



การบำบัดและการรีไซเคิลคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของ
โรงงานทูน่ากระป๋อง

Treatment and Recycling of Condensate from By-Products Production
Process of Canned Tuna Factory

ทรงฤทธิ์ ใบดีภูมิ
Songrit Baidugem

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Applied Chemistry

Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การบำบัดและการรีไซเคิลคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของ
โรงงานทูน่ากระป๋อง

Treatment and Recycling of Condensate from By-Products Production
Process of Canned Tuna Factory

ทรงฤทธิ์ ใบดู่แก้ว

Songrit Baidugem

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การบำบัดและการรีไซเคิลคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้
 ของ โรงงานท่อน้ำกระป๋อง
 ผู้เขียน นายทรงฤทธิ์ ใบดู่แก้ว
 สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จริยาบุรณ)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสาวภา โชติสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จริยาบุรณ)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ประวิทย์ คงจันทร์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ประวิทย์ คงจันทร์)

.....กรรมการ
 (ดร. สุพรรณณี จันทร์ภิรมณ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกกิง วงศ์ศิริโชติ)
 รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จรียาบุรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นายทรงฤทธิ์ ใบตุ้ม)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายทรงฤทธิ์ ใบบุณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การบำบัดและการรีไซเคิลคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของโรงงานท่อน้ำทิ้ง
ผู้เขียน	นายทรงฤทธิ์ ใบคู่แก้ว
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของโรงงานผลิตปลาท่อน้ำทิ้งเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา โดยการปรับลด pH และการดูดซับกลิ่นด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า Eunicarb ID900 งานวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาผลของ pH (7.0-9.0) ต่อการกำจัดซีโอดี (พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของกลิ่น) ด้วยถ่านกัมมันต์ในระดับห้องปฏิบัติการ ตามด้วยการศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่องในระดับกึ่งอุตสาหกรรมเพื่อบำบัดน้ำคอนเดนเสทในกระบวนการจริง จากการทดลองพบว่า ที่ pH ต่ำมีอัตราการดูดซับที่เร็วกว่า ในขณะที่ที่ pH สูงสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงสุดมากกว่า 90% การดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอมการดูดซับตามสมการฟรุนดลิช จากการศึกษาการบำบัดน้ำคอนเดนเสทในระดับกึ่งอุตสาหกรรมโดยใช้คอลัมน์ดูดซับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 150 เซนติเมตร พบว่าที่ทุกอัตราการไหลของน้ำคอนเดนเสท (ปรับ pH เป็น 7.3-7.5) ที่ใช้ในการทดลองคือ 0.5 - 2.5 ลบ.ม./ชม. สามารถกำจัดกลิ่นและน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดมีคุณภาพดีขึ้นและผ่านมาตรฐานน้ำใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาที่บริษัทกำหนด นอกจากนี้ได้ศึกษาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ต่อการบำบัดน้ำคอนเดนเสทแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม. ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่สอดคล้องกับอัตราการผลิตคอนเดนเสทจริงของบริษัทพบว่าวัฏจักรการเดินระบบอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับ 6 เดือน และหลังนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา พบว่าไม่มีผลกระทบต่อสินค้าน้ำมันปลาทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ เมื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทด้วยการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์สำหรับโรงงานจริงพบว่าต้นทุนในการบำบัดเท่ากับ 8.14 บาท/ลบ.ม. สามารถประหยัดต้นทุนของน้ำป้อนเข้ากระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำคอนเดนเสทได้ 202,500 บาท/ปี ให้ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.86 ปี

Thesis Title	Treatment and Recycling of Condensate from By-Products Production Process of Canned Tuna Factory
Author	Mr. Songrit Baidugem
Major Program	Applied Chemistry
Academic Year	2022

ABSTRACT

This research aimed to treat the condensate from by-product production processes of canned tuna factories and recycle to the fish oil production process by reducing pH and remove the odors by using commercial activated carbon, Eunicarb ID900. The research began with a study of the effect of pH (7-9) on the elimination of COD (parameters representing odors) and followed by a semi-industrial continuous adsorption study to treat condensate water in the actual process. The result showed that a faster absorption rate was achieved at lower pH while higher COD removal obtained at higher pH with the highest COD removal efficiency of 90%. The adsorption was fitted well with Pseudo-second order kinetic absorption and Freundlich's adsorption isotherm. The study of semi-industrial condensate water treatment using 15 cm diameter and 150 cm in height adsorbent columns revealed that at all the study range flow rate of condensate water (pH adjustment to 7.3 ± 0.1) of 0.5 - 2.5 m³/h, can effectively remove the pungent odor and produce the higher condensate water which meet the limitation of water for fish oil extraction manufacturing. Furthermore, the treatment system was continuously run at an actual condensate production rate at flow rate of 2.5 m³/h, and 6 months operation cycle was suggested. No effect in both quantitative and qualitative quality of fish oil was observed after processing with the treated condensate. The economic assessment for the actual plant evaluates the cost for condensate treatment of 8.14 Baht/m³, saving for the feed water and condensate treatment of 202,500 Baht/year, and a payback period of 2.86 years.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากการได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำที่ดี จาก รศ.ดร. รัตนา จริยาบุรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รศ.ดร. ประวิทย์ คงจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ดร. คอสิญะห์ สะนิ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ดูแลรวมทั้งการให้กำลังใจระหว่างการดำเนินงานวิจัย ทำให้สามารถมีพลังในการกลับมาสู้เมื่อการทดลองเกิดความผิดพลาด ส่งผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้ทดลองและติดตั้งระบบในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ที่แผนก Co-Product บริษัทโซติวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิตจำกัด (มหาชน) จึงขอขอบคุณฝ่ายวิศวกรรมซ่อมบำรุง และพนักงานแผนก Co-Product ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งระบบ และการช่วยเหลือในการปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนสำเร็จงานวิจัย

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2565 ที่ได้อุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากร แผนกวิชาเคมี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และหน่วยวิจัยการแปรรูปชีวมวลเพื่อพลังงานและเคมีภัณฑ์ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

ทรงฤทธิ์ ไบคุเกษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	5
ABSTRACT.....	6
กิตติกรรมประกาศ.....	7
สารบัญ 8	
สารบัญตาราง.....	10
สารบัญรูป.....	11
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสท.....	4
2.1.2 หลักการออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	5
2.1.3 หลักการออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	8
2.1.4 ทฤษฎีการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Principles of Adsorption).....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.2.1 ด้านสารประกอบระเหยของน้ำนิ่งปลา.....	21
2.2.2 ด้านการกำจัดกลิ่น.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	26
3.1.1 วัสดุ.....	26
3.1.2 สารเคมี.....	26
3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	27
3.2 การเก็บข้อมูลอัตราการผลิตและสมบัติของน้ำคอนเดนเสท.....	28
3.3 ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	29
3.4 ศึกษาการกำจัดซีไอทีในน้ำคอนเดนเสทด้วยถ่านกัมมันต์ในการทดลองแบบแบตช์.....	29

3.5 การออกแบบและติดตั้งระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสท	29
3.6 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้	30
3.7 ทดลองหาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการใช้บำบัดน้ำคอนเดนเสท	30
3.8 ศึกษาการนำน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดกลับไปใช้ใหม่	30
3.9 การประเมินระยะเวลาต้นทุนของระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสท	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 เก็บข้อมูลอัตราการผลิตและสมบัติของน้ำคอนเดนเสท	32
4.2 ศึกษาสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	33
4.3 การกำจัดซีโอทีในน้ำคอนเดนเสทด้วยถ่านกัมมันต์ในการทดลองแบบแบทช์	34
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับ	34
4.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับ	37
4.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics).....	38
4.4 ผลของอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้	39
4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อทดลองหาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการใช้ บำบัดน้ำคอนเดนเสท	41
4.6 การนำน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดกลับไปใช้ในการผลิตน้ำมันปลา	47
4.7 การประเมินระยะเวลาต้นทุนของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	59
ประวัติผู้เขียน	65

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต	4
ตารางที่ 2.2	สารประกอบระเหยได้และสารประกอบให้กลิ่นจากกระบวนการผลิตปลาหุ่น่ากระป๋อง	24
ตารางที่ 3.1	สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสท	28
ตารางที่ 4.1	สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทเปรียบเทียบกับมาตรฐานใช้ในกระบวนการผลิต	33
ตารางที่ 4.2	สมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์ (Eunicarb ID 900)	33
ตารางที่ 4.3	ค่าคงที่สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับ COD ในน้ำคอนเดนเสท	38
ตารางที่ 4.4	ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับ COD ในน้ำคอนเดนเสทที่ปริมาณถ่านกัมมันต์และ pH ต่าง ๆ	39
ตารางที่ 4.5	ผลของการปรับ pH และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้	40
ตารางที่ 4.6	สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทก่อนและหลังระบบบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ที่อัตราการไหลน้ำคอนเดนเสท 2.5 ลบ.ม./ชม.	42
ตารางที่ 4.7	องค์ประกอบของธาตุในถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท	44
ตารางที่ 4.8	สมบัติทางกายและเคมีของสินค้าน้ำมันปลาที่ใช้ น้ำคอนเดนเสทหลังผ่านการบำบัด	49
ตารางที่ 4.9	ต้นทุนการติดตั้งเริ่มต้นของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท	50
ตารางที่ 4.10	การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่อปีของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท	51
ตารางที่ 4.11	การวิเคราะห์ต้นทุนรวม ประโยชน์ที่ได้รับและระยะเวลาคืนทุนของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท	51

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	แผนผังการผลิตและการเกิดน้ำคอนเดนเสทโดยย่อ (เส้นทึบ แสดงกระบวนการผลิตปัจจุบันเส้นประ แสดงถึงแนวคิดของการบำบัดน้ำและการนำน้ำคอนเดนเสทไปใช้ประโยชน์)	2
รูปที่ 2.1	ถังกรองน้ำแบบไฟเบอร์กลาส (ก) และถังแบบสแตนเลส (ข)	5
รูปที่ 2.2	ระบบกรองน้ำแบบถังกรอง (Filtration System)	6
รูปที่ 2.3	ระบบกรองน้ำแบบ RO (Reverse Osmosis System)	7
รูปที่ 2.4	ระบบกรองน้ำแบบ UF (Ultra Filtration System)	8
รูปที่ 2.5	ลักษณะของรูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์	9
รูปที่ 2.6	ถ่านกัมมันต์แบบผง (ก), ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (ข) และถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (ค)	10
รูปที่ 2.7	แบบจำลองวัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเมื่อดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่เป็นไอหรือก๊าซ	13
รูปที่ 2.8	การจำแนกประเภทของไอโซเทอมของการดูดทางกายภาพ	14
รูปที่ 2.9	ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	17
รูปที่ 2.10	ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	17
รูปที่ 2.11	ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	18
รูปที่ 2.12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช	19
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	25
รูปที่ 3.2	ระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท (a) ไดอะแกรม (b) ระบบจริงที่ติดตั้ง ณ กระบวนการผลิต	30
รูปที่ 4.1	ไอโซเทิร์มการดูดซับ (+) และการคายซับ (-) ของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77.9 K ของถ่านกัมมันต์ Eunicarb ID 900	34
รูปที่ 4.2	การลดลงของซีโอดีในน้ำคอนเดนเสทเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน ที่การปรับค่า pH (a) pH= 7, (b) pH= 8 และ (c) pH = 9	35
รูปที่ 4.3	ผลของ pH เริ่มต้นของคอนเดนเสทและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต่อร้อยละการกำจัดซีโอดี ที่เวลา 4 ชั่วโมงของการทดลอง	36

รูปที่ 4.4	ผลของ pH เริ่มต้นของคอนเดนเสทและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต่อปริมาณการดูดซับซีโอดีต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 4 ชั่วโมงของการทดลอง	37
รูปที่ 4.5	ลักษณะฟองและฟิล์มบนผิวของน้ำคอนเดนเสทที่ pH สูง	38
รูปที่ 4.6	น้ำคอนเดนเสท (a) ก่อนบำบัด และ (b) หลังบำบัด	40
รูปที่ 4.7	โครมาโทแกรม GC-MS ของน้ำคอนเดนเสทก่อนบำบัด	43
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของถ่านกัมมันต์ (a) ก่อนบำบัด และ (b) หลังบำบัด	43
รูปที่ 4.9	คุณสมบัติของน้ำคอนเดนเสทก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 180 วัน ที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม	47

บทที่ 1

บทนำ

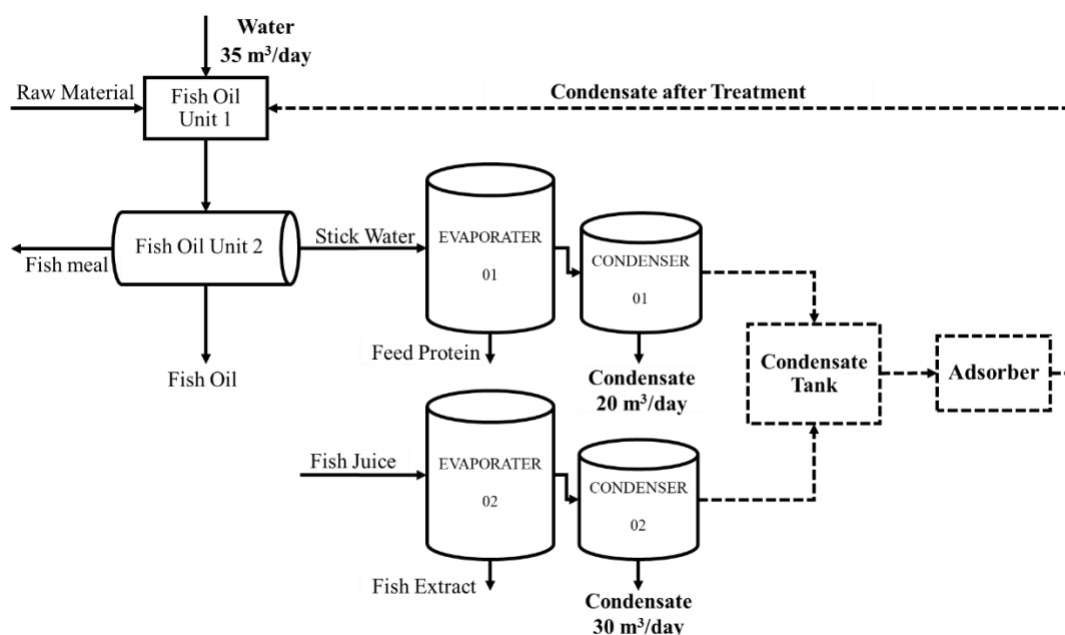
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปีพ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีการส่งออกปลาทูน่าและผลิตภัณฑ์มากถึง 94% (ปริมาณ 391,465 ตัน มูลค่า 50,298 ล้านบาท) และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตลอดเวลา (นเรศ, 2562) ในสภาวะที่ประชากรมีความต้องการอาหารแปรรูปปลาทูน่ากระป๋องมากขึ้น การแข่งขันของอุตสาหกรรมการผลิตปลาทูน่ากระป๋องก็สูงขึ้นตาม ส่งผลให้หลาย ๆ องค์กร มีการพัฒนา ปรับปรุง คิดค้น นวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

จากกรณีศึกษาการผลิตปลาทูน่ากระป๋องของบริษัทโซติวิวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิต จำกัด (มหาชน) โดยตั้งอยู่ในจังหวัดสงขลาของประเทศไทย ซึ่งเป็นบริษัทที่มีขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิต 400 ตัน/วัน พบว่าในส่วนของผลผลิตสินค้าผลพลอยได้ของบริษัทที่มีปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ประมาณ 35 ลบ.ม./วัน เพื่อผลิตสินค้าน้ำมันปลาจากเศษปลาที่เหลือจากกระบวนการผลิต (ได้แก่ หัวปลา หนังกปลา ก้างปลา เป็นต้น) ซึ่งในขณะเดียวกันจะมีน้ำคอนเดนเสทเกิดขึ้นจากกระบวนการระเหยน้ำโปรตีนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นประมาณ 20 ลบ.ม./วัน นอกจากนี้ยังมีในส่วนของน้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการระเหยน้ำนิ่งปลาเพื่อเพิ่มความเข้มข้นอีกประมาณ 30 ลบ.ม./วัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยน้ำคอนเดนเสทจากทั้งสองแหล่งนี้จะถูกส่งต่อไปยังบ่อบำบัดน้ำเสียรวมของบริษัท ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดหากสามารถบำบัดน้ำคอนเดนเสทได้ ก็จะสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าผลพลอยได้ของทางบริษัทได้อย่างเพียงพอ

เนื่องจากน้ำคอนเดนเสทดังกล่าวเป็นน้ำที่ได้จากกระบวนการระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปทดแทนการใช้น้ำในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาเพื่อใช้ลำเลียงเศษปลา การต้มเศษปลาและใช้สกัดน้ำมันออกจากเศษปลาในขั้นตอนการแยก อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำคอนเดนเสทเบื้องต้นพบว่า มีค่าเหล็กทั้งหมด, ความกระด้าง, คลอไรด์, คลอรีน, และความขุ่น ผ่านค่ามาตรฐานน้ำดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าผลพลอยได้ ของบริษัทโซติวิวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิต จำกัด(มหาชน) ในขณะที่ค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทมีค่าเท่ากับ 9.2 โดยประมาณ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำใช้ที่บริษัทกำหนดคือ 6.5-8.0 และที่สำคัญเนื่องจากน้ำคอนเดนเสทเกิดในขั้นตอนการระเหยของน้ำโปรตีนและน้ำนิ่งปลา ทำให้สารระเหยต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำทั้งสองชนิดระเหยไปกับน้ำคอนเดนเสทด้วยส่งผลให้น้ำคอนเดนเสทมีกลิ่นฉุน ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน จากการทดลองเบื้องต้นในการนำน้ำคอนเดนเสทมาใช้สกัดน้ำมันปลา

ในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถสกัดน้ำมันปลาได้มากถึง 5.8-6.2% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตน้ำมันปลาจริงในระดับโรงงาน แต่กลิ่นของน้ำมันปลาที่ได้มีกลิ่นฉุนของน้ำคอนเดนเสทหลงเหลือทำให้มีผลกระทบต่อคุณภาพด้านกายภาพของสินค้า นอกจากนี้จากการศึกษาเบื้องต้นยังพบว่า จากการตั้งน้ำคอนเดนเสททิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องกลิ่นฉุนเป็นมลภาวะทางอากาศ ดังนั้นน้ำคอนเดนเสทจึงไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง ต้องผ่านการกำจัดกลิ่นออกก่อนนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา



รูปที่ 1.1 แผนผังการผลิตและการเกิดน้ำคอนเดนเสทโดยย่อ (เส้นทึบแสดงกระบวนการผลิตปัจจุบัน เส้นประแสดงถึงแนวคิดของการบำบัดน้ำและการนำน้ำคอนเดนเสทไปใช้ประโยชน์)

การดูดซับเป็นวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง มีค่าใช้จ่ายน้อยในการติดตั้ง และการควบคุมเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วย โดยวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีรูพรุนจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสูง จึงมีคุณสมบัติในการดูดซับสี กลิ่น และสารแขวนลอยต่าง ๆ รวมทั้งสารอินทรีย์และโลหะหนักได้เป็นอย่างดี มีรายงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่รายงานว่าสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดกลิ่นในน้ำ Siwila and Brink (2019) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพสำหรับผลิตน้ำดื่มพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง (ProCarb-900) พบว่าสามารถกำจัดสีและกลิ่นได้ รวมถึงสามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่า 99% Feng et al. (2020) ศึกษาการกำจัดสารประกอบที่ก่อให้เกิดกลิ่นจำนวน 10 ชนิด ที่พบในน้ำดื่ม โดยใช้ชานโนฟิลเตรชัน

ร่วมกับถ่านกัมมันต์ พบว่าสามารถกำจัดกลิ่นได้มากกว่า 90% Xia et al. (2020) ศึกษาการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่มพบว่าการใช้โอโซนตามด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดกลิ่นในน้ำดื่มได้เป็นอย่างดี สำหรับในระดับอุตสาหกรรมนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าการลดกลิ่นในน้ำสามารถใช้ระบบถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถปรึกษาผู้เชี่ยวชาญที่เป็นตัวแทนจำหน่ายระบบถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำที่จะนำไปบำบัด และยังคงต้องทำการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่สามารถลดกลิ่นได้ดีที่สุดโดยใช้คอลัมน์ถ่านกัมมันต์ และหาอายุการใช้งานสำหรับการบำบัดน้ำเพื่อนำข้อมูลไปประกอบในการคำนวณจุดคุ้มทุน และสำหรับงานวิจัยนี้ยังต้องมีการพิสูจน์ว่าน้ำคอนเดนเสทที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลของการปรับ pH และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้และคุณภาพในการนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา
- 2) เพื่อประเมินระยะเวลาคืนทุนของระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสทเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถปรับสภาพน้ำคอนเดนเสทให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของบริษัทโซติวิวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิต จำกัด(มหาชน)
- 2) สามารถนำน้ำคอนเดนเสทหลังปรับสภาพไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาได้
- 3) สามารถลดต้นทุนการใช้น้ำในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาและการบำบัดน้ำคอนเดนเสทได้ 202,500 บาทต่อปี
- 4) สามารถกำหนดขั้นตอนการบำบัดน้ำคอนเดนเสทเพื่อให้บริษัทนำไปใช้ได้อย่างยั่งยืน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสท

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการนำน้ำคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำนิ่งปลาเข้มข้น (Fish Extract Process) และน้ำโปรตีนเข้มข้น (Feed Protein Process) โดยน้ำคอนเดนเสทจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการระเหยน้ำออกด้วยเครื่องระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ เมื่อน้ำที่ผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์ถูกระเหยกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำทั้งหมดก็จะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อให้ไอน้ำกลายเป็นน้ำคอนเดนเสท และจากนั้นระบบก็จะส่งน้ำคอนเดนเสทออกจากกระบวนการ

จากการเก็บตัวอย่างคอนเดนเสท และทำการทดสอบเบื้องต้นโดยการสัมผัส ณ จุดพักน้ำคอนเดนเสทก่อนปล่อยทิ้ง พบว่าน้ำคอนเดนเสทมีกลิ่นฉุนที่เด่นชัดของกลิ่นคาวปลาบูด และมีกลิ่นของแอมโมเนียที่โดดเด่น เมื่อสัมผัสด้วยมือพบว่าจะมีความเมือกติดมือ จากนั้นจึงได้เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสท (จำนวน 14 ครั้ง) พบว่ามีสมบัติผ่านมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ยกเว้นค่า pH และกลิ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องลดค่า pH และกลิ่นของคอนเดนเสทก่อนที่จะนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต

Properties	Condensate wastewater	Limitation of water for fish oil extraction manufacturing
pH	9.12-9.83	6.5-8.0
Total Iron (ppm as Fe ²⁺)	0.09-0.16	≤ 0.3
Total Hardness (ppm as CaCO ₃)	3.6-13.4	≤ 60
Chloride (ppm as Cl ⁻)	11-19	≤ 200
Residual Free Chlorine (ppm)	0.14-0.23	0.2-2.0
Conductivity (μS/cm)	378-496	Not assigned
Odor	Abnormal (fishy)	Normal

2.1.2 หลักการออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ระบบกรองน้ำโดยทั่วไปมีถึงบรรจุ 2 ประเภท ได้แก่ ถังไฟเบอร์กลาสและถังสแตนเลส ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เช่น ข้อดีของถังกรองไฟเบอร์กลาสคือ ราคาถูกกว่า ติดตั้งง่าย ใช้พื้นที่น้อย ขั้นตอนการใช้งานง่ายกว่ารุ่นสแตนเลส เคลื่อนย้ายสะดวก น้ำหนักเบากว่าแบบสแตนเลส ข้อเสียคือ ความทนทานอาจน้อยกว่าแบบสแตนเลส ในขณะที่ข้อดีของถังแบบสแตนเลสคือ ทนทาน แข็งแรง ข้อเสียคือ ใช้งานจะยุ่งยาก ราคาแพง ใช้เวลานานในการติดตั้ง น้ำหนักมากเคลื่อนย้ายลำบาก ในการติดตั้งผู้ใช้งานจึงต้องพิจารณาถึงต้นทุนในการติดตั้ง พื้นที่ติดตั้ง และการใช้งานของระบบกรองน้ำ โดยลักษณะของถังกรองทั้ง 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ถังกรองน้ำแบบไฟเบอร์กลาส (ก) และถังแบบสแตนเลส (ข)
ที่มา: หจก.แอล เอส วอเตอร์ เจ เทคโนโลยี (ประเทศไทย)

ในการเลือกใช้สารกรองน้ำขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำหลังผ่านระบบกรองระบบน้ำและน้ำตั้งต้นที่นำมาผ่านระบบกรองน้ำ ดังนั้นการออกแบบระบบกรองน้ำจึงมีการติดตั้งที่แตกต่างกันออกไปตามรูปแบบการใช้งานทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณการใช้ โดยทั่วไประบบการกรองน้ำที่ใช้ได้แก่

1. ระบบกรองน้ำแบบผ่านสารกรอง (Filtration)

การกรองน้ำประเภทนี้จะให้น้ำไหลผ่านสารกรอง (Media filter) โดยเลือกใช้ชนิดสารกรองต่าง ๆ ให้เหมาะสมต่อการใช้งานและการล้างย้อนกลับเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตัวอย่างสารกรองที่นิยมใช้ได้แก่

- สารกรองกรวด ททราย ทำหน้าที่กรองตะกอนขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ สารปนเปื้อน ช่วยทำให้น้ำที่ขุ่นมัวใสขึ้น นิยมใช้เป็นสารกรองชนิดแรกในระบบกรองน้ำ
- สารกรองทรายปะการัง ทำหน้าที่เพิ่มค่า pH ช่วยลดความเป็นกรดในน้ำ ปลอดภัยต่อการใช้อุปโภคและบริโภค ซึ่งภายในทรายปะการังยังมีแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายอย่างแคลเซียม น้ำที่ผ่านไส้กรองทรายปะการังจึงมีแคลเซียมไอออนปะปนมาช่วยเสริมสร้างกระดูกและฟันให้แข็งแรงได้อีกด้วย
- สารกรองเรซิน ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุในน้ำช่วยลดความกระด้างของน้ำ ลดการเกิดตะกรันหรือหินปูน ทั้งยังช่วยดูดซับสีและกลิ่นไม่พึงประสงค์ มีอายุการใช้งานประมาณ 6-8 เดือน
- สารกรองแอนทราไซต์ ทำหน้าที่ช่วยขจัดตะกอน สารแขวนลอย โคลนตม และสนิมเหล็ก ที่ปะปนมากับน้ำไว้ที่ผิวภายนอกได้ดี มีอายุการใช้งานประมาณ 1 ปี
- สารกรองถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ทำหน้าที่กรองสี กลิ่น คลอรีน และโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้เป็นอย่างดี

คุณภาพของการกรองประเภทนี้ จึงขึ้นอยู่กับชนิดของสารกรองที่ใช้ ซึ่งนิยมใช้เป็นลำดับแรกของระบบการกรองประเภทอื่น ๆ



รูปที่ 2.2 ระบบกรองน้ำแบบถังกรอง (Filtration System)
ที่มา: (หจก.แอล เอส วอเตอร์ เจ เทคโนโลยี(ประเทศไทย), 2566)

2. ระบบกรองน้ำแบบ MF (Micro Filtration System)

ระบบกรองน้ำ MF เป็นระบบการกรองโดยใช้เยื่อสังเคราะห์ (synthetic membrane) ชนิด micro filtration membrane เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาด 0.1-10 ไมครอน เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย และโมเลกุลของไขมัน การกรองระบบนี้จะใช้แก้ปัญหา น้ำกร่อย น้ำเค็ม และน้ำกระด้าง นอกจากนี้ยังสามารถกรองสี กลิ่น และเชื้อโรคได้ แต่ยังไม่ใช่น้ำคุณภาพดีที่จะใช้ดื่มได้ อาจต้องกรองเพิ่มหรือต้มอีกครั้ง

3. ระบบกรองน้ำแบบ RO (Reverse Osmosis System)

เครื่องกรองน้ำระบบ RO คือ การใช้แรงดันน้ำให้ไหลผ่านไส้กรองคุณภาพสูงที่เรียกว่า เยื่อเมมเบรน (Membrane) ที่มีความสามารถในการกรองได้ละเอียดถึง 0.0001 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สามารถกรองได้ถึงไอออนและโมเลกุลของสารละลายที่อยู่ในน้ำ จึงสามารถป้องกันสารตกค้างและเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเยื่อเมมเบรน (Membrane) จะขจัดออกไปทางระบบน้ำทิ้ง ทำให้ได้น้ำดื่มอาร์โอ (RO Water) สามารถพิสูจน์ได้ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ เคมี พืชวิทยา และจุลชีววิทยา ดังนั้นทำให้แร่ธาตุที่สำคัญในน้ำหายไปจนหมดด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.3 ระบบกรองน้ำแบบ RO (Reverse Osmosis System)

ที่มา: (Waterman Aquatic Private Limited, 2023)

4. ระบบกรองน้ำแบบ UV (Ultraviolet Filtration System)

ระบบกรองน้ำระบบ UV เป็นการพ่นน้ำผ่านประจุแสงอัลตราไวโอเล็ตเข้มข้นเพื่อกำจัดเชื้อโรคต่างๆ ฆ่าเชื้อไวรัสแบคทีเรีย อีโคโรค และเชื้ออื่นๆ ที่ปนมากับน้ำได้ แม่วิธีนี้จะเป็นการกรองที่รวดเร็วแต่การอาบประจุแสง UV นั้นไม่ใช่การกรองผ่านชั้นกรองอาจมีสิ่งสกปรกต่างๆ ตกค้างอยู่ในน้ำ ในการออกแบบจึงต้องติดตั้งระบบกรองแบบอื่นมาช่วยเพื่อปรับคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม

ตามการกรองระบบ UV ยังคงเหลือแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย อย่างเช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และ ฟลูออไรด์

5. ระบบกรองน้ำแบบ UF (Ultra Filtration System)

เครื่องกรองน้ำระบบ UF เป็นระบบกรองน้ำที่พัฒนามาจากการกรองน้ำระบบ UV บางระบบ จึงไม่มีการใช้หลอด UV ในการกรองน้ำ แต่จะเพิ่มไส้กรองที่เรียกว่า "โพเรทแคบทีเรีย" ขึ้นมา สามารถกรองสารแขวนลอยที่มีขนาด 0.01 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จึงสามารถกรอง เชื้อจุลินทรีย์ ไวรัส แคบทีเรีย และโปรโตซัวได้ทุกชนิด อีกทั้งสารที่นำมาใช้การกรองแต่ละชั้น ยังสามารถกรองคลอรีนและโลหะหนักได้อีกด้วย



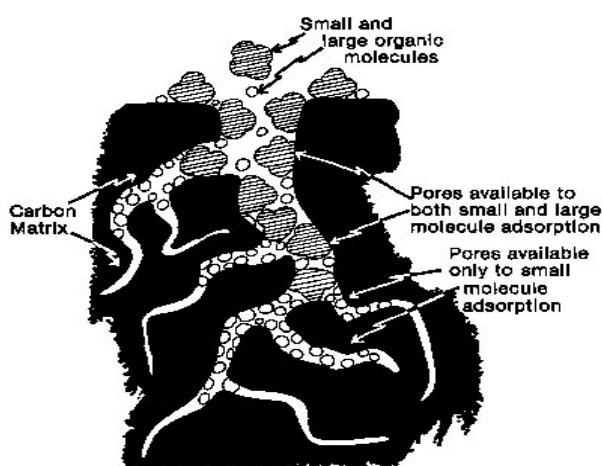
รูปที่ 2.4 ระบบกรองน้ำแบบ UF (Ultra Filtration System)

ที่มา: บริษัท ทรีท เคมีคอล จำกัด

2.1.3 หลักการออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การปรับสภาพน้ำคอนเดนเสทในงานวิจัยครั้งนี้ จะพิจารณาถึงระบบการดูดซับที่เป็นแบบต่อเนื่องโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับ สามารถรองรับอัตราการไหลเข้าระบบบำบัดได้ 0-2.5 ลบ.ม.ต่อชม. เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณที่ต้องการนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตและเพื่อให้ น้ำคอนเดนเสทหลังการปรับสภาพมีสมบัติทางกายภาพและเคมีผ่านตามมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน จึงได้รวบรวมข้อมูลเฉพาะของถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาออกแบบให้เหมาะสมต่อคุณภาพของน้ำคอนเดนเสทที่จะบำบัดและการนำไปใช้ประโยชน์ต่อทั้งในกระบวนการผลิตและการใช้ล้างทำความสะอาดไลน์ผลิต

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ผลิตจากพืชและต้นไม้เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น มะพร้าวกะลา แกลบ ชี้เลื่อย โดยทำการเผาด้วยความร้อนสูงในสภาวะที่ไร้อากาศ ทำให้ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตามขนาดรูพรุนขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ลักษณะของรูพรุนแสดงในรูปที่ 2.5 ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงจึงสามารถนำไปใช้ในการกรองเอาสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการออกจากของเหลวหรือก๊าซ และเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการกรองหรือดูดซับสารจะต่ำลง เนื่องจากที่ว่างภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีน้อยลง จึงต้องทำการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์เก่าออกและใส่ถ่านกัมมันต์ใหม่เข้าไปทดแทน โดยถ่านกัมมันต์ที่ถูกใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟู (Re-activated) เพื่อกำจัดสารต่าง ๆ ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ออกไปให้หมดก่อน (ฉวีวรรณ, 2562)



รูปที่ 2.5 ลักษณะของรูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์
ที่มา : (ฉวีวรรณ, 2562)

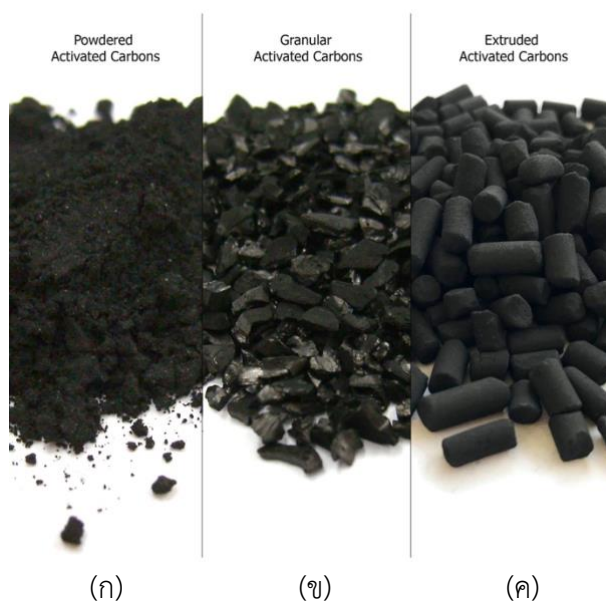
2.1.3.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

1) ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered Activated Carbon, PAC) ดังรูปที่ 2.6(ก) โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.15-0.25 มิลลิเมตร(จันทิมา, 2559) ทำให้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีพื้นที่ผิวต่อปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น การใช้งานจึงเหมาะกับการเติมลงในภาชนะหรืออุปกรณ์ที่มีของเหลวโดยตรงมากกว่าการบรรจุในคอลัมน์แล้วปล่อยให้ของเหลวไหลผ่าน เนื่องจากจะเกิดการอัดแน่นได้ และมีโอกาสที่จะสูญเสียผง

ถ่านกัมมันต์ได้ง่ายกว่า ถ่านกัมมันต์แบบผง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรค สารเคมี ยางรถยนต์ โครงสร้าง และอาคาร

2) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ดังรูปที่ 2.6(ข) โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.20-0.80 มิลลิเมตร(เฉลิมชัย, 2559) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์ประเภทผง จึงนิยมใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการดูดซับก๊าซหรือไอของสาร เนื่องจากก๊าซสามารถไหลผ่านได้ง่ายกว่า มีโอกาสน้อยที่จะสูญเสียถ่านกัมมันต์ สามารถบรรจุในภาชนะหรือคอลัมน์สำหรับการดูดซับได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมากระตุ้นซ้ำเพื่อใช้งานใหม่ได้ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ในการกรองอากาศเสีย อุตสาหกรรมสารเคมี และเวชภัณฑ์ยานยนต์ ใช้ในการถ่ายเทพลังงานความร้อน และการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ

3) ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded Activated Carbon, EAC) ดังรูปที่ 2.6(ค) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ทำให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.80-5.00 มิลลิเมตร (เฉลิมชัย, 2559) ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง จึงเหมาะกับการกรองหรือดูดซับก๊าซ เนื่องจากทำให้ความดันตกน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง และทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่งจึงมีราคาสูงกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ในการกำจัดสารเคมีที่มีพิษ และตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 ถ่านกัมมันต์แบบผง (ก), ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (ข) และถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (ค)

ที่มา : (ภูมรินทร์ และคณะ, 2561)

2.1.3.2 การตรวจสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์

1) ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้บอกประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์และเป็นตัวบ่งชี้พื้นที่ผิวทั้งหมด สามารถหาค่าได้โดยการดูดซับไอโอดีนจากสารละลายเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังถูกดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ซึ่งโดยทั่วไปค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและชนิดเม็ดตาม มอก. 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) เป็นตัวแปรที่บ่งชี้ว่าเมื่อถ่านกัมมันต์มีค่าความหนาแน่นสูง คุณภาพของถ่านกัมมันต์ก็จะยิ่งดีและสามารถดูดซับได้ดี โดยทั่วไปความหนาแน่นปรากฏ ตาม มอก.900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA ของถ่านกัมมันต์ชนิดผงอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดอยู่ที่ 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3) ค่าความแข็ง (Hardness/Abrasion number) เป็นตัวแปรแสดงความต้านทานการสึกกร่อนถ่านกัมมันต์ โดยบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสีและความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง ซึ่งตัวแปรนี้จะแตกต่างกันออกไปได้อย่างชัดเจนตามชนิดวัสดุและระดับที่ถ่านกัมมันต์ถูกกระตุ้น โดยทั่วไปค่าความแข็งของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ตาม มอก.900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

4) ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากพื้นที่ผิวก็จะมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น

5) ปริมาณเถ้า (Ash content) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ หากปริมาณเถ้ามากประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จะลดลงและประสิทธิภาพการนำถ่านกัมมันต์ไปกระตุ้นซ้ำก็จะลดลงด้วย

6) เมทิลีนบลู (Methylene blue) ถ่านกัมมันต์ที่โครงสร้างมีรูพรุนจะดูดซับโมเลกุลขนาดกลางเช่น สีย้อม เมทิลีนบลู สารที่ให้สีนี้ถูกใช้เป็นตัวแทนของสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง โดยค่าเมทิลีนบลูมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนแบบเมโซพอร์ คือจะมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร เนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดรัศมีโมเลกุลเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร

2.1.4 ทฤษฎีการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Principles of Adsorption)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ (สุนันทา, 2562) ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างพื้นที่ผิว 2 ภูมิภาค ได้แก่ ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว และของเหลวกับของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ต่อการดูดซับ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ และความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่สามารถเกิดขึ้นได้แบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (จารุวรรณ และคณะ, 2559) โดยจะเกิดในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับก็สามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

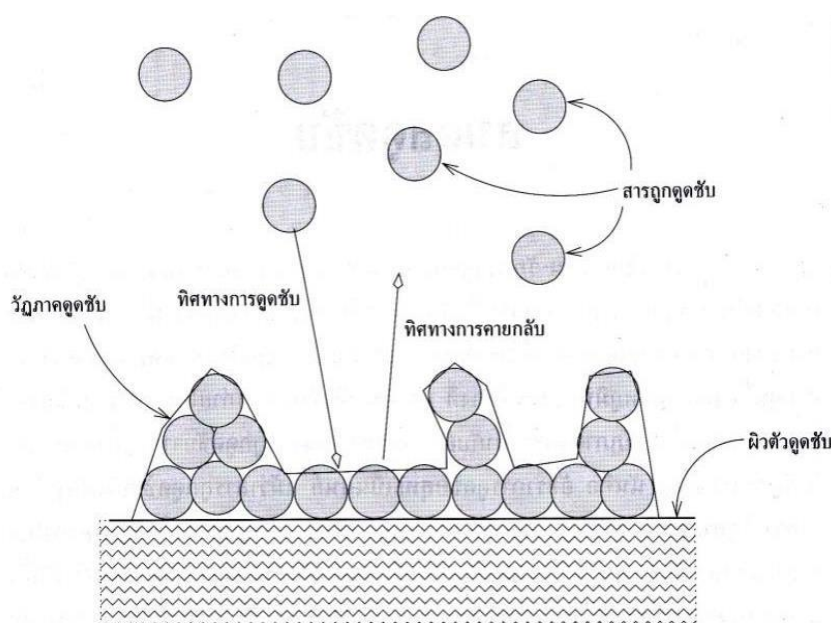
2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง กล่าวคือขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งหลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer)

ทฤษฎีการดูดซับจากรายงานการวิจัยของ Rahim *et al.* (2021) ได้ทำการทดลองการดูดซับสำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักสังเคราะห์ 3 ชนิด (Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Zn^{2+}) จากสารละลายในน้ำ โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากยาง (TAC) เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ (CAC) ซึ่งใช้เป็นวัสดุอ้างอิง สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของตัวดูดซับที่มีกลไกการดูดซับที่สอดคล้องกันได้รับการประเมินโดยเทคนิคการทดลองที่แตกต่างกัน TAC แสดงศักยภาพที่ดีในการดูดซับโลหะหนักโดยมีความสามารถในการดูดซับ monolayer สูงถึง 322.5, 185.2 และ 71.9 mg/g สำหรับ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าความสามารถในการดูดซับที่แสดงโดย CAC ซึ่งเท่ากับ 42.5, 15.0 และ 14.0 mg \cdot g⁻¹ สำหรับ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ ผลการดูดซับแสดงให้เห็นว่า TAC มีอัตราการดูดซับที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับ CAC ความสามารถในการดูดซับของ TAC และ CAC ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสามารถเริ่มต้นหลังจากรอบการดูดซับ 3 รอบต่อเนื่องกัน การวิเคราะห์ศักยภาพของซีตา Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) และ X-ray Photoelectron

spectroscopy (XPS) พบว่าแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตและกลไกการสร้างความซับซ้อนของพื้นผิวซึ่งเป็นกลไกการดูดซับโลหะสองแบบมีอิทธิพลมากกว่าสำหรับ TAC สำหรับ CAC ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) ที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าการกำจัดโลหะหนักโดยการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกลไกที่โดดเด่น

งานวิจัยนี้ดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 35-50 องศาเซลเซียส และใช้ปั๊มแรงดันป้อนน้ำคอนเดนเสทเข้าสู่ระบบการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งคาดว่าเมื่อดำเนินการไประยะหนึ่งประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง เนื่องจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง เมื่อวิเคราะห์จากการดูดซับแล้ว คาดว่างานวิจัยนี้จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ

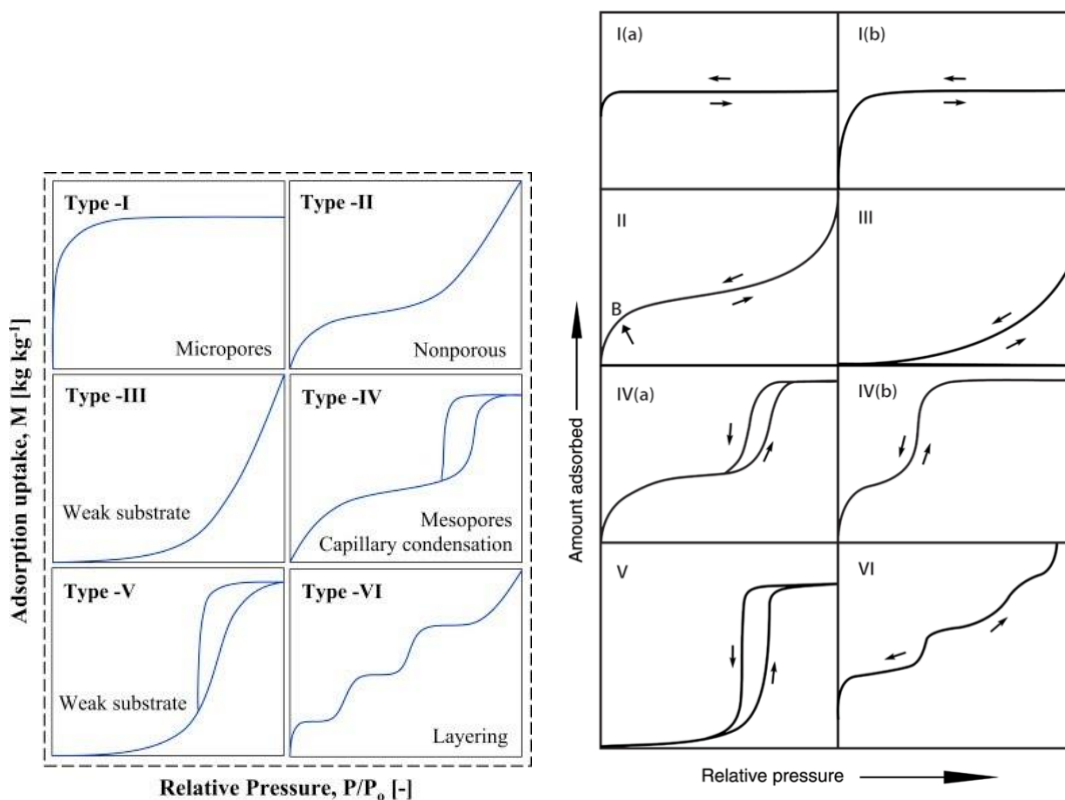


รูปที่ 2.7 แบบจำลองวัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับเมื่อดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่เป็นไอหรือก๊าซ ที่มา: (สุนันทา, 2562)

2.1.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ในวัฏภาคการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเมื่อระยะเวลาผ่านไป ทำให้สารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ มีอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเกิดความสมดุล เมื่อนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยให้แกนนอนแทนค่าเป็นค่าของความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำ และแกนตั้งแทนค่าเป็นปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักของสารดูดซับ เมื่อลากเส้นผ่านจุดจะเกิดเป็นเส้นโค้งแบบต่าง ๆ ซึ่งเรียกเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท

พื้นฐาน ส่วนไอโซเทอมการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC (Matthias et al., 2015) สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจำแนกประเภทของไอโซเทอมของการดูดทางกายภาพ

ที่มา : (Matthias et al., 2015)

ไอโซเทอมประเภทที่ 1 เป็นไอโซเทอมที่ใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นผิวภายนอกค่อนข้างเล็ก (microporous adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์บางชนิด ซีโอไลต์ คัดขนาดโมเลกุล และออกไซด์ที่มีรูพรุนบางชนิด ทำให้เกิดการผันกลับได้ ไอโซเทอมประเภทที่ 1 จะมีลักษณะโค้งเข้าหาแกน p/p_0 ซึ่งขนาดโมเลกุลของสารดูดซับมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับไม่มาก สารดูดซับไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับได้ การดูดซับจึงถูกจำกัด เกิดการอิ่มตัวที่แน่นอนอย่างสมบูรณ์โดยเรียงเป็นชั้นเดียว มีความชัน p/p_0 ที่ต่ำมาก ไอโซเทอมประเภทนี้ตรงตามทฤษฎีของแลงเมียร์ (Langmuir) บางครั้งจึงเรียกว่าไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ไอโซเทอมประเภทที่ 1(a) โดยทั่วไปเกิดจากการใช้วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และไอโซเทอมประเภท 1(b) โดยทั่วไปเกิดจากการใช้วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่า 2.5 นาโนเมตร

ไอโซเทอมประเภทที่ 2 เป็นการดูดซับทางกายภาพที่สารดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่ (nonporous) หรือไม่มีรูพรุน (nonporous) ทำให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และหลายชั้น (multilayer) แบบไม่จำกัดจนถึง p/p_0 สูง ๆ ไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B – จุดเริ่มต้นของส่วนกึ่งกลางที่เป็นเส้นตรง จะเกิดการดูดซับที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ เมื่อ p/p_0 สูงขึ้นจะเกิดการดูดซับในชั้นต่อไปจนสมบูรณ์และเกิดชั้นต่อไปเรื่อย ๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm) โดยความหนาของการดูดซับหลายชั้นที่ดูดซับโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นโดยไม่มีขีดจำกัดเมื่อ $p/p_0 = 1$

ไอโซเทอมประเภทที่ 3 จะมีลักษณะคล้ายประเภทที่ 2 แต่ไม่มีจุด B ดังนั้นจึงไม่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวก่อน แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับค่อนข้างอ่อน ทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับเกิดการจับกลุ่มกันรอบตำแหน่งที่ดีที่สุดบนพื้นผิวของสารดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือไม่มีรูพรุนก่อนการดูดซับจะเสร็จสมบูรณ์ ตรงกันข้ามกับไอโซเทอมประเภทที่ 2 ปริมาณที่ดูดซับยังคงมีจำกัดที่ความดันอิ่มตัว (เช่น ที่ $p/p_0 = 1$)

ไอโซเทอมประเภทที่ 4 เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างสารดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการดูดซับเป็นแบบสองชั้น (bilayer) โดยช่วงแรกมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมประเภทที่ 2 จะดูดซับอย่างสมบูรณ์ของชั้นแรกก่อนเกิดชั้นถัดไป และเมื่อ p/p_0 เพิ่มขึ้นตัวถูกดูดซับจะเข้าไปในรูพรุนอีกครั้ง แต่ระดับของความชื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการควบแน่นของรูพรุน คุณลักษณะทั่วไปของไอโซเทอมประเภทที่ 4 คือที่จุดอิ่มตัวสุดท้ายมีความยาวผันแปรได้ (บางครั้งลดลงเหลือเพียงจุดงอ) ในกรณีของไอโซเทอมประเภทที่ 4(a) จะเกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับมีความกว้างของรูพรุนประมาณ 4 นาโนเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับระบบการดูดซับและอุณหภูมิ ในกรณีไอโซเทอมประเภทที่ 4(b) สามารถผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ โดยหลักการแล้วไอโซเทอมประเภทที่ 4(b) จะเกิดจากตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ (mesopores) ที่เป็นทรงกรวยและทรงกระบอกที่ปิดที่ปลายเรียว

ไอโซเทอมประเภทที่ 5 เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่ไม่ชอบน้ำและมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ในช่วงที่ p/p_0 ต่ำ รูปร่างของไอโซเทอมประเภทนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมประเภทที่ 3 มาก เป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ค่อนข้างอ่อน และเมื่อ p/p_0 สูงขึ้นกลุ่มโมเลกุลก็จะเติมเข้ารูพรุนอีกครั้ง ในขณะที่การดูดซับชั้นแรกยังไม่สมบูรณ์

ไอโซเทอมประเภทที่ 6 เป็นการดูดซับที่คายกลับได้ เป็นตัวแทนของการดูดซับที่ละชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับที่รูพรุนไม่สม่ำเสมอ และความสูงของแต่ละชั้นที่ดูดซับแสดงถึงความจุสำหรับแต่ละเลเยอร์ที่ดูดซับได้ ซึ่งความสามารถของแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิ

2.1.4.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไอโซเทอมการดูดซับมีหลายสมการ ได้แก่ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรูนคลิซ และสมการไอโซเทอมการดูดซับของคูบินิน-ราตซ์เควิช โดยทั่วไปจะนิยมใช้สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) และของฟรูนคลิซ (Freundlich)

1) สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm)

เมื่อปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมการดูดซับขึ้นโดยมีสมมติฐานว่าตัวดูดซับต้องเป็นพื้นผิวเรียบแบบเดียวกันทั้งหมด (Homogeneous adsorption surface) การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวมีกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน การจัดเรียงตัวของตัวถูกดูดซับจะมีเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกันมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่ (Adsorption sites) แน่นอน ไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งหรือเคลื่อนที่กันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้พื้นผิวตัวดูดซับถูกปกคลุมไปด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันพื้นผิวบนตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ส่งผลให้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว จากสมมุติฐานที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ไอโซเทอมของแลงเมียร์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งที่สภาวะสมดุลได้ดังสมการที่ (2.1) และเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ (q) และความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9

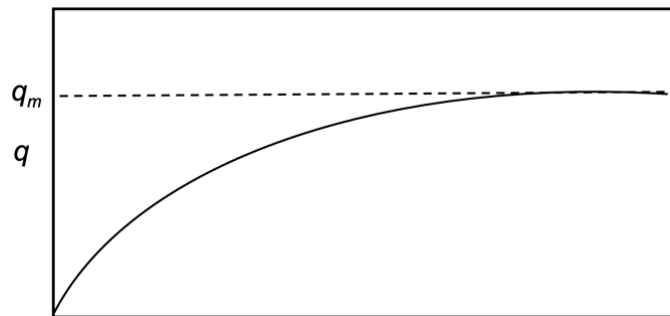
$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.1)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล หรือเรียกว่าความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับสำหรับการดูดซับชั้นเดียว (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/mg)

C คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล (mg/L)

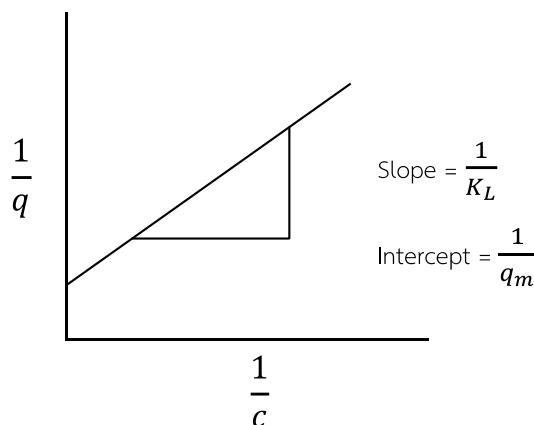


รูปที่ 0.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์
ที่มา: (เสาวภา, 2559)

จากสมการที่ (2.1) ไอโซเทอมของแลงเมียร์แบบไม่เชิงเส้น สามารถนำมาประยุกต์เป็นแบบเชิงเส้นหรือกราฟเส้นตรงได้ โดยจัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_L} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.2) สมการไอโซเทอมของแลงเมียร์แบบเชิงเส้น สามารถคำนวณค่า q_m และ K_L ได้จากค่า Slope และค่า y-Intercept ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ ที่มา : (อุไรวรรณ, 2553)

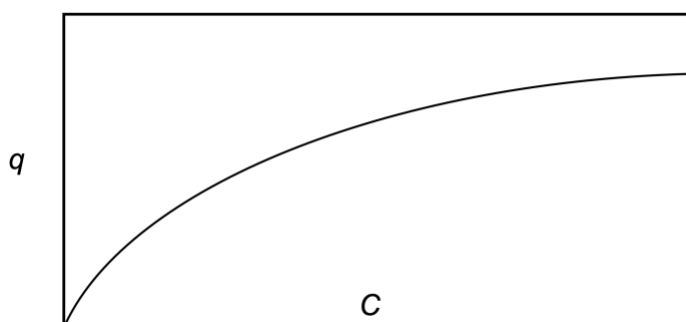
สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรูนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm)
เมื่อปี ค.ศ. 1880-1941 ฟรูนดลิช (Herbert Max Finlay Freundlich)
ได้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ โดยมีสมมติฐานว่า การดูดซับต้องเกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวดูดซับที่ไม่

เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous adsorption surface) โดยพัฒนามาจากไอโซเทอมของแลงเมียร์ สามารถดูดซับได้ทั้งทางกายภาพและเคมี และพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น จึงทำให้ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช จึงเป็นทฤษฎีที่เป็นแบบจำลองของการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของตัวดูดซับที่สภาวะ สมดุลได้ดังสมการที่ (2.3) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ (q) และความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.3)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (mg/g)

n คือ ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลายของแต่ละระบบ



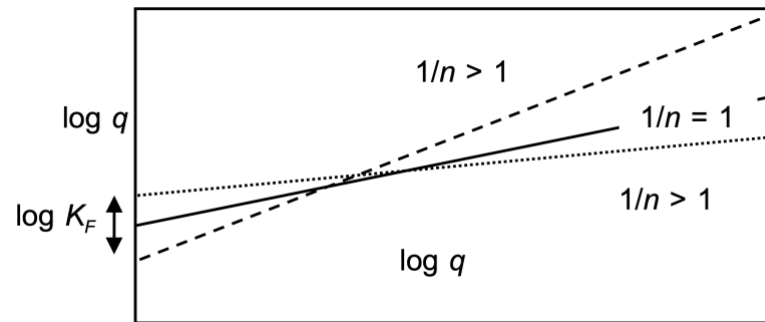
รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

ที่มา: (เสาวภา, 2559)

จากสมการที่ (2.3) ไอโซเทอมของฟรุนดลิชแบบไม่เชิงเส้น สามารถนำมาประยุกต์ เป็นแบบเชิงเส้นหรือกราฟเส้นตรงได้เช่นกัน โดยจัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (2.4)

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.4) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรง เรียกว่าสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชแบบเชิงเส้น โดยความชันจะเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช
ที่มา: (เสาวภา, 2558)

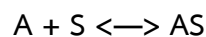
จากรูปที่ (2.4) อธิบายได้ว่าถ้าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรงค่า $\frac{1}{n}$ จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้า $\frac{1}{n}$ มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้า $\frac{1}{n}$ มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ (อดิศักดิ์, 2561)

2.1.4.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายอัตราเร็วในการดูดซับซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบการดูดซับได้ โดยสมการจลนศาสตร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order kinetic)

1) สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic)

เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดซับนี้เป็นการดูดซับทางเคมี โดยสามารถหาอัตราเร็วการดูดซับได้จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



โดยที่ A เป็นตัวถูกดูดซับ S เป็นตัวดูดซับ และ AS เป็นสารประกอบที่ได้จากการดูดซับ โดยสามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมได้ดังสมการการที่ (2.5)

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.5)$$

สามารถนำมาประยุกต์เป็นแบบเชิงเส้นหรือกราฟเส้นตรงได้ โดยจัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (2.6)

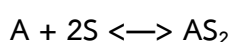
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ และ t จะได้กราฟเส้นตรง ที่ค่าความชันเท่ากับ $\frac{k_1}{2.303}$ และได้จุดตัดแกน y คือ $\log q_e$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับที่ดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_1	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)

2) สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order kinetic)

เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดซับนี้เป็นการดูดซับทางเคมี โดยสามารถหาอัตราการดูดซับได้จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



โดยที่ A เป็นตัวถูกดูดซับ S เป็นตัวดูดซับ และ AS เป็นสารประกอบที่ได้จากการดูดซับ โดยสามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมได้ดังสมการการที่ (2.7)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) ทำการอินทิเกรตในช่วง $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t=0$ ถึง $q_t=t$ จะได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ และ t จะได้กราฟเส้นตรง ที่ค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_e}$ และได้จุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

เมื่อ	q_e	คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ ความสามารถในการดูดซับที่ดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_2	คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (ต่อนาที)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำคอนเดนเสทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของโรงงานปลาทุ่นำกระป๋องซึ่งน้ำคอนเดนเสทมีค่า pH ที่สูงและมีกลิ่นฉุน ไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง การบำบัดน้ำคอนเดนเสทนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงสารระเหยและสารให้กลิ่นที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตปลาทุ่นำกระป๋อง รวมไปถึงวิธีการกำจัดกลิ่นดังกล่าวด้วย เพื่อให้สามารถออกแบบการทดลองได้อย่างเหมาะสม ในส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงได้แยกออกหัวข้อเป็น 2 ส่วน คือ ด้านสารประกอบระเหยของน้ำนิ่งปลาและด้านการกำจัดกลิ่นสารระเหยที่อยู่ในน้ำ

2.2.1 ด้านสารประกอบระเหยของน้ำนิ่งปลา

Zhang et al. (2019) รายงานว่าตรวจพบสารระเหยประมาณ 52 ชนิด ในตัวอย่างปลาทุ่นำได้แก่ อัลดีไฮด์ 14 ชนิด แอลกอฮอล์ 5 ชนิด คีโตน 4 ชนิด อะโรมาติกส์ 4 ชนิด ฟิวแรน 12 แอลเคน และสารประกอบอื่น ๆ อีก 9 ชนิดในกระบวนการผลิตปลาทุ่นำกระป๋อง อาทิเช่น Hexanal, Heptanal, Decanal, Nonanal, Octanal, 2-nonenal, 2-Pentylfuran, 2-Ethylfuran และ 2-Methyl-3-furanthiol โดยมีการระบุสารประกอบระเหยทั้งหมด 35, 35 และ 34 ชนิดในตัวอย่างปลาทุ่นำดิบ ปรงสุกและกระป๋อง ตามลำดับ โดยไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักที่ระเหยได้ในเนื้อปลาทุ่นำคิดเป็น 42.89%, 71.07% และ 67.19% ของสารระเหยทั้งหมดในตัวอย่างปลาทุ่นำดิบ ปรงสุกและกระป๋อง ตามลำดับ และอัลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบที่ระเหยได้มากเป็นอันดับสองในเนื้อปลาทุ่นำคิดเป็น 38.95%, 29.61% และ 26.73% ของสารระเหยทั้งหมดในตัวอย่างปลาทุ่นำดิบ ปรงสุกและกระป๋อง ตามลำดับ

ในขณะที่ Chen et al. (2016) รายงานว่าตรวจพบสารประกอบที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาที่ได้รับจากสิ่งแวดล้อมและความร้อน ในขั้นตอนการผลิตปลาทุ่นำกระป๋อง ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นได้แก่ แอลกอฮอล์ คีโตน อัลดีไฮด์ ตลอดจนสารประกอบที่มีไนโตรเจนและ

ซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ เช่น 1-Octen-3-ol, n-Hexanal, n-Heptanal, 2,4-Heptadienal, 2,4-Decadienal, n-Pentanal, n-Octanal, n-Octanol, Benzaldehyde, 2-Ethylfuran, 2,3-octanedione และ 2-Pentylfuran โดยสารประกอบเหล่านี้จะทำให้เกิดกลิ่น ส่งผลให้เกิดความรู้สึกไม่เห็นด้วยของผู้บริโภคซึ่งทำให้ไม่เหมาะสำหรับการขาย

2.2.2 ด้านการกำจัดกลิ่น

การกำจัดกลิ่นในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (AC) นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในเชิงพาณิชย์ รายละเอียดและประสิทธิภาพของระบบถ่านกัมมันต์ของผู้ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเป็นข้อมูลของแต่ละสถานประกอบการที่ไม่สามารถสอบถามเพื่อนำมาเขียนในโครงการวิจัยได้ สำหรับชนิดของถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่ได้รับการเสนอจากผู้แทนจำหน่ายโดยตรง อย่างไรก็ตามสามารถสืบค้นรายละเอียดและประสิทธิภาพของระบบถ่านกัมมันต์จากบทความวิจัยได้แก่ Chen et al. (2016) ศึกษาการกำจัดกลิ่นของ *Paphia undulata* Enzymatic Hydrolysate โดยใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (60 mesh, Shanghai Activated Carbon Co., Ltd., Shanghai, China) ที่ความเข้มข้น 175 มก./มล. อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งจากการประเมินทางประสาทสัมผัสสามารถกำจัดอัลดีไฮด์ volatile n-hexanal, n-heptanal และ 2,4-heptadienal รวมทั้งคีโตน 2,3-octanedione ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ยังมีรายงานของการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดกลิ่นจากแหล่งอื่น ๆ ได้แก่ การดูดซับกลิ่นของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง ขนาดอนุภาค 300 เมช และชนิดแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. โดยทดลองในถังเคมีขนาด 1 ลิตร และทำการไพโรไลซิสที่ความดัน 1 บรรยากาศภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ และใช้ซีโอไลต์ปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ไปฟื้นฟูด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ฟื้นฟูด้วยกรดไนตริก (HNO₃) ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และฟื้นฟูด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ไปดูดซับกลิ่น พบว่าที่ถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก สามารถลดสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่นฉุนได้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ไม่ผ่านการดูดซับกลิ่น (ฉัฐษา และคณะ, 2557)

นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอย่างอื่นในน้ำนอกจากกลิ่นอีกด้วย โดย ปารินดา (2555) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็ก ด้วยการตกตะกอนเคมีโดยใช้ปูนขาวร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ โดยมีตัวแปรปริมาณปูนขาวที่ 1% 2% และ 3% (w/v) จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณปูนขาว 3% (w/v) เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำเสียจากน้ำเสียรวมของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อ

ประปาเหล็ก โดยพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เท่ากับ 300 นาที และ ความสูงของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ที่เหมาะสมเท่ากับ 30 เซนติเมตร จึงมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงสุด ภายใต้อัตราการไหลของน้ำเสียในคอลัมน์เท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที และน้ำเสียรวมของโรงงานเมื่อผ่านระบบบำบัดด้วยการตกตะกอนเคมีด้วยปูนขาวตามด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มี ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี น้ำมันและไขมัน ของแข็งแขวนลอย เหล็ก และสังกะสี เท่ากับร้อยละ 62.23, 68.89, 98.23, 85.93, 72.06 และ 96.15 ตามลำดับ นอกจากนี้ พงศ์ธร (2560) ได้ศึกษา การกำจัดกรดฮาโลอะซิติก (HAA_s) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา 2) การทดลองแบบแบทช์ 3) การทดลองแบบคอลัมน์ และทำการศึกษาตัวแปร ที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ อัตราการไหลและความสูงของถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA_s สูงกว่าอัตราการไหล 6.0 มิลลิลิตรต่อนาที สรุปได้ว่าแบบคอลัมน์เมื่ออัตราการไหลช้า และชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ทำให้มี ประสิทธิภาพการกำจัด HAA_s เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังรายงานของ Márquez et al. (2021) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี การใช้เครื่องตรวจวิเคราะห์กลิ่นด้วยการดม (Olfactometer) และลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (GAC) ที่ใช้กำจัดกลิ่นตลอดจนการหาปริมาณทางโครมาโตกราฟีของสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นในโรงบำบัดน้ำเสีย (WWTP) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ช่วยให้สามารถประเมิน GAC ที่ปนเปื้อนได้ และสามารถระบุลักษณะเฉพาะของการปล่อยก๊าซที่คงอยู่จากขั้นตอนต่าง ๆ ของการบำบัดน้ำเสีย 4 ขั้นตอนได้ (การคัดแยกก่อนการปรับสภาพ: GAC-1; การกำจัดทรายและไขมัน: GAC-2; การทำให้ตะกอนหนา: GAC-3; การคายน้ำของตะกอน: GAC-4) ซึ่งพบว่าสารระงับกลิ่นในปริมาณที่มากขึ้น และหลากหลายในตัวอย่าง GAC จากการกำจัดกลิ่นในน้ำเสีย (GAC-1 และ GAC-2) หลังจากใช้เวลาดำเนินการเดียวกัน (หนึ่งปี) GAC-1 เป็นสารดูดซับที่มีมวลสูงสุดของสารระเหย (ประมาณ 150 $\mu\text{g/gGAC}$) นอกจากนี้ตัวแปรบางตัวเช่นความเข้มข้นของกลิ่นเฉพาะที่ถูกกำจัดออกและปริมาตรไมโครพอร์อัสระเหยมีความสัมพันธ์กันในทางกลับกัน ($R^2 = 0.9945$) การวิเคราะห์การมีส่วนร่วมของกลิ่นพบว่าสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นตัวการสำคัญของกลิ่น (61–97%) อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถถือเป็นกลิ่นสำคัญใน WWTP อนุภาคนี้ได้เนื่องจากการกำจัดสารประกอบนี้ไม่ได้ลดการมีส่วนร่วมอย่างมีนัยสำคัญของสารประกอบกำมะถันอื่น ๆ ในรูปอินทรีย์ต่อกลิ่นทั่วโลก โดยเฉพาะไดเมทิลไดซัลไฟด์ สารประกอบระเหยได้และสารประกอบให้กลิ่นจากกระบวนการผลิตปลาทูน่าแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบระเหยได้และสารประกอบให้กลิ่นจากกระบวนการผลิตปลาทูน่า

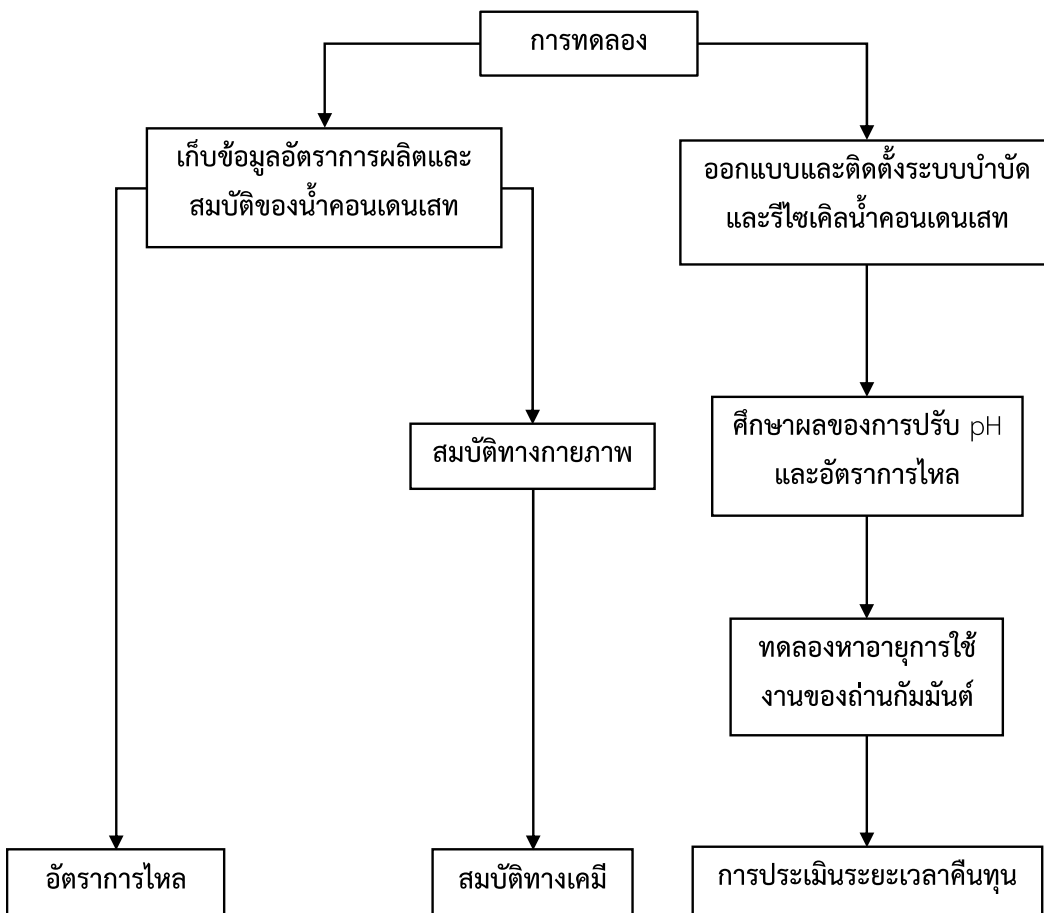
ประเภทสารระเหย/สารให้กลิ่น	ชนิดสารระเหย/สารให้กลิ่น	
	Yiqi <i>et al.</i> (2019)	Chen <i>et al.</i> (2016)
Aldehydes	Hexanal	n-Hexanal
	Heptanal	n-Heptanal
	Decanal	2,4-Heptadienal
	Nonanal	2,4-Decadienal
	Octanal	n-Pentanal
	2-nonenal	n-Octanal
	(E)-2-Decenal	n-Octanol
	Octadecanal	Benzaldehyde
Alcohols	1-Penten-3-ol	1-Octen-3-ol
	1-Octen-3-ol	
	2,7-Octadien-1-ol	
Furans	2-ethylfuran	2-Ethylfuran
	2-Pentylfuran	2-Pentylfuran
	6-(5-Methyl-furan-2-yl)- hexan-2-one	
Ketones	2-Nonanone	2,3-octanedione
	3,5-Octadien-2-one	
Hydrocarbons	3,5,5-Trimethyl-1-hexene	
	Hexadecane	

การตรวจสอบวิเคราะห์สารระเหยที่เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่น สามารถใช้ GC-MS (Thermo Trace DSQ II; Thermo Fisher Scientific, MA, USA) โดยใช้คอลัมน์ TR-35 MS (0.25 mm × 30 m, 0.25 μ m; Thermo Fisher Scientific, MA, USA) และใช้ก๊าซฮีเลียม (ความบริสุทธิ์ 99.999%) เป็นก๊าซพาหะที่ไหลที่ 0.8 มล./นาที โปรแกรมอุณหภูมิเตาอบเริ่มต้นที่ 30°C เป็นเวลา 2 นาทีตามด้วยความร้อนที่ 92°C ที่ 4°C/นาที ค้างไว้ 2 นาทีซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 200°C ที่ 5°C/นาที จากนั้นเป็น 240°C ที่ 6°C/นาที โดยคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 6 นาที โปรแกรมอุณหภูมิเป็นไปตาม การศึกษาของ Zhuang *et al.* (2016)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการบำบัดและการรีไซเคิลคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของโรงงานปลาทุ่น่ากระป๋อง โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลอัตราการผลิตและสมบัติของน้ำคอนเดนเสท ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและเคมี เพื่อนำข้อมูลไปสู่การออกแบบและติดตั้งระบบการบำบัดน้ำคอนเดนเสท แล้วทำการศึกษามลของการปรับ pH โดยใช้น้ำยาปรับ pH ชนิดกรดพร้อมกับการศึกษาอัตราการไหล และทดลองการกำจัดกลิ่นของน้ำคอนเดนเสทโดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับกลิ่น จากนั้นทำการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ เพื่อประเมินระยะคืนทุน โดยมีลำดับขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุ

- 3.1.1.1 น้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตน้ำโปรตีนเข้มข้น
- 3.1.1.2 น้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตน้ำนิ่งปลาเข้มข้น
- 3.1.1.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Eunicarb ID900 ASTM Mesh Size 8*16)

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1. น้ำยาปรับค่า pH (ชนิดกรด, Food Grade) (Citric Acid 60%, EDTA. ชนิดกรด 30%, อื่น ๆ 10%)
- 3.1.2.1 คลอรีนเกล็ด ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$)
- 3.1.2.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3.1.2.3 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 3.1.2.4 แอมโมเนียมไทโอไซยาเนต (NH_4SCN)
- 3.1.2.5 กรดไนตริก (HNO_3)
- 3.1.2.6 โพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4)
- 3.1.2.7 ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3)
- 3.1.2.8 แอมโมเนียมเฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$)
- 3.1.2.9 สารละลายไฮดรอกซีลามีน (NH_2OH)
- 3.1.2.10 สารละลายโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (NaCH_3COO)
- 3.1.2.11 สารละลายพีแวนโทรลีน ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- 3.1.2.12 กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีติก ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$)
- 3.1.2.13 แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)
- 3.1.2.14 แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
- 3.1.2.15 แอมโมเนีย (NH_3)
- 3.1.2.16 เอทิลีนไดอะมีนอะซิติกไดโซเดียม ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- 3.1.2.17 อิริโอโครม แบลค ที ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{N}_3\text{O}_7\text{SNa}$)
- 3.1.2.18 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.1.2.19 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- 3.1.2.20 โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

- 3.1.2.21 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 3.1.2.22 ฟีนอลฟทาไลน์ ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$)
- 3.1.2.23 เมทิลออเรนจ์ ($\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$)
- 3.1.2.24 เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- 3.1.2.25 กรดซัลโฟมิก (H_3NSO_3)
- 3.1.2.26 โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- 3.1.2.27 เพอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- 3.1.2.28 น้ำกลั่น

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.3.1 คอลัมน์สำหรับกรอง
- 3.1.3.2 ปั๊มฉีดเคมี Grundfos DMB 5-6 bar พร้อมถัง PE ขนาด 100 ลิตร
- 3.1.3.3 ปั๊มแรงดัน
- 3.1.3.4 ถังพักน้ำ
- 3.1.3.5 ปั๊มลมและหัวฟู
- 3.1.3.6 ปั๊มน้ำ
- 3.1.3.7 ตะแกรงกรองขนาดรู 3 มิลลิเมตร
- 3.1.3.8 Flow meter
- 3.1.3.9 pH meter
- 3.1.3.10 Iron meter
- 3.1.3.11 Chloride meter
- 3.1.3.12 Conductivity meter
- 3.1.3.13 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3.1.3.14 Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX)
- 3.1.3.15 Brunauer-Emmett-Teller. Method (BET)
- 3.1.3.16 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry; GC-MS)
- 3.1.3.17 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
- 3.1.3.18 หลอดทดลอง 20 มล.
- 3.1.3.19 กรวยกรอง
- 3.1.3.20 บิวเรต 50 มล.

- 3.1.3.21 กระจกตวง
- 3.1.3.22 เครื่องชั่งดิจิทัล
- 3.1.3.23 ชุดขาตั้งและแคลมป์จับ
- 3.1.3.24 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.3.25 ปีกเกอร์ 250 มล.
- 3.1.3.26 ปีเปต 25 มล.
- 3.1.3.27 หลอดหยด
- 3.1.3.28 ขวดรูปชมพู่ 125 มล.
- 3.1.3.29 ขวดรูปชมพู่ 250 มล.

3.2 การเก็บข้อมูลอัตราการผลิตและสมบัติของน้ำคอนเดนเสท

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำนิ่งปลาเข้มข้นและน้ำโปรตีนเข้มข้นเพื่อหาค่าต่ำสุดและสูงสุดในช่วงเวลา 3 เดือน โดยเก็บตัวอย่างน้ำคอนเดนเสทเป็นเวลา 12 วัน เพื่อวิเคราะห์สมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสท

พารามิเตอร์	เครื่องมือที่ใช้/ชื่อวิธีการวิเคราะห์
pH	pH meter
Total iron, ppm as Fe ²⁺	Iron meter
Total hardness, ppm as CaCO ₃	EDTA Titrimetric Method
Chloride, ppm as Cl ⁻	Chloride meter
Residual free chloride, ppm	Chloride meter
Conductivity, µS/cm	Conductivity meter
Suspended solid (ppm)	Dried at 103-105 °C
ความขุ่น	Turbidity meter
กลิ่น	ผู้เชี่ยวชาญ*

*ผู้เชี่ยวชาญ หมายถึงผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ด้านการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและได้รับการแต่งตั้งให้ทำหน้าที่วิเคราะห์คุณภาพน้ำของห้องปฏิบัติการในโรงงาน

3.3 ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) แบรินด์ EEUNICARB ค่า ID(Iodine) 900 มีขนาด Mesh Side 8x30 และค่า pH อยู่ในช่วง 9.0-11.0 ผลิตจากกะลามะพร้าว เเผาที่อุณหภูมิสูง 200-1600 องศาเซลเซียส แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความพรุน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติเป็นตัวดูดซับระบบกรองน้ำ ระบบกำจัดกลิ่น กำจัดคลอรีน กระบวนการกำจัดสีในน้ำ และการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำ โดยซื้อถ่านกัมมันต์จากตัวแทนจำหน่ายห้างหุ้นส่วนจำกัด ควอลิเทค ซัพพลาย จังหวัดสงขลา ประเทศไทย ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้โดยปกติจะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น มีพลังงานการดูดซับต่ำ และอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ได้โดยการนำถ่านกัมมันต์ไปให้ความร้อน เช่นการเผาในเตาเผา (Furnace) ในเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) หรือเตาเผาแบบ Multiple Hearth Furnace ซึ่งกระบวนการฟื้นฟูสภาพด้วยการทำปฏิกิริยารวมทั้ง ความร้อนจะมีลักษณะคล้ายกันกับที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดใหม่ ในการทดสอบนี้ได้เก็บตัวอย่างถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปบำบัดจำนวน 50 กรัม เพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ขนาดอนุภาค พื้นผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ขนาดรูพรุนเฉลี่ยไอโอดีนัมเบอร์ และความหนาแน่นรวม ตลอดจนไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจน โดยใช้วิธี Physisorption (Multi point; > 120 points)

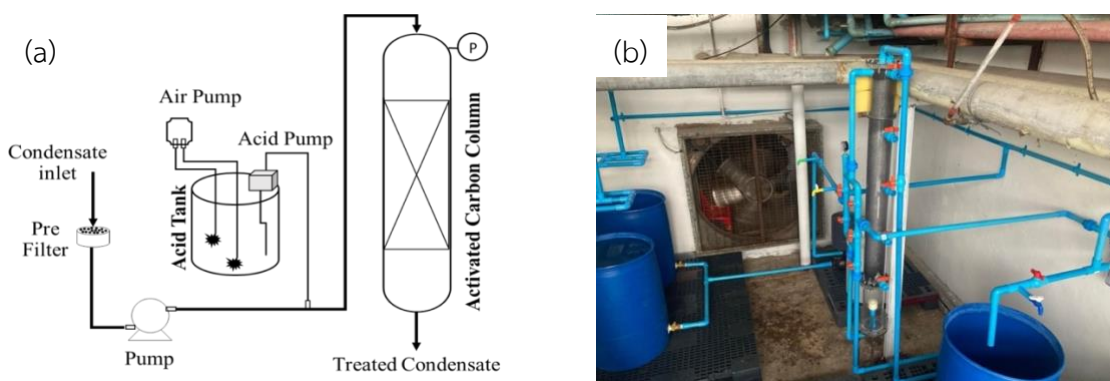
3.4 ศึกษาการกำจัดซีโอทีในน้ำคอนเดนเสทด้วยถ่านกัมมันต์ในการทดลองแบบแบทช์

น้ำคอนเดนเสทปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วย 0.1 M HCl ให้เท่ากับ 7, 8, 9 หลังจากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2.5, 5.0, 10.0, 12.5 หรือ 15.0 กรัม แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่อง Thermostatic shaker ที่ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 °C ทำการเก็บคอนเดนเสทปริมาตร 4.0 มิลลิลิตร เพื่อทำการวัดค่าซีโอที ทุก ๆ ชั่วโมงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาค่าร้อยละการกำจัดซีโอที เพื่อใช้เป็นตัวแทนเบื้องต้นในการหาประสิทธิภาพการดูดซับกลิ่นของน้ำคอนเดนเสทด้วยถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำผลการทดลองไปใช้ในการหาร้อยละอัตราการกำจัดซีโอที ค่า q ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และจลนศาสตร์การดูดซับ

3.5 การออกแบบและติดตั้งระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสท

การออกแบบและติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำคอนเดนเสทในงานวิจัยนี้ได้ปรึกษาและได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญการติดตั้งระบบกรองน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ ระบบประกอบด้วยชุดกรองหยابสำหรับกรองอนุภาคขนาดใหญ่โดยใช้ตะแกรงรูขนาด 3 มิลลิเมตร ถึงพลาสติกขนาด 100 ลิตร พร้อมปั๊มลมและหัวทราย สำหรับปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และความสูง 150 เซนติเมตร บรรจุถ่านกัมมันต์จำนวน 12 กิโลกรัม (24 ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยติดตั้งโรตารีมิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำและติดตั้งมอนิเตอร์น้ำสำหรับวัดความดันลดคร่อมชั้นถ่านกัมมันต์ และออกแบบการติดตั้งวาล์วสำหรับการป้อนน้ำและการล้างกลับ



รูปที่ 3.2 ระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท (a) ไดอะแกรม (b) ระบบจริงที่ติดตั้ง ณ กระบวนการผลิต

3.6 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำคอนเดนเสทเข้าระบบบำบัดที่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ลบ.ม./ชม. และปรับ pH ก่อนเข้าระบบให้เป็น 7.3-7.5 ด้วยน้ำยากรดที่สัดส่วนร้อยละ 0.16-0.1 แต่ละอัตราการไหลทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชม. และเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 1 ชม. นำน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดไปวิเคราะห์สมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.7 ทดลองหาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการใช้บำบัดน้ำคอนเดนเสท

ทดลองหาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการใช้บำบัดน้ำคอนเดนเสท โดยดำเนินการบำบัดน้ำอย่างต่อเนื่องที่สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.6 บันทึกค่าความดันลด และเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 10 วัน เป็นเวลา 180 วัน เดินระบบวันละ 18 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำชั้นต่ำที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา

3.8 ศึกษาการนำน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดกลับไปใช้ใหม่

นำน้ำคอนเดนเสทหลังผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ไปใช้แทนน้ำบาดาลในขั้นตอนการผลิตของกระบวนการผลิตน้ำมันปลา โดยใช้อัตราการไหลในการทดลองที่ 2.5 ลบ.ม./ชม. แบบต่อเนื่อง

เพื่อให้สามารถรองรับอัตราการใช้น้ำในกระบวนการผลิตได้อย่างเพียงพอ และการนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ต้องไม่มีผลกระทบต่อสินค้าจากกระบวนการผลิตน้ำมันปลา (สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันปลาเป็นความลับของทางบริษัท) ในการทดลองเก็บข้อมูลคุณภาพของน้ำมันปลาที่ใช้น้ำคอนเดนเสทหลังผ่านกระบวนการบำบัดแล้วเป็นจำนวน 9 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปา

3.9 การประเมินระยะเวลาคืนทุนของระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสท

ระยะคืนทุน (Payback period; PBP) เป็นระยะเวลาของการลงทุนที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากโครงการเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายสุทธิพอดี โดยจะคำนวณจากงบประมาณที่ใช้ไปทั้งหมด ได้แก่ งบลงทุน (Investment cost) คือค่าเครื่องจักรอุปกรณ์ ค่าแรงการติดตั้ง และงบดำเนินงาน (Operating cost) ได้แก่ ค่าสารเคมี ค่าถ่านกัมมันต์ ค่าพลังงาน ค่าแรงและค่าเสื่อมราคา เทียบกับมูลค่าน้ำที่สามารถผลิตได้ ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$\text{ระยะคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินลงทุนทั้งหมด (บาท)}}{\text{เงินที่ได้รับจากโครงการต่อปี (บาท/ปี)}} \quad (3.1)$$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการบำบัดน้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตผลพลอยได้ของโรงงานผลิตปลาทุ่นกระป๋อง ที่มาจากสองกระบวนการผลิตได้แก่กระบวนการผลิตน้ำนึ่งปลาเข้มข้น และน้ำโปรตีนเข้มข้น เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาด้วยวิธีการดูดซับกลิ่นและของแข็งแขวนลอยด้วยถ่านกัมมันต์ และปรับ pH ด้วยน้ำยาปรับ pH ชนิดกรด พร้อมทั้งประเมินระยะเวลาคืนทุนของระบบการปรับสภาพน้ำคอนเดนเสทเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 เก็บข้อมูลอัตราการผลิตและสมบัติของน้ำคอนเดนเสท

น้ำคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำนึ่งปลาเข้มข้นและน้ำโปรตีนเข้มข้น โดยการระเหยน้ำออกด้วยเครื่องระเหยและควบแน่นด้วยเครื่องควบแน่นถูกเก็บมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพจำนวน 12 ครั้ง โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่าเหล็กทั้งหมด ความกระด้าง คลอไรด์ คลอรีน และความขุ่น ผ่านค่ามาตรฐานน้ำดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าผลพลอยได้ของบริษัทโซติวิวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิต จำกัด (มหาชน) ในขณะที่ค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทมีค่าเท่ากับ 9.12-9.83 โดยประมาณ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำใช้ที่บริษัทกำหนดคือ 6.50-8.05 และเนื่องจากน้ำคอนเดนเสทเกิดในขั้นตอนการระเหยของน้ำโปรตีนและน้ำนึ่งปลา ทำให้สารระเหยต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำทั้งสองชนิด ระเหยไปกับน้ำคอนเดนเสทด้วยส่งผลให้น้ำคอนเดนเสทมีกลิ่นฉุน ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน อาจส่งผลกระทบต่อปัญหาเรื่องกลิ่นจากน้ำคอนเดนเสทไปยังผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตน้ำมันปลาได้ ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นของกลิ่นฉุนดังกล่าวเมื่อตั้งน้ำคอนเดนเสททิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน กลิ่นฉุนก็ยังคงอยู่ ดังนั้นน้ำคอนเดนเสทจึงไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง ต้องผ่านการกำจัดกลิ่นออกก่อนนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา และต้องมีการลดค่า pH เพื่อที่จะไม่กระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันปลา

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต

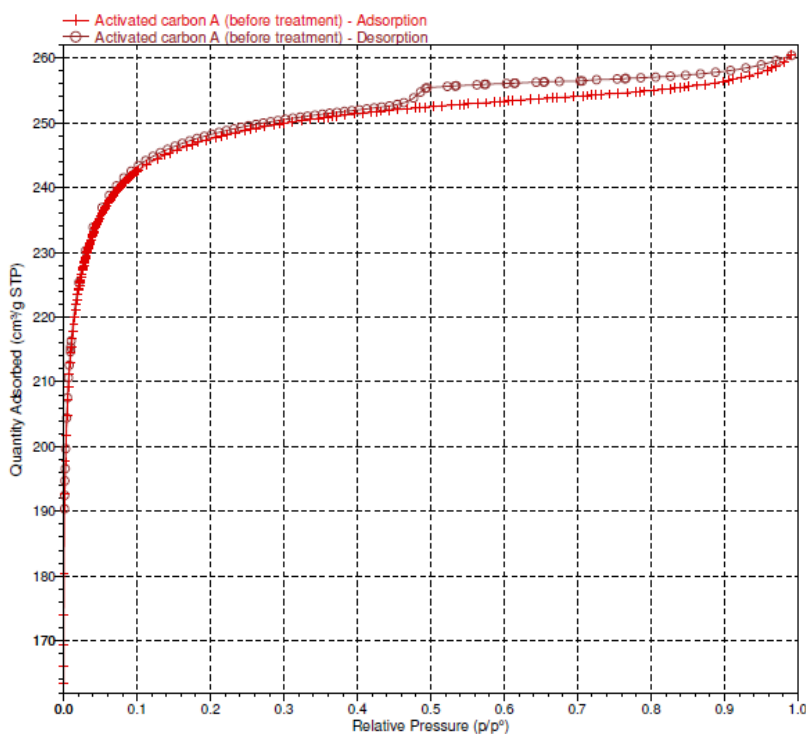
Properties	Condensate wastewater	Limitation of water for fish oil extraction manufacturing
pH	9.12-9.83	6.50-8.00
Total Iron (ppm as Fe ²⁺)	0.09-0.16	≤ 0.2
Total Hardness (ppm as CaCO ₃)	3.6-13.4	≤ 60
Chloride (ppm as Cl ⁻)	11-19	≤ 200
Residual Free Chlorine (ppm)	0.14-0.23	0
Conductivity (μS/cm)	378-496	Not assigned
Odor	Abnormal (fishy)	Normal

4.2 ศึกษาสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์

สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ขนาดรูพรุนเฉลี่ยไอโอไดนัมเบอร์ และความหนาแน่นรวม แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีพื้นที่ผิว 1,089 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.40 cm³/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.7 nm นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77.3 K ให้ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อความดันสัมพัทธ์ (p/p_0) เพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย มีการดูดซับเกิดขึ้นแบบสองขั้น ในช่วงแรกที่ p/p_0 ระหว่าง 0.1-0.4 เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่จะเป็นการดูดซับอย่างสมบูรณ์ และเมื่อ p/p_0 มากกว่า 0.8 การดูดซับเริ่มสูงขึ้นอีกครั้ง โดยตามการจำแนกของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) พบว่าไอโซเทอมการดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับประเภทที่ 4 (ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิช) (Duong, 1998)

ตารางที่ 4.2 สมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์ (Eunicarb ID 900)

Particle Size	Surface area	Total porous volume	Average porous size	Iodine Number	Bulk Density
Mesh 8x16	1086 m ² /g	0.40 cm ³ /g	3.7 nm	900	0.5 kg/L

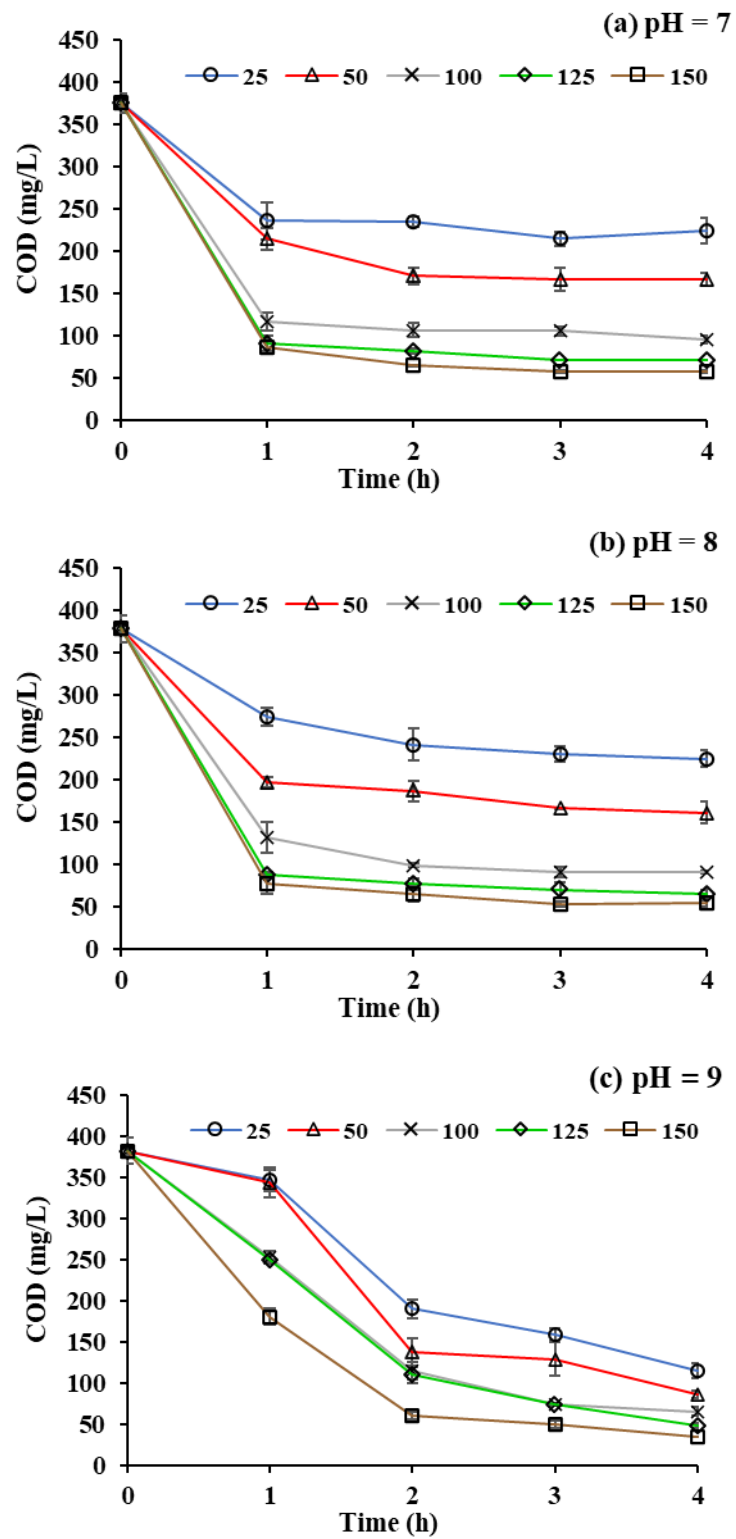


รูปที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (+) และการคายซับ (⊖) ของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77.3 K ของถ่านกัมมันต์ Eunicarb ID 900

4.3 การกำจัดซีโอทีในน้ำคอนเดนเสทด้วยถ่านกัมมันต์ในการทดลองแบบแบทช์

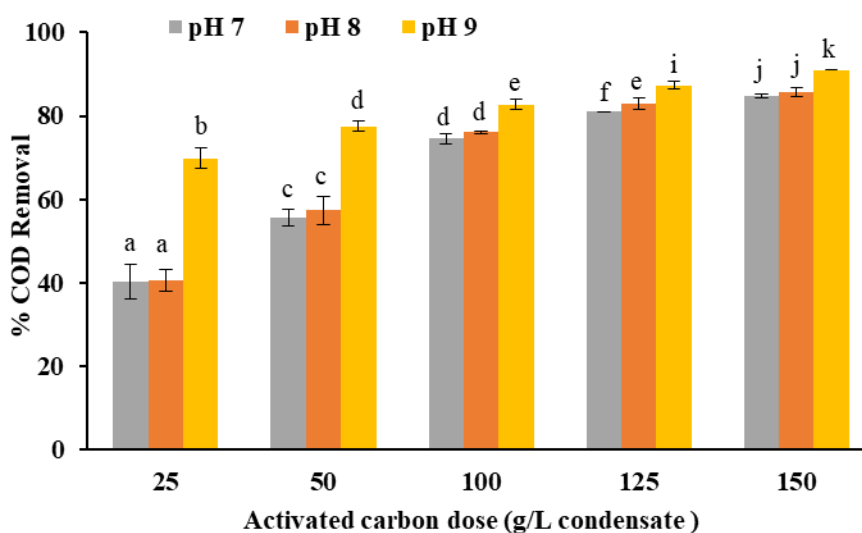
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับ

รูปที่ 4.2 แสดงการลดลงของค่า COD ตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมงของการทดลอง พบว่าการลดลงของ COD อย่างรวดเร็วในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกและจะเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วง 3-4 ชั่วโมง และเมื่อใช้ปริมาณของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้สามารถลดค่า COD ในน้ำคอนเดนเสทได้เร็วกว่าและมากกว่า ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ (Active site) ของตัวดูดซับมีปริมาณมากทำให้สามารถดูดซับได้มาก และเมื่อเวลาผ่านไปนานกว่า 1 ชั่วโมง การดูดซับมีความคงที่ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล เนื่องจากมีตำแหน่งในการดูดซับน้อยลง



รูปที่ 4.2 การลดลงของซีโอดีในน้ำคอนเดนเสทเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างกัน ที่การปรับค่า pH (a) pH= 7, (b) pH= 8 และ (c) pH = 9

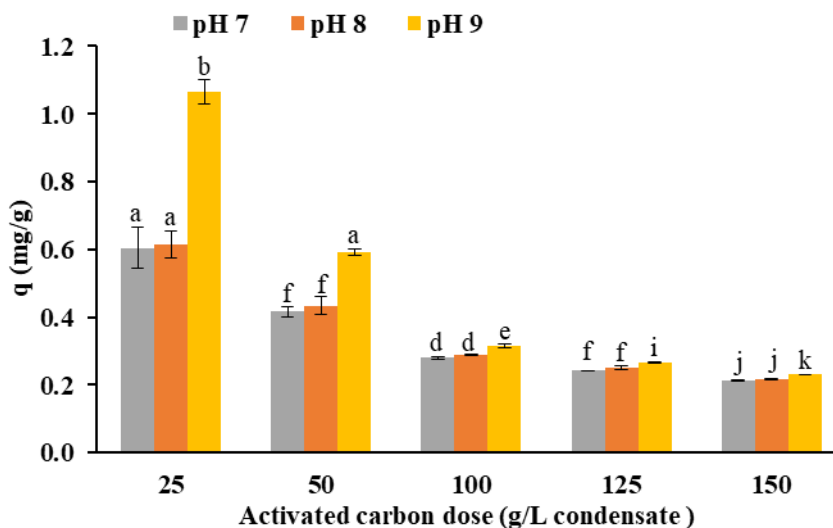
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อ pH และปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นทำให้มีแนวโน้มของร้อยละการกำจัดซีโอดี เพิ่มขึ้น โดยที่ pH 7 และ pH 8 ของทุกปริมาณถ่านกัมมันต์ให้ผลร้อยละการกำจัดซีโอดี เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ $p\text{-value} < 0.05$ ยกเว้นใช้ถ่านกัมมันต์ 125 g/L แต่มีความแตกต่างไม่เกิน 5% โดยร้อยละการกำจัดซีโอดี เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ 125 และ 150 g/L ให้ร้อยละการกำจัดซีโอดี แตกต่างกันไม่เกิน 5% การที่เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์มากกว่า 100 g/L แล้วค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทไม่มีผลต่อร้อยละการกำจัดซีโอดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในจุดซัฟที่เกินพอต่อปริมาณซีโอดี เริ่มต้นที่เท่ากัน เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่ำคือ 25-50 g/L ค่า pH มีผลต่อร้อยละการกำจัดซีโอดี เนื่องจากที่ pH สูงขึ้น จะมีปริมาณไฮดรอกไซด์สูงขึ้นทำให้ประจุที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีค่าเป็นลบมากขึ้นทำให้มีแนวโน้มสามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่มีประจุเป็นบวกได้มากขึ้น (Shakoor et al., 2018) ซึ่งสอดคล้องกับสารอินทรีย์ในน้ำคอนเดนเสทที่เกิดกลิ่นซึ่งจะเป็นสารประกอบจำพวกแอมโมเนียมไอออนที่ประจุเป็นบวก



รูปที่ 4.3 ผลของ pH เริ่มต้นของคอนเดนเสทและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต่อร้อยละการกำจัดซีโอดี ที่เวลา 4 ชั่วโมงของการทดลอง

ในขณะที่เมื่อแสดงผลเป็นค่าของปริมาณการดูดซับซีโอดี ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ (q) ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ค่า q มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้น พื้นที่ดูดซับมีค่ามากขึ้น และมีค่าเกินพอต่อปริมาณซีโอดี เริ่มต้นที่มีอยู่ในน้ำคอนเดนเสท สำหรับ ค่า q ของน้ำคอนเดนเสทที่ pH 7 และ 8 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับทุก

ปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ ในขณะที่เมื่อใช้น้ำคอนเดนเสทที่ pH 9 และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 25 และ 50 g/L มีค่า q สูงกว่าน้ำคอนเดนเสทที่ pH 7 และ 8 ในขณะที่เมื่อใช้ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 100 g/L ขึ้นไปค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทไม่มีผลต่อค่า q



รูปที่ 4.4 ผลของ pH เริ่มต้นของคอนเดนเสทและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต่อปริมาณการดูดซับซีโอดี ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ที่เวลา 4 ชั่วโมงของการทดลอง

4.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ค่าคงที่สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับซีโอดีในน้ำคอนเดนเสท เมื่อคำนวณผลการทดลองตามสมการที่ (2.2) และ (2.4) จะได้ค่าคงที่การดูดซับซีโอดีในน้ำคอนเดนเสทดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ไอโซเทอมการดูดซับซีโอดีในน้ำคอนเดนเสท สอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชมากกว่าของสมการแลงเมียร์ สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบหลายชั้น โดยเมื่อ pH ของน้ำคอนเดนเสทเพิ่มขึ้นจาก 7 เป็น 8 ค่า q_m แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่เพิ่ม pH ของน้ำคอนเดนเสทเป็น 9 ค่า q_m จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่ pH 9 ทำให้ปริมาณประจุลบของไฮดรอกไซด์บนตัวดูดซับเพิ่มขึ้นส่งเสริมให้เกิดการดูดซับแอมโมเนียมไอออนได้มากขึ้น สอดคล้องกับค่าของ $1/n$ ของสมการของฟรุนดลิช ที่เพิ่มขึ้น เมื่อ pH เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่า $1/n$ เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่สมการแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชในการดูดซับ COD ในน้ำคอนเดนเสท

pH of Condensate	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_f	$1/n$	R^2
7	1.10	0.00399	0.969	0.010	0.74	0.977
8	1.05	0.00472	0.974	0.013	0.70	0.984
9	1.62	0.00452	0.830	0.007	0.96	0.832

4.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับ ซีโอดีในน้ำคอนเดนเสทที่ปริมาณถ่านกัมมันต์และ pH ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการดูดซับมีแนวโน้มที่จะใช้จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมในการอธิบายอัตราการดูดซับได้ เนื่องจากมี R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวการดูดซับต่อตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อ pH ของน้ำคอนเดนเสทมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการดูดซับลดลง ถึงแม้ว่าสุดท้ายในชั่วโมงที่ 4 ที่ pH สูงขึ้นจะได้ร้อยละการกำจัดซีโอดีมากกว่าก็ตาม ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าปริมาณถ่านกัมมันต์มีผลโดยตรงต่อการดูดซับซีโอดี ในน้ำคอนเดนเสท ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการดูดซับจะลดลงจนคงที่ และเมื่อน้ำคอนเดนเสทมีค่า pH ที่สูงขึ้นไหลผ่านถ่านกัมมันต์อาจทำให้อัตราการดูดซับลดลง เนื่องจากน้ำคอนเดนเสทที่มีค่า pH สูงจะมีลักษณะเป็นฟองและฟิล์มบาง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่งผลให้การสัมผัสพื้นที่ผิวอาจน้อยลงและมีโอกาสที่รูพรุนของถ่านกัมมันต์จะถูกปิดด้วยชั้นฟิล์มจากน้ำคอนเดนเสทที่มีค่า pH สูง ดังนั้นจึงเลือกใช้ pH 7-8 สำหรับปรับลดค่า pH น้ำคอนเดนเสทสำหรับขั้นตอนการศึกษาในระดับโรงงานต้นแบบในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.5 ลักษณะฟองและฟิล์มบนผิวน้ำของน้ำคอนเดนเสทที่ pH สูง

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับ COD ในน้ำคอนเดนเสทที่ปริมาณถ่านกัมมันต์และ pH ต่าง ๆ

Pseudo-first order kinetic									
Activated carbon dose (g per 1 L)	pH = 7			pH = 8			pH = 9		
	k_1	q_e	R^2	k_1	q_e	R^2	k_1	q_e	R^2
25	1.52	0.01	0.7317	1.12	0.61	0.9999	0.83	1.92	0.9591
50	2.54	1.29	0.9987	0.99	0.24	0.8723	0.89	0.99	0.8191
100	0.38	0.03	0.8467	0.16	0.00	0.4231	1.60	1.01	0.9911
125	2.08	0.00	0.6479	0.74	0.04	0.9969	1.05	0.44	0.9944
150	1.97	0.00	0.5125	1.97	0.00	0.6294	1.13	0.25	0.9144
Pseudo-second order kinetic									
Activated carbon dose (g per 1 L)	pH = 7			pH = 8			pH = 9		
	k_2	q_e	R^2	k_2	q_e	R^2	k_2	q_e	R^2
25	49.37	0.64	0.9905	1.14	0.72	0.9988	0.279	1.752	0.9646
50	2.13	0.46	0.9957	2.35	0.47	0.9971	0.250	0.748	0.9524
100	11.11	0.29	0.9991	3.23	0.30	0.9993	0.007	0.590	0.8421
125	11.58	0.25	0.9997	9.87	0.26	0.9999	0.003	0.513	0.8629
150	4.70	0.22	0.9998	7.08	0.22	0.9997	0.024	0.296	0.9787

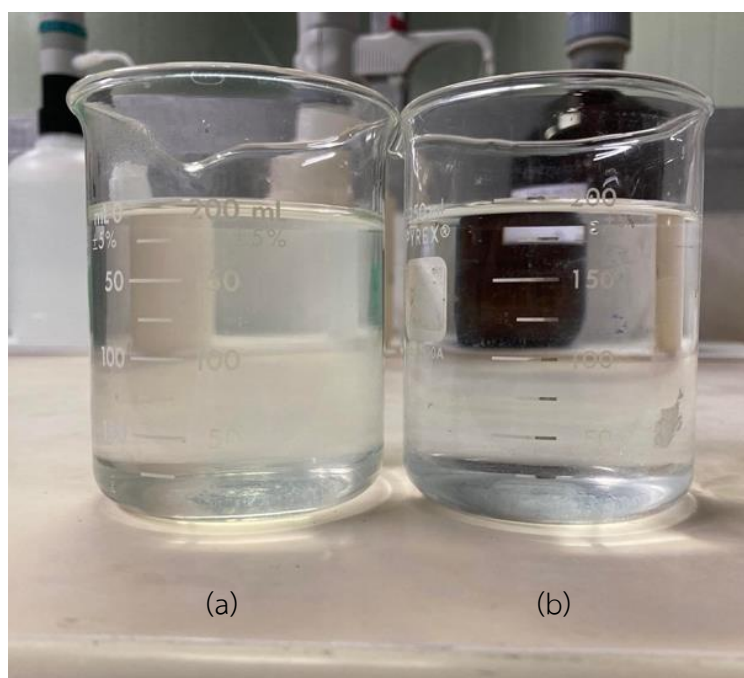
4.4 ผลของอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

ผลของการปรับ pH และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าพารามิเตอร์ที่วัดในคอนเดนเสทลดลงทุกอัตราการไหลรวมถึงกลืนทำให้คุณภาพของคอนเดนเสทที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ผ่านมาตรฐานน้ำใช้ที่ป้อนเข้ากระบวนการผลิต ลักษณะน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความใสขึ้นดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นจึงสามารถใช้อัตราการไหลที่ 2.5 ลบ.ม./ชม. ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตน้ำคอนเดนเสทจากโรงงานในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.5 ผลของการปรับ pH และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

Parameters*	Original Condensate	Treated condensate at flow rate (m ³ /h)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH	9.12-9.83	7.33	7.34	7.36	7.38	7.48
Total Iron (ppm as Fe ²⁺)	0.09-016	0.08	0.10	0.04	0.02	0.02
Total Hardness (ppm as CaCO ₃)	3.6-13.4	8.5	4.0	3.7	3.6	3.2
Chloride (ppm as Cl ⁻)	11-19	19	18	11	9	12
Residual Free Chlorine (ppm)	0.14-0.23	0.10	0.11	0.08	0.06	0.08
COD (mg/L)	281-394	68.5	115.0	96.5	71.8	79.3
Turbidity (NTU)	4.32-6.91	0.62	0.76	0.68	0.72	0.64
Conductivity (μS/cm)	378-492	252	321	372	287	326
Odor	Fishy	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

*แสดงเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 0.1 น้ำคอนเดนเสท (a) ก่อนบำบัด และ (b) หลังบำบัด

4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อทดลองหาอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในการใช้บำบัดน้ำคอนเดนเสท

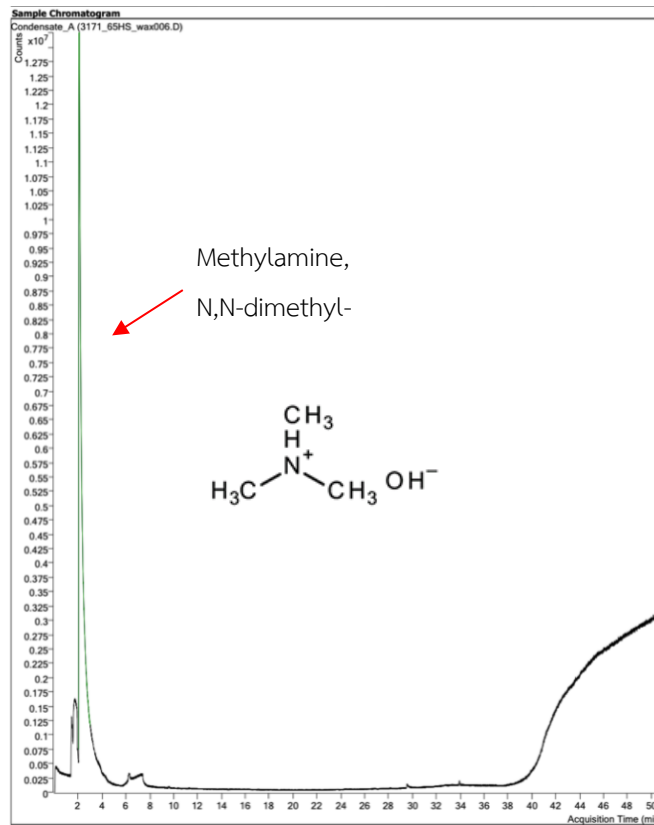
จากการทดลองบำบัดน้ำคอนเดนเสทอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม. เป็นเวลา 1 เดือน และเก็บตัวอย่างน้ำและถ่านกัมมันต์เพื่อนำไปวิเคราะห์ที่ได้โดยผลของคุณภาพน้ำคอนเดนเสทก่อนและหลังบำบัดด้วยการถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่า pH ของน้ำคอนเดนเสทเมื่อผ่านคอลัมน์มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ ปริมาณไอออนเหล็กซึ่งมีอยู่น้อยมากถูกกำจัดไปเกือบหมด ปริมาณคลอไรด์และคลอรีนอิสระสามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การลดลงของค่าการนำไฟฟ้าแสดงว่าไอออนในคอนเดนเสทบางส่วนถูกกำจัดออกไป ความกระด้างทั้งหมดลดลง 50% สอดคล้องกับปริมาณ Ca ที่พบเพิ่มขึ้นบนถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 4.7 ค่าความขุ่นลดลงมากกว่า 85% สอดคล้องกับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หายไป ในคอนเดนเสทตรวจพบสารประกอบเมทิลเอมีนดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่มีสี เกิดจากแอมโมเนียทำปฏิกิริยากับเมทิล มีกลิ่นคาว ส่งผลให้น้ำคอนเดนเสทมีกลิ่นคาว ในขณะที่หลังการบำบัดด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์พบว่าไม่เจอสารประกอบอินทรีย์เมธิลลามีน ซึ่งสอดคล้องกับน้ำคอนเดนเสทหลังบำบัดที่ไม่มีกลิ่นคาว การลดลงของเมทิลเอมีนทำให้ค่าซีไอดีลดลงมากกว่า 70 % ซึ่งการลดลงของสารอินทรีย์ที่วัดได้ในรูปของซีไอดีนี้ สามารถยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนธาตุคาร์บอนบนถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว (ตารางที่ 4.7) การลดลงของสารประกอบและไอออนในคอนเดนเสททำให้ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น และเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนผ่านชั้นถ่านกัมมันต์และระบบบำบัดจึงทำให้ค่า DO เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบการลดลงของ K และ Na จากถ่านกัมมันต์ แสดงว่ามีการชะล้างไปอยู่ในน้ำคอนเดนเสท อย่างไรก็ตามคาดว่า การชะล้างนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงแรกของการใช้งาน พื้นผิวที่ถ่ายภาพด้วย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นอีกหนึ่งหลักฐานในการยืนยันการเกิดการดูดซับของสารประกอบและไอออนบนพื้นผิวและทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง

ตารางที่ 0.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำคอนเดนเสทก่อนและหลังการใช้งานในระบบบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ที่อัตราการไหลน้ำคอนเดนเสท 2.5 ลบ.ม./ชม.

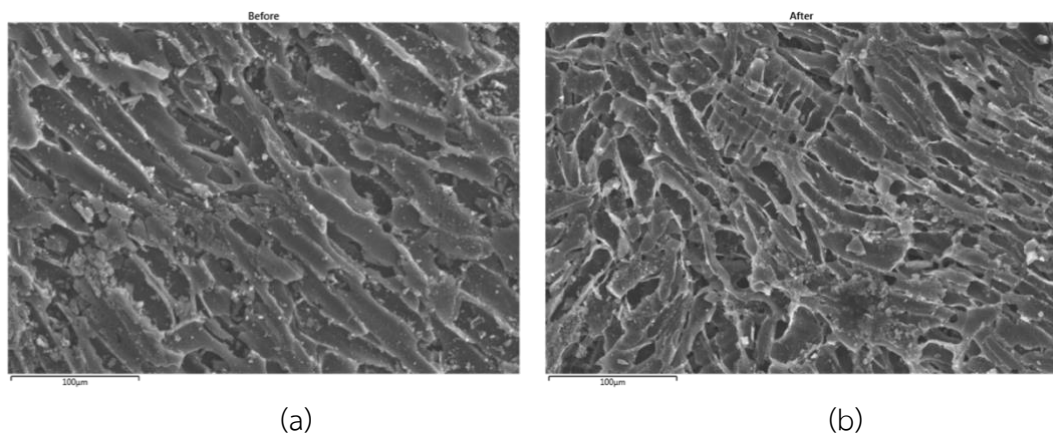
Parameters	Original condensate*	Treated condensate*	Removal Efficiency (%)
pH	9.58**	7.45	
Total iron (mg/L as Fe ²⁺)	0.15	0.03	80.00
Total hardness (mg/L as CaCO ₃)	6.2	4.2	32.26
Chloride (mg/L as Cl ⁻)	13	9	30.77
Residual free chlorine (mg/L)	0.19	0.04	78.95
COD (mg/L)	381.0	85.2	77.64
Turbidity (NTU)	5.64	1.38	75.53
Conductivity (µS/cm)	405	329	18.77
Dissolved (DO) (mg/L)	2.6	4.2	-
Total suspended solid (mg/L)	10.0	<0.5	>99.9
Ammonia-Nitrogen (mg/L)	128.14	8.95	93.02
Odor	Fishy	Normal	-
Detected compounds by GC-MS	Methylamine	None	-

*ค่าเฉลี่ย

**มีการปรับลด pH ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์



รูปที่ 0.2 โครมาโทแกรม GC-MS ของน้ำคอนเดนเสทก่อนบำบัด



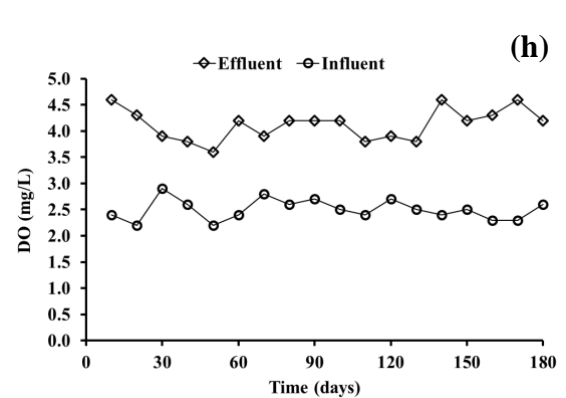
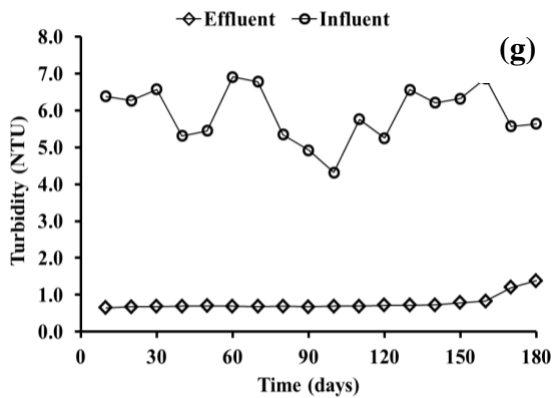
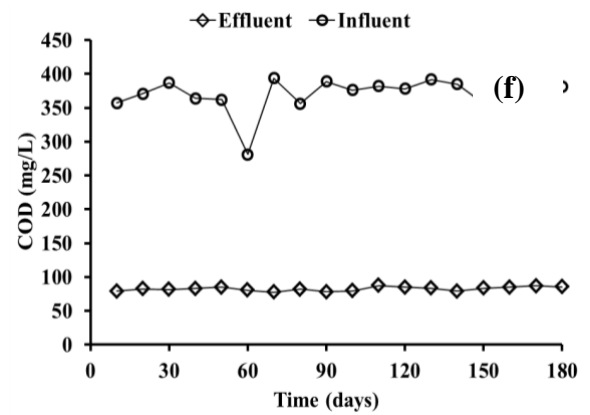
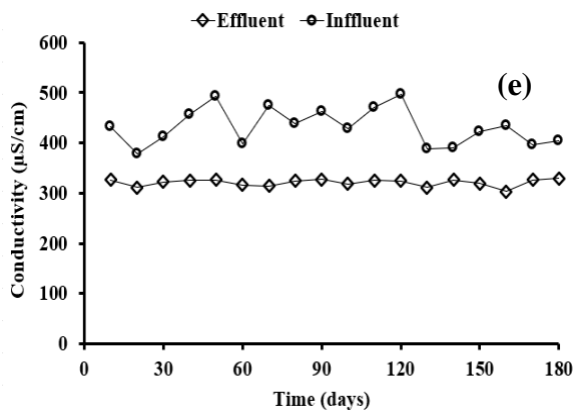
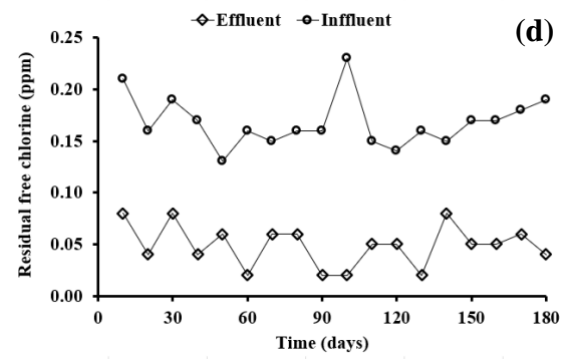
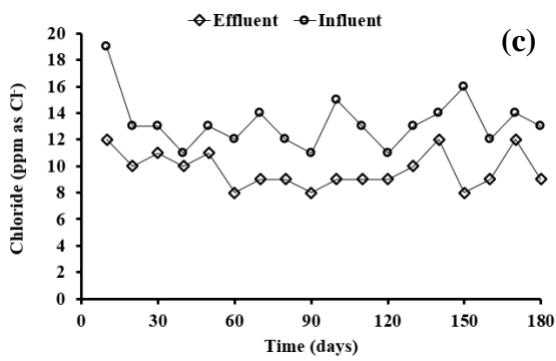
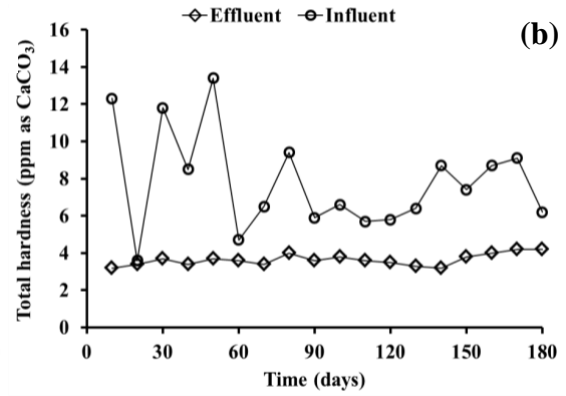
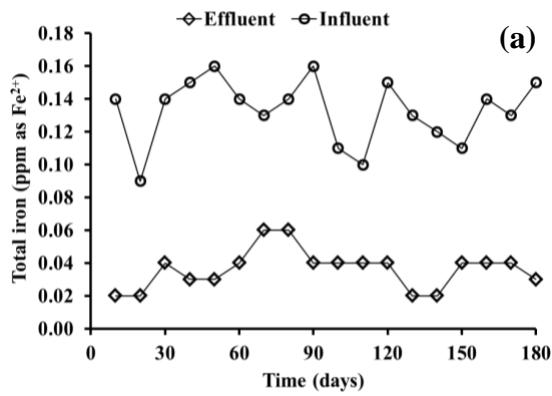
รูปที่ 0.3 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของถ่านกัมมันต์ (a) ก่อนบำบัด และ (b) หลังบำบัด

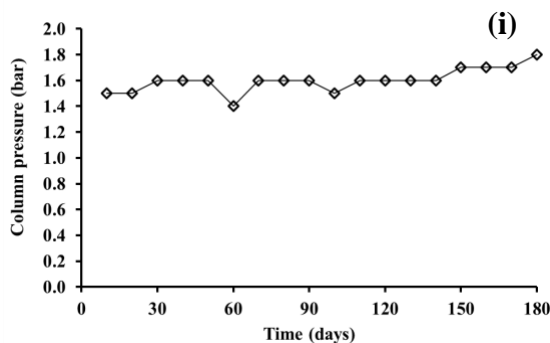
ตารางที่ 0.2 องค์ประกอบของธาตุในถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท

Element	Original activated carbon	1 month used activated carbon
C	92.71 ±0.83	93.59 ±0.59
O	4.34±0.40	4.42±0.52
Na	0.24±0.07	Not detected
Mg	0.11±0.03	0.10±0.02
Si	0.15±0.07	0.12±0.03
P	0.15±0.03	0.25±0.02
Cl	0.19±0.04	0.17±0.03
K	1.63±0.50	Not detected
Ca	0.12±0.05	0.23±0.05
Cu	0.19±0.04	0.50±0.08
Zn	0.17±0.04	0.42±0.08
S	0±0.00	0.20±0.03

รูปที่ 4.9 แสดงค่าสมบัติของน้ำคอนเดนเสทก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 180 วัน ที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม. พบว่าค่าสมบัติต่าง ๆ หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับน้ำคอนเดนเสทที่เข้าระบบบำบัดในแต่ละวัน โดยที่ระยะเวลา 180 วัน ไม่ได้ส่งผลต่อค่าธาตุเหล็กทั้งหมด ค่าคลอไรด์ คลอรีนอิสระ และค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่ความดันของของระบบเพิ่มขึ้นจาก 1.6 bar ไปเป็น 1.8 bar ที่ระยะเวลา 180 วัน ยกเว้นวันที่ 60 และ 100 ค่าความดันของระบบลดลง เนื่องจากคุณภาพน้ำคอนเดนเสทที่เข้าระบบ ณ วันดังกล่าว มีสมบัติแตกต่างจากวันอื่น ๆ โดยคุณภาพน้ำในวันดังกล่าวมีค่าซีโอดี และค่าความกระด้างที่ต่ำกว่าวันอื่น ๆ ส่งผลให้ความดัน และการกำจัดซีโอดีในระบบลดลง ในขณะที่ค่าการกำจัดความขุ่นใน 130 วันแรก ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วง 87.8-89.0% ในขณะที่ระยะเวลา 130-180 วัน ค่าการกำจัดความขุ่นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลงจาก 87.7% เหลือ 76.6% แต่อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำอย่างต่อเนื่องที่สภาวะการดำเนินการที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม. ไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัดซีโอดีของน้ำคอนเดนเสท ค่าการกำจัดซีโอดีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าการกำจัดซีโอดี

เฉลี่ย 82.46% นอกจากนี้เมื่อคำนวณสมดุลมวลของการกำจัดซีโอดีต่อปริมาณของถ่านกัมมันต์ พบว่าการทดลองนี้สามารถกำจัดซีโอดี 193.86 kg-COD/kg-ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความจุ การดูดซับสูงสุดที่ทำนายได้จากการไอโซเทอมการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับของซีโอดีใน คอนเดนเสท สอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพแบบหลายชั้น ทำให้ สามารถเกิดการคายซับของเมธิลลามีนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ก่อให้เกิดกลิ่นในระหว่างที่มี การหยุดเดินระบบเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงในแต่ละวันได้ อย่างไรก็ตามตลอดระยะเวลา 180 วัน คุณภาพของน้ำยังคงผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นเพื่อเป็นการสะดวกต่อการใช้งานจริงจะ กำหนดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ไว้ที่ 180 วัน เพื่อสามารถกำหนดการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์อยู่ที่ ปีละ 2 ครั้งได้





รูปที่ 0.4 สมบัติของน้ำคอนกรีตก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 180 วัน ที่อัตราการไหล 2.5 ลบ.ม./ชม (a) total iron, (b) total hardness, (c) chloride, (d) residual free chlorine, (e) conductivity, (f) COD, (g) turbidity, (h) DO, and (i) column pressure

4.6 การนำน้ำคอนกรีตหลังบำบัดกลับไปใช้ในการผลิตน้ำมันปลา

การศึกษานำน้ำคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลา เป็นการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่กระบวนการนำน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมันปลาเข้มข้นและน้ำโปรตีนเข้มข้นเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำและส่งไปใช้ยังกระบวนการผลิตน้ำมันปลา ตามรูปที่ 1.1 โดยกำหนดใช้อัตราการไหลที่ 2.5 ลบ.ม.ต่อ ชม. เพื่อให้สามารถรองรับอัตราการใช้น้ำจริงของโรงงานได้ จากนั้นเก็บตัวอย่างสินค้าน้ำมันปลาตามขั้นตอนการเก็บตัวอย่างประจำวันในการทำงานจริง เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมี เป็นเวลา 9 วัน

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของค่าทางกายภาพและเคมีของสินค้าน้ำมันปลา ที่ใช้น้ำคอนกรีตจากการบำบัดในกระบวนการผลิต เข้าสู่กระบวนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการผลิตของแต่ละวัน ในการทดลอง โดยปกติการวัดค่าสมบัติเฉพาะของบริษัทจะรวมตัวอย่างสินค้ามากกว่า 3 วันขึ้นไปเพื่อเป็นตัวแทนสินค้า จากการทดลองจึงได้แบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ชุด พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของน้ำมันต่อวัตถุดิบของชุดที่หนึ่งมีค่า 5.32, 5.90 และ 6.05% ชุดที่สองมีค่า 6.32, 5.97 และ 6.173% และชุดที่สามมีค่า 6.11, 5.94 และ 6.25% ซึ่งมีความมากกว่ามาตรฐานที่ตั้งไว้ ด้านสมบัติทางกายภาพแม้ในชุดที่หนึ่งจะเจอปัญหาเรื่องสีที่ดูเข้มเล็กน้อยและในชุดที่สองเจอปัญหาเรื่องลักษณะที่ดูขุ่นเล็กน้อย แต่โดยภาพรวมผลของสินค้าทั้งสามชุด อยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยเฉพาะด้านกลิ่นที่ทั้งสามชุดการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามปัญหาด้านกายภาพก็มีการพบเจอในสินค้าที่ผลิตปกติด้วย

เช่นกัน ทำให้สมบัติทางกายภาพไม่ต่างกัน ด้านสมบัติทางเคมีประกอบด้วยค่า %Moisture %FFA และ %Acid Value โดยพบว่าตัวอย่างการทดลองทั้งหมดมีค่า %Moisture สูงสุดเพียง 0.11% จากค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.5% และค่า %FFA จากตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสูงสุด 3.48% จากค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5.0% และ %Acid Value จากตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสูงสุด 6.93% จากค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 10% ในขณะที่สมบัติเฉพาะของบริษัททั้ง 3 ตัวแปรผ่านตามาตรฐานทั้งหมด ได้แก่ตัวแปร x มาตรฐานตั้งไว้ต้องมากกว่า 30% ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้งสามชุดมีค่า 35.24, 34.88 และ 33.76% ตามลำดับ และค่าตัวแปร xx มาตรฐานตั้งไว้ต้องมากกว่า 25% ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้งสามชุดมีค่า 25.19, 25.29 และ 25.48% ตามลำดับ และค่าตัวแปร xxx มาตรฐานตั้งไว้ต้องมากกว่า 5% ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้งสามชุดมีค่า 6.38 6.03 และ 5.79% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายและเคมีของสินค้าน้ำมันปลาที่ใช้ น้ำคอนเดนเสทหลังผ่านการบำบัด

Run No.	Condensate flow fed to adsorber (m ³ /h)	Yield (%fish oil/raw material)	Physical properties			Chemical properties			Specific properties ^c		
			Color	Odor	Appearance	Moisture (%)	FFA (%)	Acid Value (%)	x	xx	xxx
Required Specification		> 5.89%	Good	Good	Good	< 0.5%	< 5%	< 10%	> 30%	> 25%	> 5%
1	2.61	6.32	Good ^a	Good	Good ^b	0.08	2.8808	5.7328	35.24	25.19	6.38
2	2.53	5.90	Good ^a	Good	Good	0.11	3.2439	6.4554	n.d.	n.d.	n.d.
3	2.48	6.05	Good ^a	Good	Good	0.10	2.7816	5.3540	n.d.	n.d.	n.d.
4	2.66	6.32	Good	Good	Good ^b	0.07	2.8732	5.7177	34.88	25.29	6.03
5	2.53	5.97	Good ^a	Good	Good ^b	0.06	2.9505	5.8715	n.d.	n.d.	n.d.
6	2.56	6.17	Good	Good	Good ^b	0.10	3.4848	6.9348	n.d.	n.d.	n.d.
7	2.55	6.11	Good	Good	Good	0.08	2.4635	4.9074	33.76	25.48	5.79
8	2.53	5.94	Good	Good	Good ^b	0.08	2.0447	4.0960	n.d.	n.d.	n.d.
9	2.52	6.25	Good	Good	Good	0.06	2.5198	5.0144	n.d.	n.d.	n.d.
Non treated condensate		5.8-6.2%	Good	Fishy	Good	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

^a slightly darkened ^s slightly thick ^b confidential n.d. = not determined

4.7 การประเมินระยะเวลาคืนทุนของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท

ต้นทุนในการติดตั้งระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทด้วยระบบดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ทางการค้า Eunicarb ID900 ออกแบบสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลอยได้ของบริษัท ที่อัตราการไหลของคอนเดนเสทที่ 2.5 ลบ.ม./ชม. ใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 35 L (safety factor = 1.4) เดินระบบตามกำลังการผลิตจริงเฉลี่ย 18 ชม./วัน ปฏิบัติการ 300 วัน/ปี ซึ่งจะสามารถบำบัดน้ำคอนเดนเสทได้ คิดเป็น 45 ลิตร/วัน ต้นทุนการติดตั้งระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสทเท่ากับ 264,500 บาท รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.9 ในขณะที่ต้นทุนในการเดินระบบหรือต้นทุนแปรผันเท่ากับ 71,448 บาท/ปี (ตารางที่ 4.10) คิดเป็นต้นทุนในการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการเท่ากับ 8.14 บาท/ลบ.ม. โดยสามารถประหยัดต้นทุนในส่วนของการใช้น้ำใช้ในกระบวนการและค่าบำบัดคอนเดนเสทจำนวน 202,500 บาท/ปี มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.86 ปี (ตารางที่ 4.11)

ตารางที่ 0.3 ต้นทุนการติดตั้งเริ่มต้นของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท

รายการค่าใช้จ่ายการติดตั้ง	จำนวนเงิน	หน่วย
เครื่องกรองน้ำสแตนเลสขนาด Ø20*150 ซม.	28,000	บาท
ระบบท่อ/วาล์วพีวีซี ของระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	7,000	บาท
ระบบท่อ/วาล์ว สแตนเลส สำหรับส่งน้ำที่บำบัดไปยังกระบวนการผลิต ระยะทาง 40 m	30,000	บาท
ปั้มน้ำแรงดัน Grundfos (900 W)	30,000	บาท
ปั้มน้ำเคมี Grundfos DMB 5-6bar (250 W)	10,000	บาท
ปั้มลม (80 W) พร้อมหัวทราย	1,000	บาท
ถังพลาสติก PE สำหรับกรด 100 ลิตร	1,000	บาท
ถังสแตนเลสสำหรับคอนเดนเสท 1,000 ลิตร	15,000	บาท
ถังสแตนเลสสำหรับน้ำที่บำบัดแล้ว 10,000 ลิตร	120,000	บาท
อุปกรณ์และอะไหล่เพิ่มเติม	2,500	บาท
ค่าติดตั้ง	20,000	บาท
รวม	264,500	บาท

ตารางที่ 0.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่อปีของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท

รายการค่าใช้จ่ายต่อปี	จำนวนเงิน	หน่วย
ถ่านกัมมันต์ Eunicarb ID900 เปลี่ยน 2 ครั้ง/ปี ครั้งละ 35 ลิตร (ราคา 2150 บาท/กระสอบ 50 L)	3,010	บาท/ปี
น้ำยาปรับ pH ชนิดกรด ต้องเติม 4.3 mL/h หรือ 23.22 L/ปี (ราคา 2300 บาท/ถัง 20 L)	2,670	บาท/ปี
ค่าไฟฟ้า จากจำนวนวัตต์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 1230 วัตต์ เดินระบบ 18 ชม./วัน, 300 วัน/ปี (ค่าไฟ 4 บาท/หน่วย)	26,568	บาท/ปี
ค่าแรง (ปฏิบัติงาน 1 ชม./วัน, 300 วัน/ปี) (ค่าแรง 340 บาท/วัน (8 ชม))	12,750	บาท/ปี
ค่าซ่อมบำรุง (10% ของต้นทุนการติดตั้งเริ่มต้น)	26,450	บาท/ปี
รวม	71,448	บาท/ปี

ตารางที่ 0.5 การวิเคราะห์ต้นทุนรวม ประโยชน์ที่ได้รับและระยะเวลาคืนทุนของระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท

ต้นทุนรวมต่อปี (ต้นทุนคงที่ต่อปี+ต้นทุนแปรผันต่อปี)	109,901	บาท/ปี
ค่าซาก (กำหนดมูลค่าซากของระบบเมื่อสิ้นปีที่ 10 มีมูลค่า 10% ของราคาต้นทุนระบบบำบัดน้ำคอนเดนเสท)	24,450	บาท
ค่าเสื่อมราคา (มูลค่าการลงทุน-ราคาซาก) / อายุการใช้งาน (10 ปี)	24,005	บาท/ปี
ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส ((มูลค่าการลงทุน+ราคาซาก)/2) * อัตราดอกเบี้ย 10% ต่อปี	14,448	บาท/ปี
ต้นทุนคงที่ต่อปี (Fixed cost) (ค่าเสื่อมราคา + ค่าเสียโอกาส)	38,453	บาท/ปี
ต้นทุนผันแปรต่อปี (Variable cost)	71,448	บาท/ปี
ต้นทุนต่อปริมาณคอนเดนเสทที่ผลิตได้ (ต้นทุนรวมต่อปี/ปริมาตรต่อปี (13500 ลบ.ม.))	8.14	บาท/ลบ.ม.
ผลประโยชน์ที่ได้รับ	202,500	บาท/ปี
ทดแทนน้ำใช้ในกระบวนการ (2.5 ลบ.ม/ชม. 18 ชม/วัน 300 วัน/ปี (ค่าน้ำ 10 บาท/ลบ.ม.))	135,000	บาท/ปี

ทดแทนการบำบัดน้ำคอนเดนเสทด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย (2.5 ลบ.ม/ชม. 18 ชม/วัน 300 วัน/ปี (ค่าบำบัดน้ำ 5 บาท/ลบ.ม.)	67,500	บาท/ปี
ผลประโยชน์สุทธิ (ผลประโยชน์ที่ได้รับ – ต้นทุนรวมต่อปี)	92,599	บาท/ปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ต้นทุนการติดตั้งระบบบำบัดน้ำคอนเดน เสท/ผลประโยชน์สุทธิต่อปี)	<u>2.86</u>	ปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการบำบัดน้ำคอนเดนเสทจากกระบวนการผลิตน้ำนิ่งปลาเข้มข้น และน้ำโปรตีนเข้มข้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้ของโรงงานผลิตปลาทุ่นกระป๋อง ซึ่งต้องมีการปรับลดค่า pH และกำจัดกลิ่นออกก่อนนำไปใช้เป็นน้ำทดแทนในกระบวนการ พบว่าการปรับ pH มีส่วนช่วยให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น การออกแบบคอมลัมน์ดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 150 ซม. สามารถรองรับอัตราการไหลที่ 2.5 ลบ.ม. ต่อชม. ซึ่งรองรับอัตราการผลิตน้ำคอนเดนเสทของหน่วยผลิตจริงได้ถึง 6 เดือน โดยที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำคอนเดนเสทที่ผ่านมาตรฐานน้ำใช้ที่กำหนดโดยบริษัท และจากการนำน้ำคอนเดนเสทที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ Eunicarb ID900 ASTM Mesh Size 8x16 ไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปลาพบว่า สามารถผลิตน้ำมันปลาได้ผ่านทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ นอกจากนี้จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่าสามารถลดต้นทุนของน้ำป้อนเข้ากระบวนการและการบำบัดน้ำคอนเดนเสทได้ 202,500 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.86 ปี จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความพร้อมในการนำไปใช้ประโยชน์ให้กับทางบริษัทต่อไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อาจทำงานวิจัยเพื่อหาวิธีการฟื้นฟูสภาพ/การล้างกลับของถ่านกัมมันต์หรือผลิตถ่านกัมมันต์

5.2.2 ศึกษา initial adsorption rate และ adsorption rate เพื่อลดระยะเวลาเริ่มต้นในการดูดซับให้เร็วขึ้น ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ในการแข่งขันทางการค้า

บรรณานุกรม

- จันทิมา ชั่งสิริพร, พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และ พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์จาก ถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ (รายงานการวิจัย). สาขา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จารุวรรณ คำแก้ว, ประสิทธิ์ รุ่งเรือง และ นรารัตน์ ทองศรีนุ่น. (2559). การเตรียมถ่านกัมมันต์จาก วัสดุเหลือทิ้งต้นสาคุเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดไอออนตะกั่วจากสารละลาย (รายงานการ วิจัย). สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). ถ่านกัมมันต์. สืบค้นจาก :
http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf [8
 มกราคม 2564]
- เฉลิมชัย เรืองวิริยะชัย. (2559). ถ่านกัมมันต์ดำดีมีประโยชน์ วารสารวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม, ปิยะมาส สิริแสงสว่าง และ วีราภรณ์ ผิวสะอาด. (2557). การดูดซับกลิ่นของ ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากขยะพลาสติกด้วยถ่านกัมมันต์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงค ลธบุรี, 12 (2), 1-10.
- นเรศ กิจจาพัฒน์พันธ์. (2562). สถานการณ์สินค้าปลาทูน่าและผลิตภัณฑ์ในช่วง 9 เดือนแรก. สืบค้น 8 มกราคม 2564. จาก
[https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/Monthly%20report/tuna/ทูน่า%209%20เดือน%202562%20\(1\).pdf](https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/Monthly%20report/tuna/ทูน่า%209%20เดือน%202562%20(1).pdf)
- ปารินดา สุขสบาย. (2555). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตข้อต่อท่อประปาเหล็กด้วย การตกตะกอนเคมีร่วมกับการดูดซับ. วารสารวิจัย มสท สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 5(1), 1-11.
- พงศ์ธร แสงชุติ. 2560. การกำจัดกรดฮาโลอะซีติก (HAAs) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและ รวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี). sutir.sut.
<http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7565>
- ภูมรินทร์ คำเดชศักดิ์ และ ศรีณย์ ยวงจันทร์ (2561). การบำบัดปรอทที่ปนเปื้อนในอากาศด้วย ถ่านกัมมันต์. วารสารสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 22 (1), 44-52.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

2547. ถ่านกัมมันต์ สืบค้นจาก : <http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS900-2547.pdf> [8 มกราคม 2564].

สุนันทา ช้องสาย. (2562). การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากการผลิตใบจากมวนยาสูบ (รายงานการวิจัย) สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เสาวภา ไวยสุศรี. (2559). การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 26(3), 475-486. <http://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2016.01.003>.

หจก.แอล เอส วอเตอร์ เจ เทคโนโลยี(ประเทศไทย). (2566). เครื่องกรองน้ำและและสร้างกรองน้ำ. [Impage]. สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2566 จาก

http://www.lswaterjtechnologythailand.com/product%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B2/?fbclid=IwAR0s_v4Vdf7zu5RlsyuFnpKpyHGjMFoeu4VjiHsfRNZThvU9JagPef_vtE.

ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี-ริน เคมีคอล. 2562. ถ่านกัมมันต์. สืบค้นจาก :

<http://www.wee-rinchem.co.th/?cid=2109520> [8 มกราคม 2564].

อดิศักดิ์ ศิริรักษ์. (2561). การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสปีโรสแตลไวโอเลต (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์). kb. psu.

<http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2016/12267>.

อุไรวรรณ มณีโชติ, ยุพดี ชัยสุขสันต์, และ เสาวภา โชติสุวรรณ. (2553). การดูดซับสารประกอบฟีนอลจากสารละลายโดยชีวมวลสาหร่ายฝักกาด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 18(1), 40-50.

Chen, D., Chen, X., Chen, H., Cai, B., Wan, P., Zhu, X., Sun, H., Sun, H., & Pan, J. (2016). Identification of odor volatile compounds and deodorization of *Paphia undulata* enzymatic hydrolysate. *Journal of Ocean University of China*, 15(6), 1101–1110. <https://doi.org/10.1007/s11802-016-3166-7>

Duong, D.D. (1998). Adsorption analysis: Equilibria and Kinetics. <https://doi.org/10.1142/p111>

- Feng, G., Jia, R., Sun, S., Wang, M., Zhao, Q., Xin, X., & Liu, L. (2020). Occurrence and removal of 10 odorous compounds in drinking water by different treatment processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18924–18933. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08267-5>
- Márquez, P., Benítez, A., Caballero, Siles, J. A., & Martín, M. A. (2021). Integral evaluation of granular activated carbon at four stages of a full-scale WWTP deodorization system. *Science of the Total Environment*, 754, 142237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142237>
- Shakoor, S., & Nasar, A. (2018). Adsorptive decontamination of synthetic wastewater containing crystal violet dye by employing Terminalia arjuna sawdust waste. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.004>
- Shahrokhi-Shahraki, R., Benally, C., El-Din, M. G., & Park, J. (2021). High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, 264, 128455. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128455>
- Siwila, S., & Brink, I. C. (2020). A novel low-cost multi-barrier system for drinking water treatment in rural and suburban areas. *Water Practice and Technology*, 15(1), 48–65. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.083>
- Trimethylamine. MAK Value Documentation, 198. The MAK-Collection for Occupational Health and Safety. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 27 October 2014. pp. 1–9, DOI 10.1002/3527600418.mb7550e0914
- Xia, P., Zhang, S., Yu, J., Ye, H., Zhang, D., Jiang, L., Wang, Z., & Yin, D. (2020). Complex odor control based on ozonation/GAC advanced treatment: optimization and application in one full-scale water treatment plant. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00313-w>
- Zhang, Y., Ma, X., & Dai, Z. (2019). Comparison of nonvolatile and volatile compounds in raw, cooked, and canned yellowfin tuna (*Thunnus albacores*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14111>

Zhuang, K., Wu, N., Wang, X., Wu, X., Wang, S., Long, X., & Wei, X. (2016). Effects of 3 Feeding Modes on the Volatile and Nonvolatile Compounds in the Edible Tissues of Female Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*). *Journal of Food Science*, 81(4), 968–981. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13229>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

1. กรดไขมันอิสระ(Free Fatty Acid) โดยวิธีไทเทรต(Titrate)

- 1.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 28.2±0.2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มล. จดบันทึกน้ำหนัก
- 1.2 เติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นกลาง 50-100 มล. โดยการเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยด และปรับให้เป็นกลางด้วย N NaOH หยดต่างที่ละลายพร้อมทั้งเขย่า หรือกวนจนได้สารละลายแอลกอฮอล์เป็นสีชมพูถาวร จากนั้นจึงเติมน้ำมัน
- 1.3 เขย่าตัวอย่างเพื่อให้ไขมันละลายในแอลกอฮอล์
- 1.4 ไทเทรตด้วย 0.05 N NaOH (ขณะไทเทรตต้องเขย่าเป็นระยะ ๆ) จนกระทั่งเป็นเป็นสีชมพูจางคงที่อยู่ที่ 1 นาที
- 1.5 เข้าสู่สูตรคำนวณ

$$\% \text{ Free Fatty Acid} = \frac{\text{ml.NaOH} \times \text{N NaOH} \times 28.2}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

2. กรดไขมันอิสระ(Acid Value)

- 2.2 คำนวณได้จากกรดไขมันอิสระโดยใช้สูตร

$$\text{Acid Value(รูปกรดโอเลอิก)} = \% \text{ Free Fatty Acid} \times 1.99$$

3. ความชื้น(%Moisture) โดยวิธี Drying method

- 3.1 อบ Aluminium Dish พร้อมฝาในตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิ 102±2°C เป็นเวลา 1 ชม.
- 3.2 นำมาทำให้เย็นใน Desiccator 45 นาที, ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
- 3.3 ชั่งตัวอย่าง ≈ 5.0000 ±0.1000 กรัม ใน Aluminium Dish จดบันทึกน้ำหนักนำเข้าสู่ตู้อบ 102±2°C เป็นเวลา 3 ชม.
- 3.4 นำมาทำให้เย็นใน Desiccator 45 นาที แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก
- 3.5 นำมาคำนวณ

$$\% \text{ Moisture} = \frac{(W_1 - W_2)}{S} \times 100$$

โดยที่ $W_1 =$ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ(กรัม) > ภาชนะหาความชื้น +
ตัวอย่าง

$W_2 =$ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ(กรัม) > ภาชนะหาความชื้น +
ตัวอย่าง

$$S = \text{น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)}$$

4. โปรตีน(Protein) โดยใช้วิธี Kjeldahl method

4.1 กระบวนการย่อย

4.1.1 ปั่นตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่น

4.1.2 ชั่งตัวอย่างที่ปั่นละเอียดแล้ว 1 ± 0.1 กรัม โดยใช้กระดาษชั่งสารใส่ใน
digestion tube บันทึกน้ำหนัก

4.1.3 ชั่ง $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} : \text{K}_2\text{SO}_4$ (1:10) 10 กรัม ใส่ลงใน digestion tube แต่ละ
tube

4.1.4 เติม conc. H_2SO_4 ปริมาตร 15 มล. ลงใน digestion tube แล้วเขย่าเบา ๆ

4.1.5 เปิดเครื่องย่อยโปรตีน แล้วนำ digestion holder ใส่ลงในเตาย่อยที่อุณหภูมิ
 400°C

4.1.6 สวมเครื่องดักจับไอกรดบนส่วนบนของ digestion holder

4.1.7 เปิด Power เครื่องกำจัดไอกรด

4.1.8 ย่อย Sample ประมาณ 1 ชม. จากนั้นยก digestion block มาตั้งพักให้เย็น

4.1.9 ปิด Power เครื่องย่อย แต่ยังไม่เปิดเครื่องดักจับไอกรดไว้เพื่อตัดจับไอกรดที่
เหลืออยู่

4.2 กระบวนการกลั่น

4.2.1 Pipette 4% Boric acid ปริมาตร 50 มล. ใส่ลงใน Flask พร้อมหยด
indicator ได้แก่ Methyl red 2 หยด Methyl blue 2 หยด ซึ่งจะได้สารละลายสีม่วง

4.2.2 นำ digestion tube ประกอบเข้ากับเครื่องกลั่นและวาง flask ไว้บริเวณ
plate from แล้วให้สายยางจุ่มอยู่ใน 4% Boric acid

4.2.3 ปิด safety door ลง เครื่องกลั่นจะกลั่นตามเวลาของ Method ที่เลือก เมื่อ
กลั่นเสร็จนำ digestion tube และ flask ออกจากเครื่อง

4.3 กระบวนการไทเทรต

4.3.1 นำสารละลายใน flask ที่มีสีเขียวใส ไปไทเทรตด้วย 0.1 HCl จนถึงจุดยุติจะสังเกตเห็นสารละลายเปลี่ยนสีจากสีเขียวใสไปเป็นสีม่วงอ่อน (pH 4±0.1)

4.3.2 บันทึกปริมาตรของไทเทรตที่ยุติ

4.3.3 คำนวณหาปริมาณโปรตีน

$$\%N = \frac{1.4007 \times C \times (V - V_b)}{E}$$

$$\%Protein = \%N \times 6.25$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของ HCl ที่ใช้ไทเทรต

V = ปริมาตร HCl ที่ไทเทรตตัวอย่าง (มล.)

V_b = ปริมาตร HCl ที่ไทเทรตตัวแปลงค์ (มล.)

E = น้ำหนักตัวอย่าง

และ 6.25 คือ factor ในการคำนวณปริมาณไนโตรเจนเป็นปริมาณโปรตีนทั้งหมดในตัวอย่างอาหารทั่วไป

ปริมาณไนโตรเจนในทางทฤษฎี Tryptophane = 13.71%, Ammonium sulfate = 21.20%

5. เกลือ(%Salt)

5.1 ชั่งตัวอย่าง 0.3.0±0.1 กรัม แล้วใส่ใน flask ขนาด 125 มล. แล้วจดบันทึกน้ำหนัก

5.2 บีบสารเคมี 0.1 N AgNO₃ ปริมาตร 25 มล. และตวง Nitric acid ≈ 20 มล.

5.3 นำไปย่อย (ต้มจนเดือด) จนเหลือตัวอย่างประมาณ 25 มล. วางทิ้งไว้ให้เย็น (ประมาณ 15 นาที)

5.4 เมื่อตัวอย่างเย็นแล้วใส่น้ำกลั่น 50 มล.

5.5 ใส่ Fe alum ปริมาตร 5 มล.

5.6 ไทเทรตด้วย 0.1 N NH₄SCN จนได้จุดยุติสีแดงอิฐ

5.7 คำนวณหา %Salt ด้วยสูตร

$$\%Salt = \frac{(25 \times N AgNO_3) - ml NH_4SCN \text{ ที่ใช้} \times NH_4SCN}{\text{จำนวนกรัมตัวอย่าง}} \times$$

5.844

6. ความหนืด(Viscosity)

6.1 ใช้หลอดทดลองตวงตัวอย่าง 10 มล.

6.2 นำตัวอย่างในหลอดทดลองใส่ในกระบอกที่วางไว้บนแผ่นวัดความหนืดทั้งหมด ยกกระบอกออกแล้วจับเวลา 30 วินาที

6.3 อ่านค่าระยะการไหลของตัวอย่างทั้ง 6 มุม แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

7. การวิเคราะห์ Chemical Oxygen Demand (COD) วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method 973.46

7.1 การเตรียมสารละลาย

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.1 N $K_2Cr_2O_7$ (1) นำ $K_2Cr_2O_7$ ประมาณ 5.100 g อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(2) นำไปวางให้เย็นใน Desiccators เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(3) ชั่ง $K_2Cr_2O_7$ 4.931 g(4) เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 mL แล้วคนให้ $K_2Cr_2O_7$ ละลายให้หมด(5) เติม H_2SO_4 ปริมาตร 167 mL(6) เติม $HgSO_4$ 33.3 g

(7) วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

(8) ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่น

ข. การเตรียมสารละลายกรด H_2SO_4 reagent(1) ชั่ง Ag_2SO_4 22 g(2) เติมลงไปในขวด Conc. H_2SO_4 ปริมาตร 2.5 L

(3) วางทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ แล้วจึงนำมาใช้งาน

ค. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (1) ชั่ง $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 19.6 g(2) เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 mL แล้วคนให้ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$

ละลายให้หมด

(3) ปิเปต H_2SO_4 20.0 mL วางทิ้งไว้ให้เย็น

(4) ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่น

ค. การเตรียมสารละลายเจือจาง 20% H_2SO_4

(1) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 180 mL ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL

(2) ปิเปต H_2SO_4 ปริมาตร 50.0 mL เติมลงไป แล้วคนให้เข้ากัน

(3) ถ่ายใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ

200 mL

ค. การเตรียมเฟอโรอิน (Feroin indicator)

(1) ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\text{H}_2\text{O}$) 1.48 g

(2) เติม Ferrous sulfate heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.70 g

(3) ปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำกลั่น

7.2 วิธีทำการทดลอง

ก. ล้างหลอดทดลองและฝาด้วย 20% H_2SO_4 ก่อนทำการทดลอง

ข. เจือจางน้ำตัวอย่างให้อยู่ในช่วงค่าซีโอดี (COD) ที่จะวิเคราะห์

ค. ปิเปตสารละลาย 0.1 N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ปริมาตร 3.0 mL เติมลงไปหลอดทดลอง

ค. ปิเปตตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วปริมาตร 5.0 mL เติมลงไปหลอดทดลอง

ค. ปิเปต H_2SO_4 reagent ปริมาตร 7.0 mL เติมลงไปหลอดทดลอง

ฅ. ปิดฝาหลอดทดลอง แล้วเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ง. นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จ. วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ฉ. นำไปไทเทรตด้วย 0.05 N $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์

ช. จุดยุติจะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

ซ. บันทึกปริมาตรของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้

ฌ. สารละลาย Blank จะต้องทำทุกขั้นตอน (ทุกหลอดเท่าที่เจือจาง) แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำ

ตัวอย่าง

7.3 การหาความเข้มข้นของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

ก. ปิเปตน้ำกลั่น 50.0 mL เติมลงไปขวดรูปชมพู่

ข. ปิเปตสารละลาย 0.1 N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ปริมาตร 5.0 mL เติมลงไปขวดรูปชมพู่

ค. ปิเปต H_2SO_4 reagent ปริมาตร 15.0 mL เติมลงไปขวดรูปชมพู่ แล้วเขย่าให้เข้ากัน

ค. วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ค. หยดเฟอโรอิน 3 หยด

ฅ. นำไปไทเทรตกับสารละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

ง. จุดยุติจะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

จ. บันทึกปริมาตรของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้

7.4 การคำนวณความเข้มข้นของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,

$$N = (0.1) (5) / \text{ปริมาตรของ } \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ ที่ใช้}$$

7.5 การคำนวณค่าซีโอดี (COD)

COD, mL (หลอดทดลอง) = (A-B) (N) (8000) / (ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้)

COD, mL (น้ำตัวอย่าง) = (COD ในหลอดทดลอง) (จำนวนเท่าของการเจือจาง)

เมื่อ A คือ ปริมาตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้ไทเทรตสารละลาย Blank (mL)

B คือ ปริมาตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง (mL)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายทรงฤทธิ์ ใบตุ้ม
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6320310302
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2563

ทุนสนับสนุนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

ทุนอุดหนุนจากบริษัทโซติวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิตจำกัด (มหาชน)