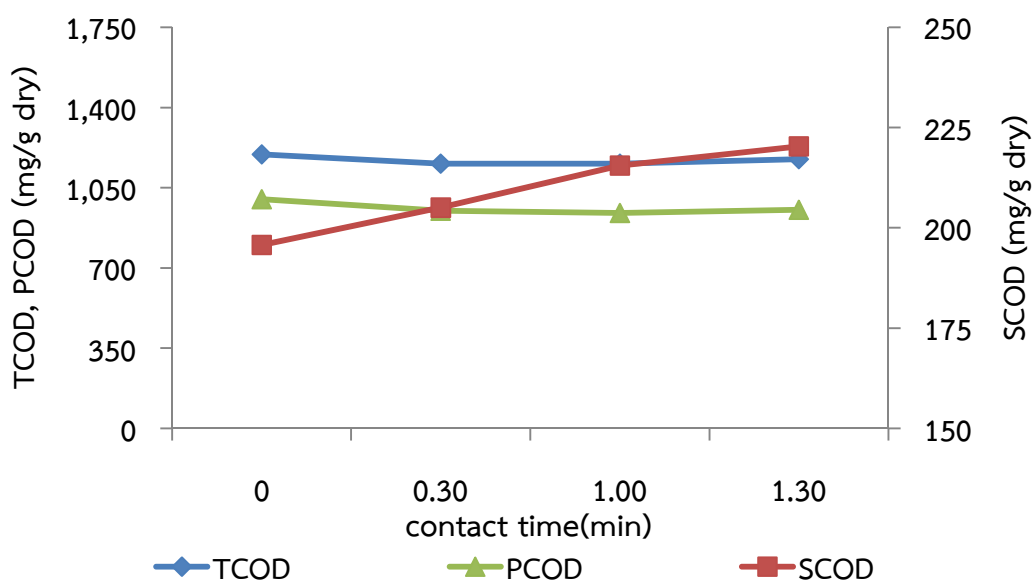
รูปที่ ข- 45 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 W

ตารางที่ ข- 5 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 W

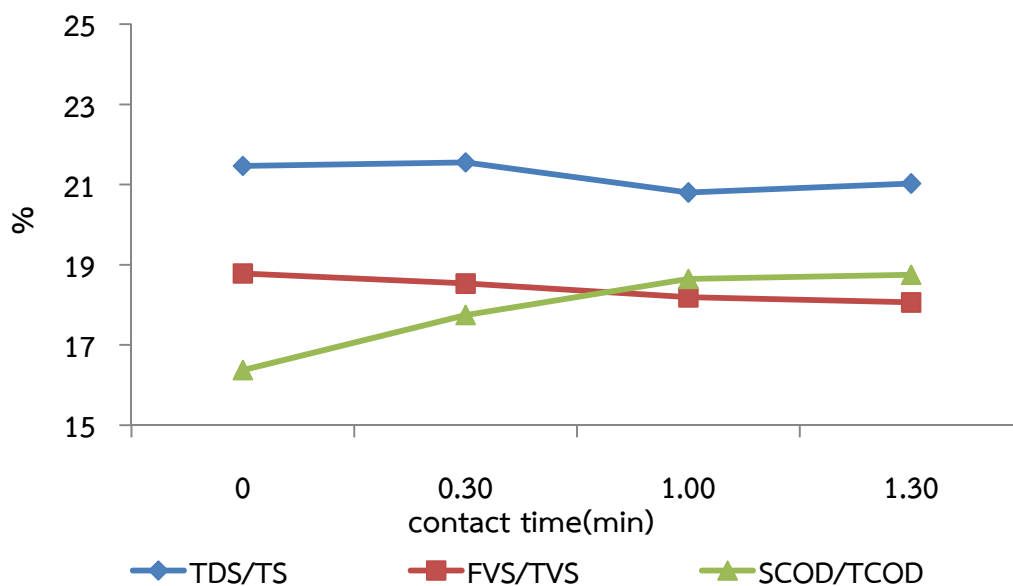
parameter	unit	contact time (min)			
		0	0.30	1.00	1.30
TS	%	21.0	20.5	20.8	20.8
TDS	%	4.51	4.42	4.32	4.38
TDS/TS	%	21.5	21.6	20.8	21.0
TVS	% dry	88.9	88.8	88.8	88.7
FVS	% dry	16.7	16.5	16.2	16.0
FVS/TVS	%	18.8	18.5	18.2	18.1
TCOD	mg/g dry	1,196	1,156	1,156	1,175
SCOD	mg/g dry	196	205	216	220
SCOD/TCOD	%	16.4	17.7	18.7	18.8
PCOD	mg/g dry	1,000	951	940	954
COD Solubilization	%	0.00	0.93	1.98	2.45
Difference SCOD/TCOD	%	0.00	1.37	2.28	2.39
Difference TDS/TS	%	0.00	0.09	0.00	0.00
Difference FVS/TVS	%	0.00	0.00	0.00	0.00



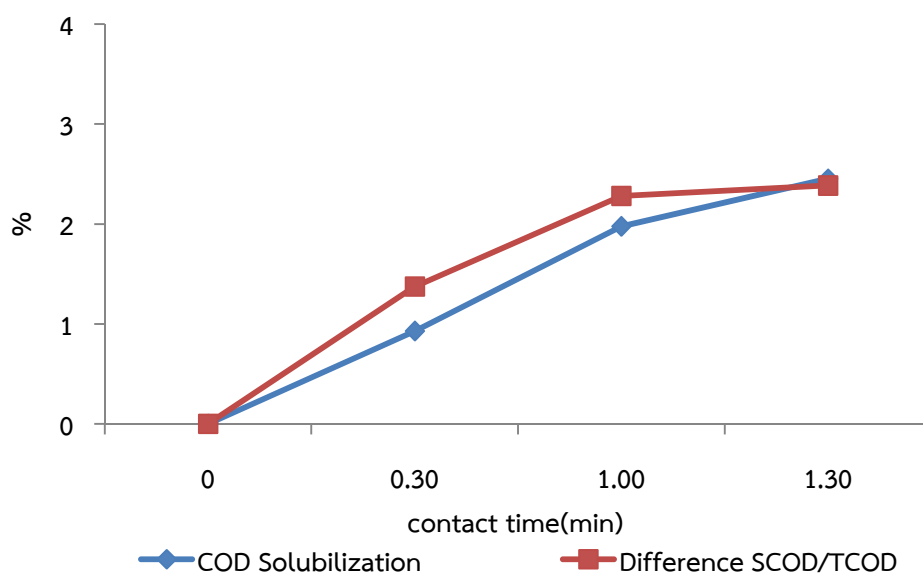
รูปที่ ข- 46 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Solid, Total Dissolved Solid, Total Volatile Solid และ Filtrated Volatile Solid ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 W



รูปที่ ข- 47 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total COD, Particle COD และ Soluble COD ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 W



รูปที่ ข- 48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ SCOD/TCOD, TDS/TS และ FVS/TVS ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W



รูปที่ ข- 49 การเปลี่ยนแปลงปริมาณผลต่างของ SCOD/TCOD เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และ COD Solubilization ตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 W



ตารางที่ ข- 6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SEED	2.6	2.6	2.6	2.7	3.0	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4
Control	12.0	57.6	81.4	92.4	100.7	113.2	125.0	152.5	170.2	184.7
S1T1	12.7	56.8	79.6	91.1	100.6	113.6	125.5	152.7	168.3	181.9
S2T1	13.5	58.9	79.4	89.7	98.8	113.0	125.3	151.8	166.4	178.5
S3T4	15.1	60.6	87.1	98.8	108.4	121.7	134.5	164.2	182.1	198.2
S4T1	15.3	60.0	89.3	101.5	111.8	125.0	137.3	167.3	185.7	202.8
S4T2	15.5	58.6	85.8	98.3	107.8	120.1	131.7	160.7	179.6	198.1
S4T3	16.2	58.9	86.4	98.6	108.6	121.8	134.8	164.1	181.6	197.2
S4T4	16.1	58.6	86.7	98.7	108.6	122.2	135.6	165.6	182.8	197.9

ตารางที่ ข- 6 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)								
	11	13	15	18	22	27	32	41	46
SEED	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	20.4
Control	193.9	205.3	215.0	226.5	241.5	259.1	267.0	273.5	276.4
S1T1	191.8	203.6	214.1	226.5	241.9	259.6	267.9	276.3	279.7
S2T1	187.0	198.4	208.9	221.7	238.3	255.1	263.6	272.3	276.5
S3T4	208.9	221.8	232.8	245.8	262.6	284.0	292.7	300.9	304.4
S4T1	214.4	228.6	239.8	252.3	268.2	291.2	301.3	310.3	314.5
S4T2	209.6	223.2	234.0	246.1	261.1	283.2	293.5	302.1	305.9
S4T3	207.5	219.5	229.8	241.5	256.2	278.1	288.1	298.0	302.2
S4T4	207.9	219.7	229.8	241.5	256.2	278.3	288.7	298.2	301.9

ตารางที่ ข- 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SEED	0.15	1.05	1.05	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Control	24.4	62.9	77.4	90.5	101.7	118.2	137.7	156.2	173.2
P1T1	22.8	65.3	80.4	94.3	105.4	121.5	141.2	160.3	178.2
P1T2	21.6	64.1	79.5	93.5	104.5	120.5	140.5	162.2	181.0
P1T3	22.5	66.7	82.7	96.9	107.7	122.6	141.8	163.4	183.9
P1T4	24.4	69.9	86.3	101.1	111.5	126.1	145.1	166.5	186.1
P2T4	26.2	74.7	93.0	109.4	120.2	134.8	154.2	178.6	202.0
P3T4	23.9	71.4	89.9	106.0	116.7	131.6	151.2	174.2	196.8
P4T4	24.2	72.5	91.1	106.7	117.2	131.2	149.8	172.4	194.9
P5T3	24.4	71.1	88.5	103.5	113.8	128.1	147.5	168.8	190.6

ตารางที่ ข- 7 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคแเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)								
	10	12	15	18	23	26	30	37	44
SEED	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	18.75
Control	189.8	201.6	216.0	226.9	245.0	258.6	266.0	272.6	278.3
P1T1	196.4	209.5	224.0	235.5	254.4	269.3	279.3	286.9	293.4
P1T2	199.0	211.3	225.1	236.8	256.3	271.3	281.6	288.9	295.4
P1T3	203.9	217.6	232.2	243.3	262.8	277.8	290.9	299.3	305.7
P1T4	207.0	221.5	237.4	249.7	269.6	284.4	299.2	307.4	314.3
P2T4	225.4	242.0	254.0	269.8	289.2	304.5	320.5	329.6	336.3
P3T4	219.3	235.8	251.1	263.0	282.8	298.4	311.5	319.6	325.4
P4T4	218.7	235.6	248.8	263.3	282.5	297.7	313.5	323.0	329.8
P5T3	212.9	228.7	240.7	255.7	277.9	294.6	308.5	317.7	324.8

ตารางที่ ข- 8 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเฉลี่ย (%) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดี แคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)						
	7	13	15	18	22	32	41
Seed	-	-	-	-	-	-	24.82
Control	31.92	56.64	52.75	52.67	70.47	65.32	55.28
S1T1	30.62	55.80	52.07	60.86	69.17	64.90	56.90
S2T1	27.39	53.07	56.94	54.83	71.65	63.79	60.73
S3T4	31.26	57.04	55.86	55.16	72.54	61.91	61.13
S4T1	28.84	54.96	52.93	56.16	69.22	65.49	61.01
S4T2	28.32	55.46	54.88	53.79	67.77	64.20	59.29
S4T3	25.94	57.96	53.71	57.67	68.25	64.08	60.72
S4T4	27.91	55.93	59.54	55.83	70.21	65.20	61.32

ตารางที่ ข- 9 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเฉลี่ย (%) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดี แคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)							
	2	7	12	15	18	26	30	37
Seed	-	-	-	-	-	-	-	28.59
Control	18.69	51.20	51.98	65.21	61.39	71.34	61.23	50.90
P1T1	17.64	51.70	52.29	65.62	61.58	72.81	59.97	56.68
P1T2	15.93	50.62	52.54	64.55	65.71	71.36	68.26	57.01
P1T3	16.32	46.47	52.09	70.06	67.11	71.34	70.26	59.23
P1T4	18.29	47.20	55.83	67.19	66.86	69.62	72.84	60.96
P2T4	18.17	53.03	57.64	66.67	65.95	69.22	70.37	61.76
P3T4	14.91	52.43	60.07	67.14	60.90	71.06	67.27	58.63
P4T4	14.14	48.16	59.05	65.42	67.15	69.22	71.92	60.23
P5T3	16.15	45.94	59.39	66.92	67.60	71.09	69.40	61.32

ตารางที่ ข- 10 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดี แคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Seed	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20
Control	3.80	18.30	25.89	29.40	32.06	36.05	39.78	55.34	65.39	73.58
S1T1	3.88	17.46	24.42	27.94	30.85	34.83	38.47	53.72	62.46	70.08
S2T1	3.70	16.13	21.74	24.56	27.06	30.93	34.30	48.34	56.09	62.46
S3T4	4.72	18.94	27.22	30.88	33.89	38.05	42.03	58.98	69.16	78.42
S4T1	4.40	17.30	25.74	29.27	32.23	36.03	39.60	56.05	66.10	75.46
S4T2	4.37	16.57	24.28	27.82	30.51	33.98	37.29	53.38	63.85	74.14
S4T3	4.20	15.27	22.40	25.58	28.17	31.61	34.98	51.93	62.14	71.17
S4T4	4.48	16.35	24.18	27.53	30.30	34.10	37.83	54.62	64.23	72.69

ตารางที่ ข- 10 (ต่อ) ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกาก ตะกอนดี แคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)								
	11	13	15	18	22	27	32	41	46
Seed	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	4.42
Control	78.82	85.26	90.38	96.43	107.00	118.51	123.67	127.25	128.84
S1T1	75.65	82.23	87.67	95.25	105.86	117.37	122.77	127.53	129.49
S2T1	66.99	73.04	78.99	86.05	97.95	108.67	114.06	119.37	121.92
S3T4	84.53	91.93	98.05	105.22	117.40	130.65	136.07	141.08	143.22
S4T1	81.82	89.57	95.49	102.54	113.55	128.63	135.22	140.75	143.29
S4T2	80.54	88.12	94.06	100.57	110.73	124.89	131.51	136.65	138.88
S4T3	77.20	84.18	89.70	96.42	106.45	120.50	126.93	132.93	135.48
S4T4	78.29	84.92	90.93	97.48	107.79	122.22	128.97	134.79	137.09

ตารางที่ ข- 11 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Seed	0.04	0.30	0.30	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Control	4.56	11.75	19.18	25.89	31.64	40.06	50.04	59.64	68.50	77.13
P1T1	4.02	11.52	19.34	26.53	32.27	40.59	50.75	60.73	70.09	79.64
P1T2	3.44	10.21	17.99	25.08	30.66	38.76	48.88	60.27	70.12	79.58
P1T3	3.66	10.89	18.30	24.90	29.94	36.84	45.80	57.06	67.70	78.13
P1T4	4.46	12.80	20.53	27.49	32.42	39.31	48.27	60.22	71.16	82.80
P2T4	4.75	13.56	23.30	31.97	37.67	45.41	55.69	69.77	83.25	96.74
P3T4	3.56	10.65	20.34	28.78	34.41	42.22	52.49	66.27	79.84	93.36
P4T4	3.43	10.25	19.25	26.77	31.83	38.57	47.51	60.90	74.19	88.22
P5T3	3.93	11.48	19.45	26.34	31.10	37.65	46.57	59.24	72.15	85.36

ตารางที่ ข-11 (ต่อ) ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย (ml) ของชุดการหมักแบบไร้ออกซิเจนของกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Sample	ระยะเวลาหมัก (วัน)							
	12	15	18	23	26	30	37	44
Seed	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	5.36
Control	83.26	92.29	99.29	112.25	121.92	126.45	129.84	132.75
P1T1	86.46	96.01	103.06	116.83	127.64	133.70	138.02	141.69
P1T2	86.08	94.97	102.66	116.58	127.29	134.29	138.46	142.17
P1T3	85.27	95.46	102.93	116.88	127.59	136.83	141.81	145.60
P1T4	90.90	101.58	109.81	123.67	134.01	144.76	149.76	153.98
P2T4	106.32	116.99	124.77	138.21	148.84	160.09	165.71	169.82
P3T4	103.27	113.55	120.78	134.86	145.97	154.76	159.51	162.94
P4T4	98.21	108.35	116.54	129.82	140.34	151.74	157.46	161.52
P5T3	94.75	105.12	112.93	128.75	140.60	150.28	155.90	160.25