การบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้วัสดุดูดซับจากผักตบชวา

NUTRIENT TREATMENT IN FERMENTED FISH PRODUCTION WASTEWATER UTILIZING ADSORBENT FROM WATER HYACINTH

ชาญชัย คหาปนะ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

การบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้วัสดุดูดซับจากผักตบชวา

ชาญชัย คหาปนะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

NUTRIENT TREATMENT IN FERMENTED FISH PRODUCTION WASTEWATER UTILIZING ADSORBENT FROM WATER HYACINTH

CHANCHAI KAHAPANA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of MASTER OF SCIENCE

(Environmental Technology & Resources Management)

Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้วัสดุดูดซับจากผักตบชวา

ของ

ชาญชัย คหาปนะ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร.ณภัทร โพธิ์วัน)

..... ประธาน
(อาจารย์ ดร.สันทนา นาคะพงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทม์ งามนิยม)

ชื่อเรื่อง	การบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้วัสดุดูดซับจากผักตบชวา
ผู้วิจัย	ชาญชัย คหาปนะ
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ณภัทร โพธิ์วัน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับจากผักตบชวาสำหรับการบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า โดยเตรียมวัสดุดูดซับจากผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ เคมี และกายภาพ-เคมี (ถ่านชีวภาพ) ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับ พบว่า ถ่านชีวภาพให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าความสามารถการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูสูงที่สุด คือ 714.50 และ 400.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิ และปริมาณวัสดุดูดซับ ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง อุณหภูมิในการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณวัสดุดูดซับ 20 กรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ถ่านชีวภาพ ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี และผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยถ่านชีวภาพมีค่าความจุในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนที่คำนวณได้สูงที่สุด คือ 2.84, 20.83 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ : ผักตบชวา, ถ่านชีวภาพ, น้ำเสีย, การดูดซับ, การผลิตปลาร้า

Title	NUTRIENT TREATMENT IN FERMENTED FISH PRODUCTION WASTEWATER UTILIZING ADSORBENT FROM WATER HYACINTH
Author	CHANCHAI KAHAPANA
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Naphat Phowan , Ph.D.

This study focused on how adsorbents from water hyacinth adsorbed nutrients in wastewater from fermented fish production. The water hyacinth adsorbent was first prepared by physical pretreatment, chemical pretreatment and physical and chemical pretreatment (biochar). After that, its properties were studied. The highest Iodine Number (I.N.) was 714.50 mg/g and the Methylene Blue Number (M.B.N.) was 400.00 mg/g was obtained when water hyacinths were prepared for biochar, which represents the enhanced surface area of the material. Moreover, the effects of contact time, adsorption temperature, and an adsorbent dose on adsorption capacity were studied. The results indicated that the optimum conditions were a contact time of 12 hours, an adsorption temperature of 30°C and a 20 g/L dose. The results from the treatment of orthophosphate, ammonia-nitrogen, and nitrite-nitrogen in the wastewater showed that the removal efficiency of adsorbents can be ranked from highest to lowest as follows: biochar, a chemically pretreated sample and a physically pretreated sample. The adsorption isotherm of the orthophosphate, ammonia-nitrogen, and nitrite-nitrogen by the three adsorbents were best described as Langmuir isotherm, which indicated the monolayer. The adsorption capacity of the orthophosphate, ammonia-nitrogen, and nitrite-nitrogen by biochar had the highest efficiency, with an adsorption capacity of 2.84, 20.83 and 0.13 mg/g, respectively.

Keyword : Water hyacinth, Biochar, Wastewater, Adsorption, Fermented fish production

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี จากความกรุณาและความช่วยเหลือในทุกด้านจาก อาจารย์ ดร.ณภัทร โพธิ์วัน อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการทำงานวิจัย การตรวจทานแก้ไขเป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ได้แก่ อาจารย์ ดร. สันทนา นาคะพงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทม์ งามนิยม ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ งานวิจัยในครั้งนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพจากศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์จากห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำสำหรับงานวิจัยจากโรงงานผลิตปลาร้าในพื้นที่ ต.โพนางดำตก อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจที่ดีและให้ความกรุณาอบรมสั่งสอนมาโดยตลอด และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจ และผู้ที่ต้องการศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

ชาญชัย คหาปนะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูปภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 สมมติฐานการวิจัย 3

1.4 ขอบเขตการวิจัย 3

1.5 กรอบแนวคิดการวิจัย 4

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม 6

2.1 ธาตุอาหาร ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า 6

2.2 น้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง 9

2.3 ผักตบชวา 11

2.4 เซลลูโลส 12

2.5 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุ 14

2.6 ทฤษฎีการดูดซับ 16

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย 22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 22
3.2 วิธีการวิจัย 23
บทที่ 4 ผลการวิจัย 29
4.1 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมี 29
4.2 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี 36
4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับจากผักตบชวา 38
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพ 40
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ 59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 63
5.1 สรุปผลการวิจัย 63
5.2 อภิปรายผล 64
5.3 ข้อเสนอแนะ 66
บรรณานุกรม 67
ภาคผนวก 75
ประวัติผู้เขียน 102

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง..... 2

ตาราง 2 ค่าคุณภาพน้ำเสียที่วิเคราะห์ได้จากกระบวนการผลิตปลาส้ม 11

ตาราง 3 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง [25] 12

ตาราง 4 รายการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี..... 24

ตาราง 5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 25

ตาราง 6 ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพ CPWH และ PPWH..... 37

ตาราง 7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ..... 39

ตาราง 8 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนรวม ด้วยวิธีการ BET 39

ตาราง 9 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่เวลาต่างกัน 40

ตาราง 10 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่เวลาต่างกัน (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) 41

ตาราง 11 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 43

ตาราง 12 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 44

ตาราง 13 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างเสีย (ร้อยละ) 46

ตาราง 14 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน..... 48

ตาราง 15 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน (เดซิซีเมนต์ ต่อเมตร) 48

ตาราง 16 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 50

ตาราง 17 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 51

ตาราง 18 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 52

ตาราง 19 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน 53

ตาราง 20 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)..... 54

ตาราง 21 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ) 56

ตาราง 22 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)..... 57

ตาราง 23 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่าง น้ำเสีย (ร้อยละ)..... 59

ตาราง 24 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับออร์โธฟอสเฟต 60

ตาราง 25 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน.. 60

ตาราง 26 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจน 60

ตาราง 27 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับออร์โธฟอสเฟต..... 61

ตาราง 28 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน 62

ตาราง 29 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจน..... 62

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส [27] 13

ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของลิกนิน [27] 14

ภาพประกอบ 3 การปรับสภาพเซลลูโลสด้วยสารละลายเบส [8] 15

ภาพประกอบ 4 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ [32] 19

ภาพประกอบ 5 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช [32] 20

ภาพประกอบ 6 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number; I.N.) ของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน 30

ภาพประกอบ 7 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N.) ของผักตบชวา ที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน 31

ภาพประกอบ 8 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 32

ภาพประกอบ 9 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 32

ภาพประกอบ 10 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 33

ภาพประกอบ 11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน 34

ภาพประกอบ 12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน 35

ภาพประกอบ 13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน 35

ภาพประกอบ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PPWH 36

ภาพประกอบ 15 องค์ประกอบของถ่านชีวภาพและ PPWH 37
ภาพประกอบ 16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ 38
ภาพประกอบ 17 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน . 42
ภาพประกอบ 18 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 44
ภาพประกอบ 19 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนเตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 46
ภาพประกอบ 20 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน..... 49
ภาพประกอบ 21 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน ... 50
ภาพประกอบ 22 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน 52
ภาพประกอบ 23 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน 55
ภาพประกอบ 24 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน 57
ภาพประกอบ 25 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน 58

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางน้ำของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม รวมถึงการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวของชุมชน ทำให้มีน้ำเสียที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำมากขึ้น จากข้อมูลขององค์การจัดการน้ำเสีย [1] พบว่า มีน้ำเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 9 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และสารอินทรีย์ เป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งมาจากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี อุตสาหกรรมชุบเคลือบ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีกิจกรรมจากการซักล้างในครัวเรือน กิจกรรมจากภาคการเกษตร อาทิ การใช้ปุ๋ยเคมี การทำฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น การปล่อยน้ำเสียดังกล่าวสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยที่ไม่ได้รับการบำบัดที่ดีเพียงพอ จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์การเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของสาหร่ายและพืชน้ำหรือยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มแสงที่ส่องผ่านในน้ำและทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างมาก ส่งผลอันตรายต่อสัตว์น้ำรวมถึงน้ำเกิดการเน่าเสีย

อุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่ประกอบกิจการถนอมอาหารประเภท ผัก ผลไม้ สัตว์น้ำเค็ม และสัตว์น้ำจืดด้วยวิธีหมักดอง เช่น โรงงานผลิตปลาร้า โรงงานผลิตผักและผลไม้ดอง มีเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม [2] มีจำนวนโรงงานที่ประกอบกิจการประเภทนี้มากถึง 600 แห่ง ยังไม่รวมกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางหรือขนาดย่อมและกิจการระดับครัวเรือน ซึ่งกระบวนการผลิตอาศัยน้ำในกระบวนการเกือบทุกขั้นตอน ทำให้ต้องใช้น้ำในปริมาณมาก รวมถึงต้องใช้เกลือปริมาณมากในการถนอมอาหาร ยิ่งไปกว่านั้น น้ำเสียจากกระบวนการดังกล่าวจะมีสารปนเปื้อนที่ถูกปล่อยสู่ธรรมชาติ เช่น ฟอสเฟต แอมโมเนีย และไนไตรท์ นอกจากนี้ยังพบว่า วิสาหกิจหรือกิจการในครัวเรือนมักไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า ต.โพนางดำตก อ.สรรพยา จ.ชัยนาท เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น พบว่า มีค่าการนำไฟฟ้า บีโอดี ซีโอดี แอมโมเนีย และออร์โธฟอสเฟต เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์		ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง
		W1	W2	
ค่าพีเอช	-	6.3	5.6	5.5 – 9.0 [3]
ค่าการนำไฟฟ้า	dS/m	95	714.4	<0.75 [4]
บีโอดี	mg/L	2,370.0	>7,000.0	<20 [3]
ซีโอดี	mg/L	3,328.0	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	<120 [3]
โซเดียม	mg/L	52.0	93,600.0	-
คลอไรด์	mg/L	63.0	178,221.0	-
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	mg-N/L	5.7	418.5	<1.1 [4]
ไนเตรท-ไนโตรเจน	mg-N/L	<0.5	<0.5	5 [5]
ไนไตรท์-ไนโตรเจน	mg-N/L	<0.02	<0.02	-
ออร์โธฟอสเฟต-ฟอสเฟต	mg-P/L	23.5	533.2	< 2 [6]

หมายเหตุ W1 คือ ตัวอย่างน้ำจากการล้างปลาก่อนปล่อยสู่ท่อระบายน้ำชุมชน
W2 คือ น้ำเกลือที่ใช้หมักปลาก่อนไหลลงสู่ท่อระบายน้ำชุมชน

วิธีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการหมักดองมีหลายวิธี อาทิ การใช้กระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลาย (Biodegradation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นต้น แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นและอาจไม่เหมาะสมกับโรงงานขนาดเล็ก ดังนั้น วิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ใช้เงินลงทุนและสถานที่ในการดำเนินการน้อย แต่ยังมีข้อจำกัด คือ ความจุในการดูดซับยังมีค่าค่อนข้างต่ำ [7] ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับสภาพวัสดุ เช่น การลดขนาด การใช้สารเคมี การใช้ความร้อน ในการปรับปรุงโครงสร้างหรือสมบัติของวัสดุดูดซับ

งานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นการใช้ชีวมวลที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพมาเป็นวัสดุดูดซับ โดยเลือกผักตบชวาซึ่งมีปริมาณมากในแต่ละปีมาใช้ประโยชน์ โดยการพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดแอมโมเนีย ไนไตรท์ ออร์โธฟอสเฟต ค่าการนำไฟฟ้า และค่าพีเอชในน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า เนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็นเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลลูโลสในปริมาณสูง จากลักษณะโครงสร้างเซลลูโลสที่เป็นเส้นใยที่มีโครงร่างหลวม ๆ โดยมีโมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เซลลูโลสมีสมบัติเป็นวัสดุตัวกลาง (Matrix) ที่สามารถจะตรึง Anchor group เข้ากับโมเลกุลด้วยพันธะเคมี [8] ด้วยเหตุนี้ การนำผักตบชวามาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และการแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 ผักตบชวาที่มีการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ มีประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียที่แตกต่างกัน

1.3.2 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมีและการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสีย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 เตรียมผักตบชวาโดยการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และกายภาพ-เคมี (การเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า

1.4.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้สารละลายเบส

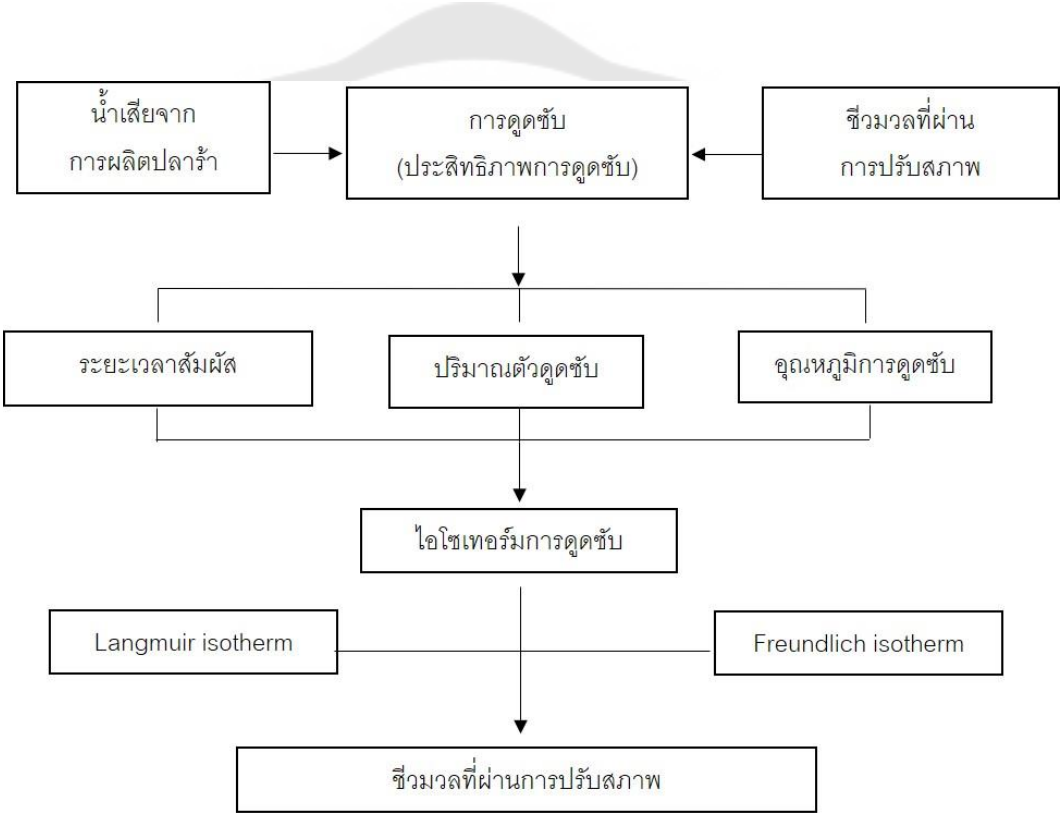
1.4.3 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุดูดซับ โดยการทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number, I.N.) เมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุดูดซับ

1.4.4 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิการดูดซับ และปริมาณวัสดุดูดซับ พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพการดูดซับ

1.4.5 ศึกษารูปแบบการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช

1.5 กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษาการบำบัดธาตุอาหารในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยผักตบชวาที่มีการปรับสภาพ มีแนวคิดในการศึกษา ดังนี้



1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 วัสดุดูดซับต้นแบบจากผักตบชวาสำหรับดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสีย

1.6.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารของวัสดุดูดซับ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำวัสดุชีวภาพมาแปรรูปเป็นวัสดุที่ใช้แก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้จริงและนำไปประยุกต์ใช้งานในหน่วยงาน สถานศึกษา โรงงานขนาดเล็ก รวมถึงวิสาหกิจขนาดกลาง ขนาดย่อม และภาคครัวเรือน

1.6.3 เป็นแนวทางในการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

1.6.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดมลพิษในน้ำเสีย

บทที่ 2
การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ธาตุอาหาร ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นส่วนหนึ่งของธาตุอาหารหลักต่อการเจริญเติบโตของพืช แม้จะมีความสำคัญกับพืชแต่หากในแหล่งน้ำมีธาตุอาหารปนเปื้อนในปริมาณมากจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) คือ หากมีสารประกอบดังกล่าวปริมาณสูงจะทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตได้ดี เพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็ว ในตอนกลางคืนพืชน้ำจะใช้ออกซิเจนสำหรับการหายใจส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำทำให้เกิดการเน่าเสีย

2.1.1 แอมโมเนีย

เป็นสารมลพิษที่พบได้ทั้งในน้ำเสีย น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน ด้วยปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) (สมการที่ 1) แอมโมเนียอาจถูกกำจัดได้ด้วยจุลินทรีย์โดยนำไปใช้เป็นสารอาหาร การสร้างเซลล์ หรือถูกออโตโทรฟิคแบคทีเรีย (Autotrophic bacteria) เปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรท [9, 10]

โปรตีน (อินทรีย์ไนโตรเจน) + แบคทีเรีย ⟶ NH_3 สมการที่ 1

แอมโมเนียส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ เช่น เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยรูปที่เป็นพิษ คือ แอมโนเนียอิสระ (NH_3) ทำให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสีย เนื่องจากแอมโมเนียมีความต้องการออกซิเจนในการเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรท และส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ค่ามาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 3 กำหนดให้แอมโมเนียปนเปื้อนได้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร[5]

2.1.2 ไนไตรท์

พบได้ทั่วไปในธรรมชาติรวมถึงในน้ำจืดและน้ำเค็ม การใช้ปุ๋ยในการเกษตรเป็นปัจจัยหนึ่งจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนไนไตรท์ในแหล่งน้ำ เนื่องจากบางส่วนอาจถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ ยังมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ โดยทำให้เกิดภาวะเมทธีโมโกลบินนีเมีย (Mathemoglobinaemia) ต่อสัตว์น้ำที่มีกระดูกสันหลัง ซึ่งเป็นสภาวะที่ฮีโมโกลบินไม่สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงออกซิเจนของเลือดไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ ลดลง[11]

2.1.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติและในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของฟอสเฟตและโมเลกุลของฟอสเฟต โดยจำแนกได้เป็น 3 ชนิด[12]

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรือ ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) ได้แก่ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) โมโนโซเดียมฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ซึ่งแพลงก์ตอนพืชใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้

2. คอนเดนส์ฟอสเฟต (Condensed Phosphate) หรือ โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำเสียจากบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด เมื่อสลายตัวจะกลายเป็นออร์โธฟอสเฟต ได้แก่ โซเดียมเฮกซาเมตาฟอสเฟต ($Na_3(PO_4)_6$) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ($Na_5P_3O_{10}$) และเตระโพลีฟอสเฟต ($Na_4P_2O_7$)

3. สารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) ได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดนิวคลีอิก (Nucleic Acid) ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) น้ำตาลฟอสเฟต (Sugar Phosphate)

สารประกอบฟอสเฟตส่วนใหญ่จะมาจาก 2 แหล่งใหญ่ [13] คือ ธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์

1. จากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศ ซึ่งถูกพัดพาและตกกลับลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินพัดพาเศษดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้อาจมาจากมูลของนกบางชนิด เศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายทับถมกันบริเวณแหล่งน้ำ

2. จากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่

- โรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย การผลิตสารกำจัดศัตรูพืช และการผลิตสารซักล้างและผงซักฟอก รวมถึงอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งโรงงานเหล่านี้จะมีน้ำเสียที่มีฟอสเฟตในปริมาณที่สูง

- เกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรใช้ปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชมากขึ้นตามลำดับ โดยสารเหล่านี้รวมถึงมูลสัตว์ จะถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ

- แหล่งชุมชน ได้แก่ บ้านเรือน อาคารพาณิชย์ โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน ซึ่งน้ำเสียจากสถานที่ดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนของฟอสเฟตที่เกิดจากกิจกรรมการซักล้างทำความสะอาด

โดยทั่วไปในแหล่งน้ำจะมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำเพื่อเป็นกลไกทางธรรมชาติในการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ รวมถึงแพลงก์ตอนพืช ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่าย เมื่อมีการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสสู่แหล่งน้ำ จะเกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารและห่วงโซ่อาหาร แพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งแหล่งน้ำดังกล่าวมักมีสีเขียวขุ่น การสังเคราะห์แสงลดลง[14] มีรายงานว่าค่าวิกฤติของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเท่ากับ 0.007 – 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร หากเกินค่านี้แล้วสามารถเกิดปรากฏการณ์ “น้ำขึ้นน้ำลงสีแดง” หรือ “Red Tide” ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เช่น ศรีราชา ชะอำ หัวหิน กว๊านพะเยา บึงแก่นนคร และบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จ.สมุทรปราการ[15] ผลกระทบที่ตามมาคือ ก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจแก่กิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง รวมถึงอาจมีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่มีอยู่ในสาหร่ายบางชนิด เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (USEPA) จึงได้กำหนดระดับความเข้มข้นสูงสุดของฟอสฟอรัสทั้งหมดในแหล่งน้ำธรรมชาติให้มีค่าต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร [12] ส่วนกรมควบคุมมลพิษ กำหนดความเข้มข้นสูงสุดของฟอสเฟตที่อนุญาตให้ปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร [6] และควรควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสที่จะปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

2.1.4 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชเป็นค่าที่บ่งบอกระดับความเป็นกรดด่างของน้ำ คำนวณมาจากค่าลบล็อกแอคติวิตีของโฮโดรเจนไอออน น้ำที่เป็นกลางมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 น้ำที่เป็นกรด คือ น้ำที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 7 ตัวเลขยิ่งน้อยยิ่งเป็นกรดมาก น้ำที่เป็นด่างจะมีค่าพีเอชสูงกว่า 7 ค่าพีเอชของน้ำธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 4-9 โดยทั่วไปค่อนข้างเป็นด่างเล็กน้อย ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ คือ 6-9[16]

2.1.5 ค่าการนำไฟฟ้า

เป็นคุณลักษณะหรือดัชนีคุณภาพน้ำที่สำคัญ โดยจะบ่งบอกถึงความสามารถของน้ำในการนำกระแสไฟฟ้า ประโยชน์ของค่าการนำไฟฟ้าสามารถนำไปประเมินหรือคาดคะเนปริมาณสารบางชนิดหรือคุณภาพน้ำได้หลายประการ เช่น สามารถใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของน้ำในกรณีที่ได้รับผลกระทบจากการประกอบกิจการอุตสาหกรรม การประเมินหรือตรวจความบริสุทธิ์ของน้ำที่ผ่านการบำบัด เป็นต้น[17]

2.2 น้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง

2.2.1 กระบวนการหมักดอง

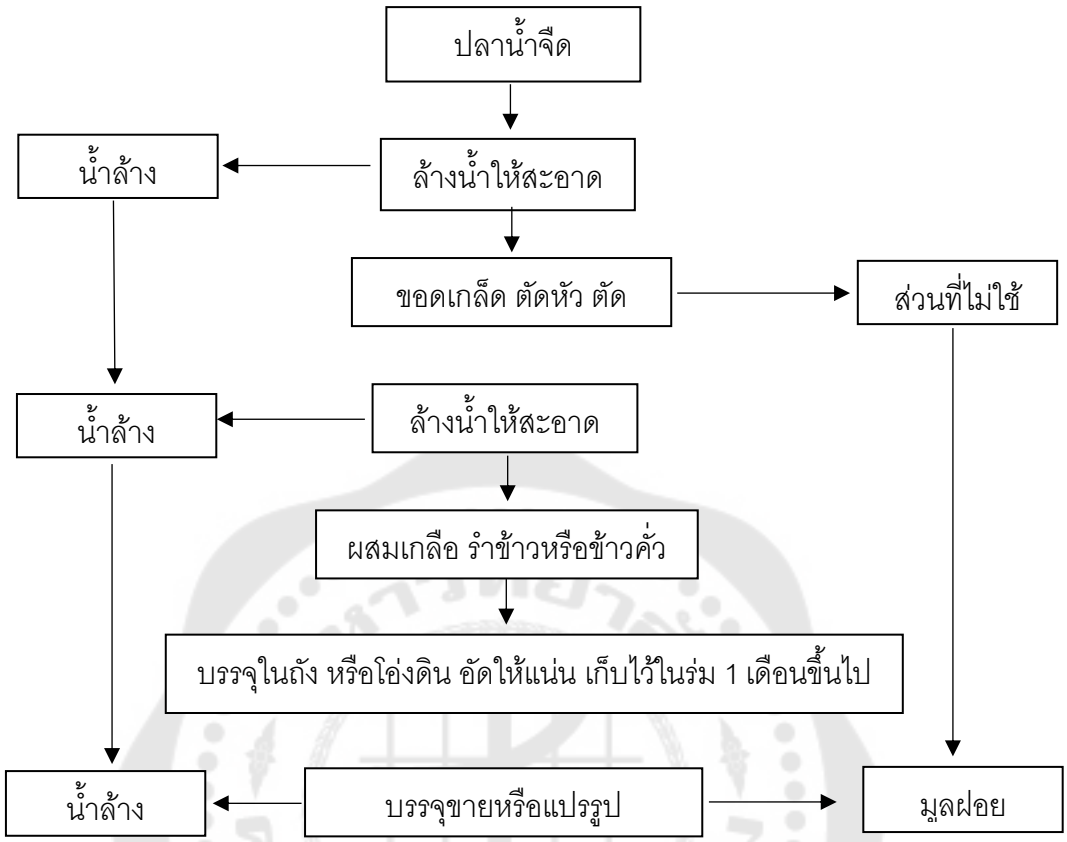
การหมัก (Curing) คือ การใช้เกลือแกงกับเนื้อสัตว์ เพื่อถนอมอาหารหรือเก็บรักษาเนื้อสัตว์ให้นานขึ้นกว่าเดิม ต่อมาเมื่อมีการใช้ตู้เย็นกันอย่างแพร่หลายในครัวเรือน จึงได้เน้นไปที่การยืดอายุและการเก็บรักษาควบคู่ไปด้วย เพื่อให้ได้รสชาติอันเป็นผลิตผลของการแปรรูปเนื้อสัตว์ ดังนั้น ความหมายของการหมักในปัจจุบัน จึงหมายถึง การใช้เกลือเป็นส่วนประกอบเพื่อสร้างสีและเครื่องปรุงรสในเนื้อสัตว์ ทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปการหมักมักใช้เกลือในความเข้มข้นที่สูงพอเพื่อหยุดยั้งการเน่าเสียได้ โดยไปลดปริมาณน้ำที่แบคทีเรียจะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต

การดอง (Pickling) คือ การใช้สารช่วยในการดอง เพื่อให้ผักหรือผลไม้กรอบ รสชาติดี เช่น ใช้สารส้มคนกับน้ำเกลือเพื่อแช่ผัก จะช่วยให้ผักที่ดองกรอบและอร่อยขึ้น ส่วนการดองผลไม้นิยมแช่น้ำปูนก่อนดอง เพื่อช่วยให้ผลไม้กรอบและอร่อยขึ้น น้ำที่ใช้ดองจะมีส่วนผสมของเกลือ น้ำส้ม และน้ำตาล อาจจะใช้อย่างเดียวหรือมากกว่านั้น ผักและผลไม้ที่ดองเสร็จแล้วจะมีรสเค็มอย่างเดียว เค็มหวาน หรือมีทั้งสามรส คือ เปรี้ยว เค็ม หวาน แต่ในการทำผลไม้ดองส่วนใหญ่มักจะมีรสเปรี้ยวเกิดขึ้นจากการกระทำของแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติค แบคทีเรียบางกลุ่มสามารถทนต่อความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในการดองได้ อาทิ *Leuconostoc* sp. และ *Pediococcus cerevisiae* [18]

การหมักดอง (Fermentation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารซึ่งเป็นทั้งสภาวะกายภาพ ชีวภาพของการประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรต หรือ สารประกอบอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยปฏิกิริยาของเอนไซม์ หรืออีกความหมายหนึ่ง คือ อาหารที่ผ่านการหมักน้ำเกลือ น้ำตาล หรือน้ำเกลือผสมน้ำตาลแล้วมีจุลินทรีย์เข้ามาเจริญเติบโต จะสร้างสารบางชนิดเพื่อรักษาอาหาร

2.2.2 การผลิตปลาร้า

สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ ได้รายงานแผนผังการผลิตและของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตปลาร้า[19] ดังนี้



จากแผนผังการผลิตปลาร้า ประกอบกับผู้วิจัยลงพื้นที่สอบถามข้อมูลถึงขั้นตอนการผลิตปลาร้าของโรงงานในพื้นที่ ต.โพนางดำตก อ.สรรพยา จ.ชัยนาท พบว่า ขั้นตอนการล้างทำความสะอาดปลาก่อนมีการผสมเกลือจะมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเฉพาะน้ำเสียจากขั้นตอนการทำความสะอาดปลา นอกจากนี้ จากข้อมูลของสำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ[19] ยังพบว่ากระบวนการผลิตปลาร้าและปลาส้ม มีกรรมวิธีที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งคุณภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปลาร้ายังไม่มีการรายงานอย่างแพร่หลาย

2.2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง

มีรายงานเกี่ยวกับคุณภาพน้ำที่เกิดจากกระบวนการหมักดองอาหารประเภทสัตว์น้ำ คือ การผลิตปลาส้ม ซึ่งส่วนใหญ่คุณภาพน้ำที่วิเคราะห์ได้มีความสกปรกสูงและเกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีการรายงานค่าน้ำเสียที่มาจากโรงงานผลิตปลาส้มสันเวียงใหม่ จ.พะเยา เป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กในชุมชน พบว่า ค่าบีโอดี ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด ซัลไฟต์ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด น้ำมันและไขมัน ตรวจพบค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน[20] นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปลาส้ม

ที่เป็นอุตสาหกรรมครัวเรือน พบว่า มีค่าความสกปรกสูงและเกินเกณฑ์มาตรฐานเช่นเดียวกัน (ตาราง 2) [21]

ตาราง 2 ค่าคุณภาพน้ำเสียที่วิเคราะห์ได้จากกระบวนการผลิตปลาส้ม

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้		ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง
	โรงงานอุตสาหกรรม [20]	อุตสาหกรรมครัวเรือน [21]	
บีโอดี (mg/L)	764.0	10,633.0	<60
ซีโอดี (mg/L)	212.2	20,200.0	<400
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	229.8	-	<40
ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (mg/L)	800.0	-	<500
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	19.6	278.0	<35
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (mg/L)	-	23	<2
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	160.4	-	<20
ค่าพีเอช	6.9	6.3	5.5-9.0

2.3 ผักตบชวา

ผักตบชวา (Water Hyacinth, *Eichornia crassipes* (Mart.) Solms) เป็นวัชพืชน้ำอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae พบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2367 โดยนักพฤกษศาสตร์และนายแพทย์ชาวเยอรมันชื่อ Karl von Martius และมีการขยายพันธุ์ไปประเทศเขตร้อนและกึ่งร้อน และได้แพร่กระจายไปสู่แหล่งน้ำทั่วประเทศไทย ก่อให้เกิดปัญหากับแหล่งน้ำมากกว่า 64 จังหวัด หากคิดเป็นปริมาณน้ำหนักสดจะมีมากกว่า 5 ล้านตันต่อปี [22] ผักตบชวามีความสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร มีลำต้นสั้น รากแตกออกจากลำต้นบริเวณข้อ รากมักมีสีม่วงดำ ส่วนใบจะออกเป็นกลุ่มรอบลำต้น (Rosettes) ใบกว้าง รูปร่างค่อนข้างกลม ก้านใบจะพองออกภายในมีรูพรุน ออกดอก

เป็นช่อชนิดสไปด์ พบขึ้นตามลำคลอง คลองชลประทาน หนองน้ำที่ชื้น มีน้ำขัง ขยายพันธุ์โดยเมล็ดและส่วนของลำต้น [23]

ต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากแห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด [24] และมีองค์ประกอบดังตาราง 3

ตาราง 3 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง [25]

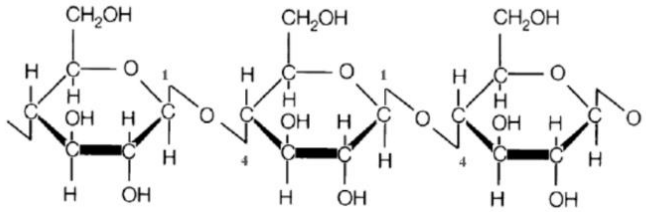
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง		
	ใบ	ลำต้น	ราก
คาร์บอน	33.33	29.55	27.22
ไนโตรเจน	0.3	0.2	0.1
เซลลูโลส	29.86	29.33	18.11
เฮมิเซลลูโลส	31.81	28.35	16.23
ลิกนิน	5.49	18.36	15.67
โปรตีน	21.97	7.70	3.33
ไขมัน	1.93	0.98	0.65
เถ้า	13.10	21.20	50.11

จากองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของผักตบชวาที่มีมาก ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นแหล่งเซลลูโลสตามธรรมชาติที่มีปริมาณมากและหาได้ง่าย แนวทางหนึ่งของการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์จากผักตบชวาให้คุ้มค่าที่สุด คือ มองในแง่ของแหล่งเซลลูโลสที่สามารถนำไปแก้ไขปัญหาสารปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติที่มีราคาถูก ดังนั้น จึงนำมาใช้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า

2.4 เซลลูโลส

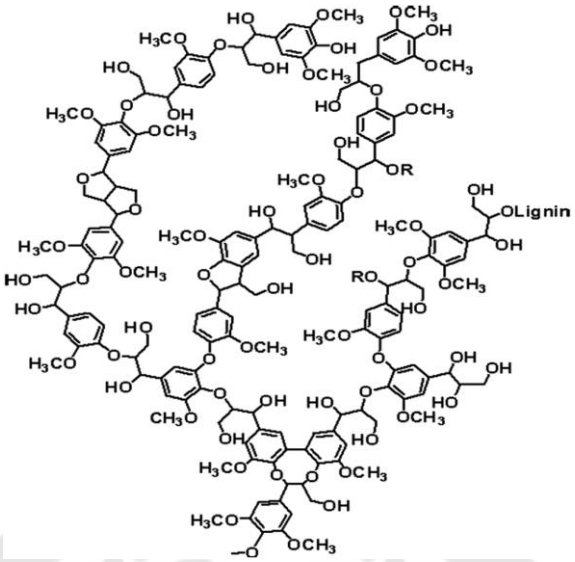
เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช โดยแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลมากกว่า 3,000 หน่วย ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β-D-1,4 linkage โมเลกุลเป็นสายยาวเกาะกันตามแนวราบด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส (ภาพประกอบ 1) เมื่อศึกษาเส้นใยโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ (x-ray) พบว่า ประกอบด้วยใยอาหารที่หยาบและหนา แต่ละโมเลกุลเรียงตัวไปทางเดียวกันเชื่อมต่อกับเส้นใยที่เรียงตัวใน

ทิศทางตรงข้ามกันอย่างมีระเบียบ ส่วนที่เกิดผลึกนั้นมีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนต่อการถูกแยกสลายด้วยเอนไซม์และสารเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึก และพบโมเลกุลที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบจับกันไม่แน่นหรือส่วนที่ไม่เกิดผลึกสามารถดูดซับโมเลกุลน้ำเข้ามาในโมเลกุลส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ ส่วนนี้จึงพองออกเมื่อได้รับความร้อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย มีผลให้การดูดน้ำเพิ่มขึ้น และส่วนที่เป็นผลึกลดลงด้วย ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะทั้งแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ จึงโค้งงอได้โดยไม่แตกหัก [26]



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส [27]

มีรายงานถึงการนำวัสดุชีวภาพที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียได้ แต่อย่างไรก็ตาม น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดูดซับจะมีค่าบีโอดี ซีโอดี และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายได้จากองค์ประกอบของเศษวัสดุ [28] นอกจากนี้ ความจุในการดูดซับสารมลพิษของวัสดุยังมีค่าต่ำ เนื่องจากองค์ประกอบในผนังเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบสามมิติของวงแหวนฟีนอล (Phenol) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ (Ether) ดังภาพประกอบ 2 ทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรง และทนทานต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี [29] ดังนั้น ก่อนการนำเศษวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมาใช้เป็นตัวดูดซับ จึงควรนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้กับวัสดุ



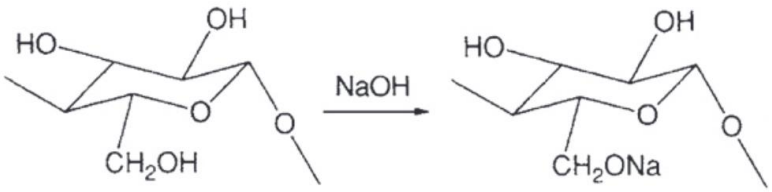
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างของลิกนิน [27]

2.5 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุ

การปรับปรุงคุณภาพวัสดุเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้กับเศษวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ สามารถปรับปรุงได้ ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการลดขนาดวัสดุให้เล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้กับวัสดุ เช่น การบด การตัด รวมถึงการให้ความร้อน[30]

2. การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้กับวัสดุ ได้แก่ การปรับสภาพด้วยสารละลายกรด สารละลายเบส และการทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยในการศึกษานี้ได้ใช้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายเบส (ภาพประกอบ 3) ซึ่งสารที่นิยมใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ อาทิ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยทั่วไปนิยมใช้ NaOH เนื่องจากเป็นเบสแก่ที่สามารถกำจัดลิกนินได้ดีและมีราคาถูก[27] อีกทั้งสามารถช่วยลดปัญหาการเพิ่มขึ้นของค่าบีโอดี ซีโอดี และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำเสียที่เกิดจากสารอินทรีย์ละลายได้เมื่อนำวัสดุที่ปรับสภาพด้วยเบสมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ[31] กระบวนการดูดซับของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสโดยทั่วไปจะเป็นการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ในโครงสร้างส่วนที่เป็นเซลลูโลสระหว่างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งคาร์บอน 2, 3 และ 6 กับไอออนของตัวถูกดูดซับ [32]



ภาพประกอบ 3 การปรับสภาพเซลลูโลสด้วยสารละลายเบส [8]

มีรายงานการปรับปรุงคุณภาพแกลบข้าวด้วย NaOH เพื่อใช้ดูดซับสีมาลาไคท์กรีน พบว่า แกลบที่ผ่านการปรับสภาพสามารถกำจัดมาลาไคท์กรีนได้ร้อยละ 97 [33] Li et al. (2017) [34] ใช้ NaOH เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปรับสภาพฟางข้าวและแกลบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าฟางข้าวและแกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 62 และ 60 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมร้อยละ 81 และ 70 ตามลำดับ นอกจากนี้ Ronda et al. (2013) [35] ได้ปรับสภาพกิ่งมะกอกด้วย NaOH เข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถดูดซับตะกั่ว 16.04 มิลลิกรัมต่อกรัม และเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมเป็น 3.53 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.00583 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

3. การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี โดยการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพในสภาพที่มีออกซิเจนจำกัด (Pyrolysis) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 300-700 องศาเซลเซียส [36] สมบัติของถ่านชีวภาพมักขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปมีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีพื้นที่ผิวและความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ค่าพีเอชผันแปรตั้งแต่เป็นด่างเล็กน้อยถึงเป็นด่างจัดมาก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มอินทรีย์คาร์บอน ความสามารถในการอุ้มน้ำ รวมถึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารในดิน ลดการสูญเสียธาตุอาหารออกไปจากเขตรากพืชโดยเฉพาะโพแทสเซียม [37]

มีการนำถ่านชีวภาพมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย โดย ฐานิฏฐ์กานต์ (2560)[38] นำถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่า มีความจุของการดูดซับตะกั่วและทองแดงได้เท่ากับ 4.66 และ 1.39 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กุลธิดา (2557) [39] นำถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด กะลามะพร้าว เมล็ดลำไย และเปลือกขนุน มาศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดไอออนทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ พบว่า ชนิดและปริมาณถ่านชีวภาพที่มี

ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดไอออนทองแดงสูงสุด ได้แก่ เปลือกทุเรียน ที่ระดับ 1.50 กรัม ส่วนชนิดและปริมาณของถ่านชีวภาพที่มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดไอออนทองแดงต่ำสุด ได้แก่ เมล็ดลำไย ที่ระดับ 0.50 กรัม ดังนั้น ชนิดและปริมาณจึงมีปฏิสัมพันธ์กัน โดยประสิทธิภาพการดูดติดและการกำจัดไอออนทองแดงจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารดูดซับ ลักษณะและขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพ Feng et al. (2016) [40] รายงานว่า ถ่านชีวภาพจากผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ 49.837, 36.899 และ 25.826 มิลลิกรัมต่อกรัม

ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และการนำไปเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ จึงมีความเป็นไปได้ที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า

2.6 ทฤษฎีการดูดซับ

2.6.1 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) คือ ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบอย่างน้อย 1 ชนิด ณ บริเวณผิวร่วม (Interface) ระหว่างวัฏภาค (Phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว เป็นต้น การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวร่วมเท่านั้น โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวัฏภาคคายความร้อน ทั้งนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Absorbate) เกาะอยู่บนผิวหน้าของตัวดูดซับ (Absorbent) [13], [41] โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมการดูดซับได้ 4 แบบ [32] ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ อาศัยแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลแบบอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาล์ว หรือพันธะไฮโดรเจน การดูดซับในลักษณะนี้จะไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนในการดูดซับมีค่าน้อย และอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) ในสภาวะอุณหภูมิปกติ และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวตัวดูดซับ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับหรือที่เรียกว่าการคายซับ (Desorption)

2. การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อสารดูดซับเกิดพันธะเคมีกับตัวถูกดูดซับ เช่น การใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน เป็นต้น ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลง คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอม จากนั้นจะมีการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบใหม่โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะเคมี การดูดซับในลักษณะนี้จะมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง และความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง เนื่องจากพันธะเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึง

ทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้ยาก เพราะองค์ประกอบของตัวดูดซับจะมีการเปลี่ยนแปลง และการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

3. การดูดซับโดยการแลกเปลี่ยน เป็นการดูดซับที่อธิบายด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ไอออนของตัวถูกดูดซับจะถูกจับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าจากประจุตรงกันข้ามที่ผิวของสารดูดซับที่เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนไอออน โดยมีคุณสมบัติสำคัญ คือ ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนหรือประจุ (หน่วยเป็นมิลลิกรัมเทียบเท่าต่อกรัมวัสดุดูดซับ; meq/g) กลุ่มตัวดูดซับที่มีกลไกการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนเป็นหลักเป็นตัวดูดซับที่เป็นแร่ธาตุในธรรมชาติ โดยการดูดซับเกิดจากการที่มีการแตกหักของพันธะเคมีภายในโครงสร้างทำให้เกิดประจุลบตกค้าง จึงสามารถดึงดูดประจุบวกไว้ที่ผิวตัวดูดซับได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า

4. การดูดซับแบบเจาะจง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนพื้นผิว โดยตัวดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [42]

2.6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นผิวของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับ โดยหากมีการเพิ่มพื้นที่ผิวและโครงสร้างมีรูพรุนจะเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ อีกทั้งยังทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการดูดซับโดยส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณพื้นผิว ในกรณีที่ขนาดของตัวดูดซับลดลง พื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น[32]

2. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในขั้นตอนการดูดซับ ตัวที่ถูกดูดซับและตัวทำละลายจะต้องถูกแยกออกจากกัน เช่น หากน้ำเป็นตัวทำละลาย ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถละลายน้ำได้หรือแตกตัวออกเป็นไอออนอิสระได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงมาก ทำให้ยากต่อการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจึงสามารถดูดซับได้ดี นอกจากนี้ ขนาดของโมเลกุลของสารละลายจะแปรผกผันกับความสามารถในการดูดซับ

3. อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น[43]

4. ค่าพีเอช

เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ เพราะไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถถูกดูดติดได้ค่อนข้างแข็งแรง เป็นเหตุให้การดูดซับไอออนชนิดอื่นมีผลกระทบจากค่าพีเอช

5. ระยะเวลาสัมผัส

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาการดูดซับเพิ่มขึ้น[32]

2.6.3 **ไอโซเทอร์มการดูดซับ** (Adsorption Isotherm)

เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสาร ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอร์มที่นิยมนำมาใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ในการดูดซับ ได้แก่ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ เป็นรูปแบบที่มีสมมติฐานว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของตัวดูดซับจะมีจำนวนที่แน่นอนและถูกดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอน [42] ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ในรูปแบบสมการที่ 2 และ 3

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1+K_L C_e} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

หรือ

$$\frac{1}{Q_E} = \frac{1}{K_L Q_m C_e} + \frac{1}{Q_E} \qquad \text{สมการที่ 3}$$

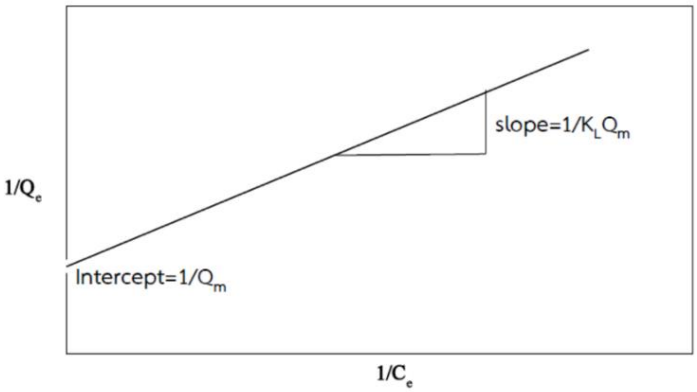
เมื่อ Q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่อิ่มตัวบนตัวดูดซับ 1 กรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{C_e}$ กับ $\frac{1}{Q_e}$ จะได้ดังภาพประกอบ 4 ที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{K_L Q_m}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Q_m}$



ภาพประกอบ 4 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ [32]

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช เป็นรูปแบบที่มีสมมติฐานว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยปกติจะใช้อธิบายข้อมูลการดูดซับได้ในช่วงแคบ ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ในรูปแบบสมการที่ 4 และ 5

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \qquad \text{สมการที่ 4}$$

หรือ $$\log Q_e = \frac{1}{n} \log Q_e + \log K_F \qquad \text{สมการที่ 5}$$

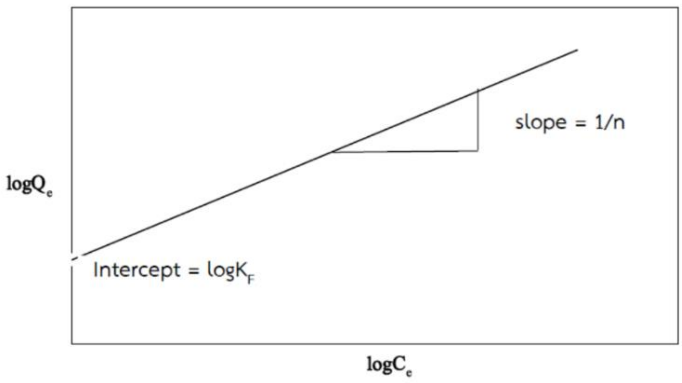
เมื่อ Q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log Q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้ดังภาพประกอบ 5 มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_F$



ภาพประกอบ 5 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช [32]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่มีการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ดูดซับไอออนในสารละลายและน้ำเสีย เช่น Buasri et al. (2012) [44] ใช้เส้นใยเซลลูโลสจากผักตบชวาที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เติมยูเรีย 224 กรัม และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ล้างด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน นำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไปแช่ด้วย HCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนเพื่อกำจัดกรดออกจากตัวดูดซับ นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า เส้นใยเซลลูโลสผักตบชวาที่ผ่านการทำปฏิกิริยา 1 กรัม สามารถดูดซับไอออนของทองแดงและสังกะสีในสารละลายได้ร้อยละ 99.42 และ 83.01 ตามลำดับ

Kim (2008) [45] ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับของใยกระดาษ เมล็ดข้าวโพด และเส้นใยฝ้าย เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตและสารหนูในน้ำ โดยการปรับสภาพวัสดุด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เข้มข้น 0.01 ถึง 0.3 โมลาร์ เป็นเวลา 0.1 ถึง 2 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้ง และนำมาแช่ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เข้มข้น 0.1 ถึง 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 0.1 ถึง 10 นาที จากนั้นนำมาล้าง และอบให้แห้ง เมื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตและสารหนู พบว่า วัสดุที่ผ่านการปรับสภาพสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตและสารหนูในน้ำได้มากกว่าร้อยละ 90

Sarkar et al. (2017) [46] ใช้ผงผักตบชวาในการบำบัดโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์และโรงฟอกหนังโดยการกรองผ่านคอลัมน์ พบว่า สามารถบำบัดได้ร้อยละ 99.8 ภายใน 13 นาที และร้อยละ 98.8 ภายใน 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนทองแดงสามารถบำบัดได้ร้อยละ 99.4

ภายใน 14 นาที และร้อยละ 99.6 ภายใน 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ ลักษณะพื้นผิวของผงผักตบชวามีผิวที่หยาบขึ้นซึ่งเหมาะกับการบำบัดโลหะหนัก

Kolodynska et al. (2012) [47] ศึกษาการดูดซับทองแดง สังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้ถ่านชีวภาพ พบว่า อิทธิพลที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ค่าพีเอช และเวลาที่สัมผัส โดยประสิทธิภาพการดูดซับโลหะมีค่าสูงสุดที่ช่วงพีเอช ระหว่าง 5.0 – 6.0

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง (0.01 กรัม)
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (0.0001 กรัม)
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
4. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)
5. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
6. เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
7. เครื่องบดแบบใบมีด (Cutting Mill)
8. เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal Shaker)
9. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)
10. เตาเผาถ่านชีวภาพ
11. ตะแกรงร่อน
12. โถดูดความชื้น
13. กระดาษกรองเบอร์ 1
14. เทอร์โมมิเตอร์
15. ปิเปต
16. บิวเรต
17. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (อาทิ ขวดรูปชมพู่ บีกเกอร์ ขวดปรับปริมาตร)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
4. เครื่องวิเคราะห์แอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรท (Segment Flow Automate Analyzer)

5. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Quamtachrom)

3.1.3 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
2. โพแทสเซียมไดไฮรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
3. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
4. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$)
5. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรท ($K(SbO)C_4H_4O_6.\frac{1}{2}H_2O$)
6. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
7. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)
8. เมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S{\cdot}3H_2O$)
9. กรดแอสคอร์บิค ($C_6H_8O_6$)
10. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3{\cdot}5H_2O$)
11. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
12. ไอโอดีน (I_2)
13. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
14. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ

นำส่วนของลำต้นผักตบชวามาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาแล้วล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน ตากให้แห้ง จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท

3.2.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี

ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของ NaOH

1. แช่วัสดุดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7 โมลาร์ [48] โดยใช้อัตราส่วนวัสดุดูดซับต่อสารละลาย NaOH 1:10 [49]

2. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง[32]

3. กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำปราศจากไอออน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนระยะเวลาที่ศึกษาจาก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชั่วโมง [32]

3.2.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี

นำผักตบชวาที่ตากแห้งแล้ว มาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง [50] ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท

3.2.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี

นำวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพ (ข้อ 3.2.1 – 3.2.3) มาศึกษาสมบัติเบื้องต้น ตามตาราง 4

ตาราง 4 รายการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
1. องค์ประกอบของตัวดูดซับ	FT-IR
2. พื้นผิวของตัวดูดซับ	- ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number, I.N.) (AOAC, 1990) [51] - ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N) (Nunes and Guerriro, 2011) [52]
3. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	SEM
4. พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

3.2.5 ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า

3.2.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

เก็บตัวอย่างน้ำล้างปลาของโรงงานผลิตปลาร้าในพื้นที่ ต.โพนางดำตก อ.สรรพยา จ.ชัยนาท และทำการเก็บรักษาสภาพน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2.5.2 วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้าและตัวอย่างน้ำที่ผ่านการดูดซับจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ตามวิธีการวิเคราะห์ที่อ้างอิง ในตาราง 5

ตาราง 5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	**วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์**	**หมายเลขอ้างอิง วิธีการวิเคราะห์**
1. ค่าพีเอช	Electrometric Method	4500pH Value B*
2. ค่านำไฟฟ้า	Laboratory Method	2510B*
3. ออร์โธฟอสเฟต	Ascorbic Acid Method	4500-P E*
4. แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	Segment Flow Automate Analyzer	-
5. ไนไตรท์-ไนโตรเจน	Segment Flow Automate Analyzer	-

หมายเหตุ * วิธีการวิเคราะห์ และหมายเลขอ้างอิงวิธีการวิเคราะห์ จาก APHA, AWWA, WEF, (2012) [53]

3.2.6 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

3.2.6.1 ระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.2 กรัม เติมตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นวางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

3. วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการดูดซับ ดังตารางที่ 5 และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

5. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.6.2 อุณหภูมิการดูดซับ

1. ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณที่ 0.2 กรัม เติมตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในข้อ 3.2.6.1 จากนั้นวางทิ้งไว้ 30 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

3. วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการดูดซับ ดังตารางที่ 5 และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิจาก 25 เป็น 30 และ 35 องศาเซลเซียส

5. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.6.3 ปริมาณวัสดุดูดซับ

1. ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม เติมตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสและอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในข้อ 3.2.6.1 และ 3.2.6.2 ตามลำดับ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

3. วิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการดูดซับ ดังตารางที่ 5 และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ

4. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

5. ศึกษารูปแบบการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช

3.2.7 การแปลผล

3.2.7.1 การคำนวณสมการดูดซับธาตุอาหารของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยนำข้อมูลจากผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ มาแปลผลตามขั้นตอน ดังนี้

1. คำนวณค่าการดูดซับธาตุอาหารแต่ละพารามิเตอร์ด้วยสมการที่ 6

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{W} \qquad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ q_e คือ ค่าปริมาณธาตุอาหารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับ หรือค่าการดูดซับธาตุอาหาร (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำที่ผ่านการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการดูดซับ (ลิตร)

W คือ น้ำหนักวัสดุดูดซับที่ใช้ (กรัม)

2. การพิจารณาความสอดคล้องของพฤติกรรมการดูดซับธาตุอาหารกับสมการแลงเมียร์

สร้างสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_e กับ C_e โดยให้ค่า $1/q_e$ เป็นแกนตั้ง ค่า $1/C_e$ เป็นแกนนอน พิจารณาค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าการดูดซับธาตุอาหารพารามิเตอร์นั้นด้วยสารดูดซับชนิดที่ศึกษามีพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ หาค่าคงที่ของแลงเมียร์ และปริมาณธาตุอาหารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักสารดูดซับสูงสุด (ค่าความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารหรือค่าการดูดซับธาตุอาหารสูงสุด, q_m) (สมการที่ 2 หรือ 3)

3. การพิจารณาความสอดคล้องของพฤติกรรมการดูดซับธาตุอาหารกับสมการฟรุนดลิช

สร้างสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ โดยให้ค่า $\log q_e$ เป็นแกนตั้ง ค่า $\log C_e$ เป็นแกนนอน พิจารณาค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าการดูดซับธาตุอาหารพารามิเตอร์นั้นด้วยสารดูดซับชนิดที่ศึกษามีพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช หาค่าคงที่ของฟรุนดลิช K_f และ $1/n$ (สมการที่ 4 หรือ 5)

3.2.7.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหาร คำนวณจากสมการที่ 7

$$n = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \qquad \text{สมการที่ 7}$$

เมื่อ n คือ ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหาร (ร้อยละ)

C_e คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำที่ผ่านการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_0 คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)

3.2.7.3 การทดสอบทางสถิติ

นำข้อมูลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับมาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan Multiple Rang Test (DMRT)

บทที่ 4
ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับสภาพผักตบชวา สำหรับใช้ดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสีย โดยการปรับสภาพแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ 1) การปรับสภาพทางกายภาพ (บดให้มีอนุภาคขนาดเล็ก) ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปของการเตรียมผักตบชวา 2) การปรับสภาพทางเคมี (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์; NaOH) และ 3) การปรับสภาพทางกายภาพ-เคมี (เผาเป็นถ่านชีวภาพ) นอกจากนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการล้างปลาซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตปลาร้าด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ รวมถึงศึกษารูปแบบการดูดซับธาตุอาหารด้วยไอโซเทอร์ม

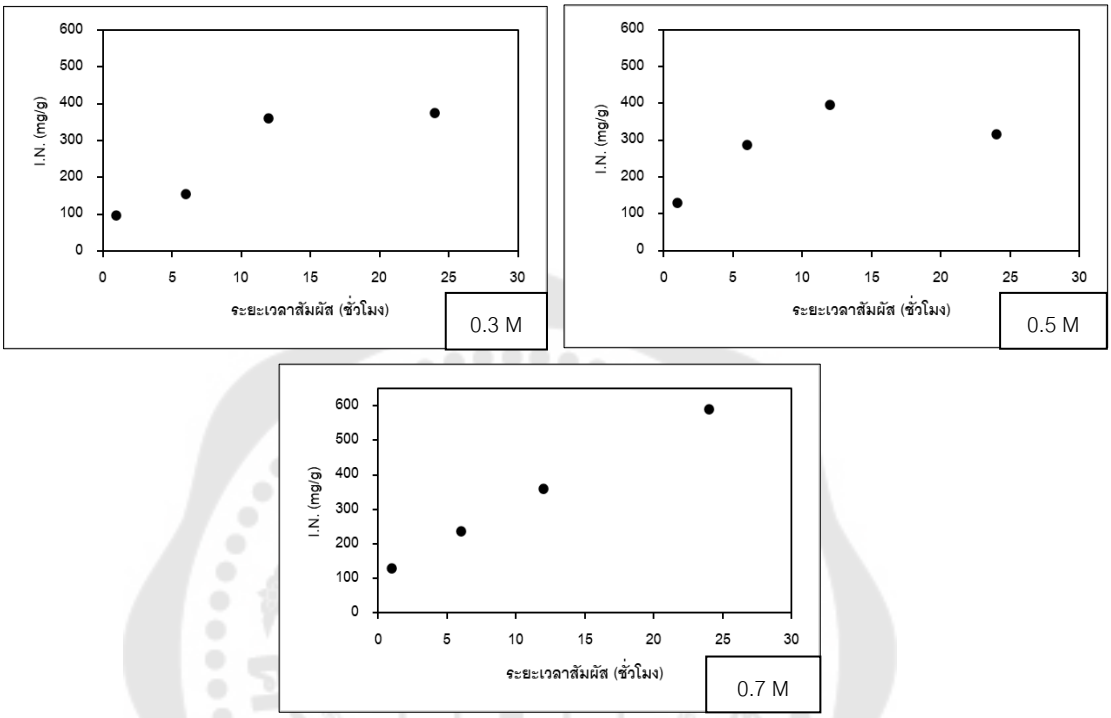
4.1 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมี

การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมี มีปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการปรับสภาพ ผลการศึกษามีดังนี้

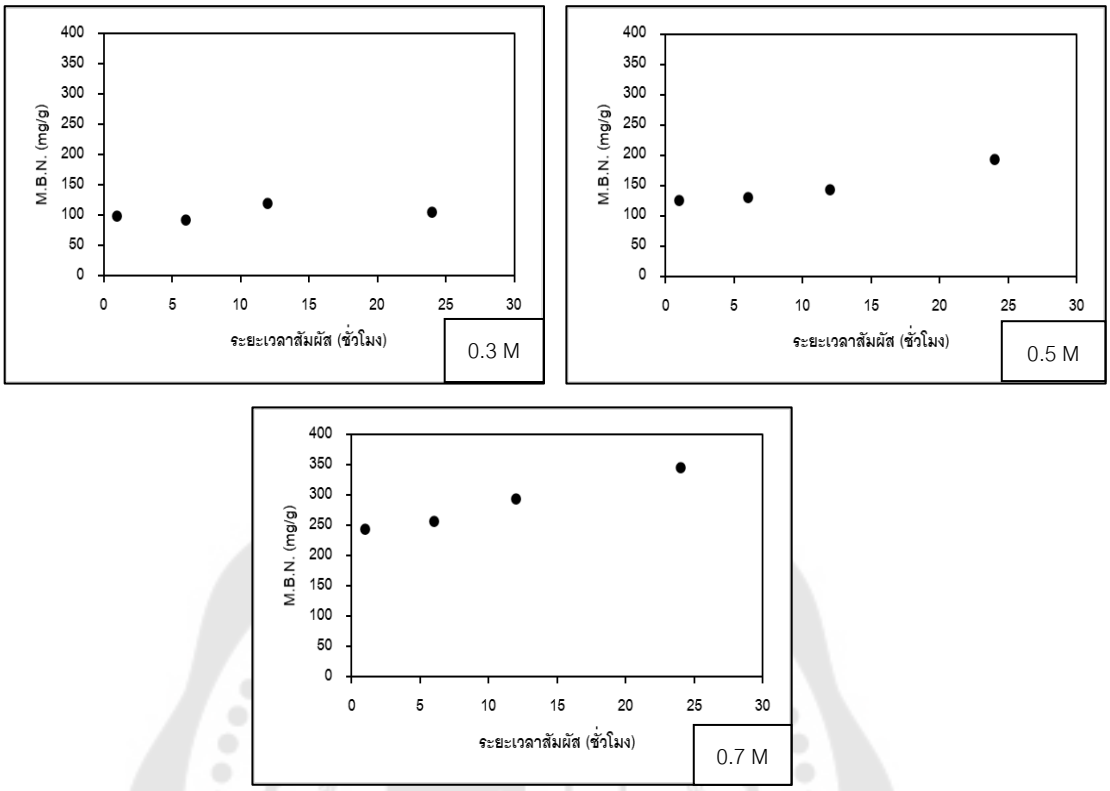
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู

การปรับสภาพทางเคมีของผักตบชวาโดยใช้ NaOH เปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (Physical Pretreated Water Hyacinth; PPWH) โดยการหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number; I.N.) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N.) ผลการศึกษาพบว่า PPWH มีค่า I.N. และค่า M.B.N. เท่ากับ 41.21 และ 24.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ทุกระดับความเข้มข้นมีค่าการดูดซับ I.N. และ M.B.N. สูงกว่า PPWH ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วย NaOH อาจส่งผลต่อการเพิ่มพื้นผิวและการดูดซับของผักตบชวาที่ปรับสภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการดูดซับ M.B.N. มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาที่ใช้ปรับสภาพ ทั้งนี้ค่า I.N. และค่า M.B.N. ของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีมีค่าสูงสุด คือ 591.56 และ 344.83 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพประกอบ 6 และ 7) ซึ่งค่า I.N. เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้กำหนดลักษณะการทำงานของวัสดุดูดซับและถูกใช้เป็นค่าประมาณของพื้นที่ผิว อีกทั้งยังเป็นค่าที่แสดงถึงกลไกของการดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวภายในของวัสดุดูดซับ [54]

ในขณะที่ค่าการดูดซับ M.B.N. เป็นค่าที่แสดงถึงกลไกการดูดซับที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของเมทิลีนบลูกับไฮโดรเจนไอออนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของเซลลูโลส [55]



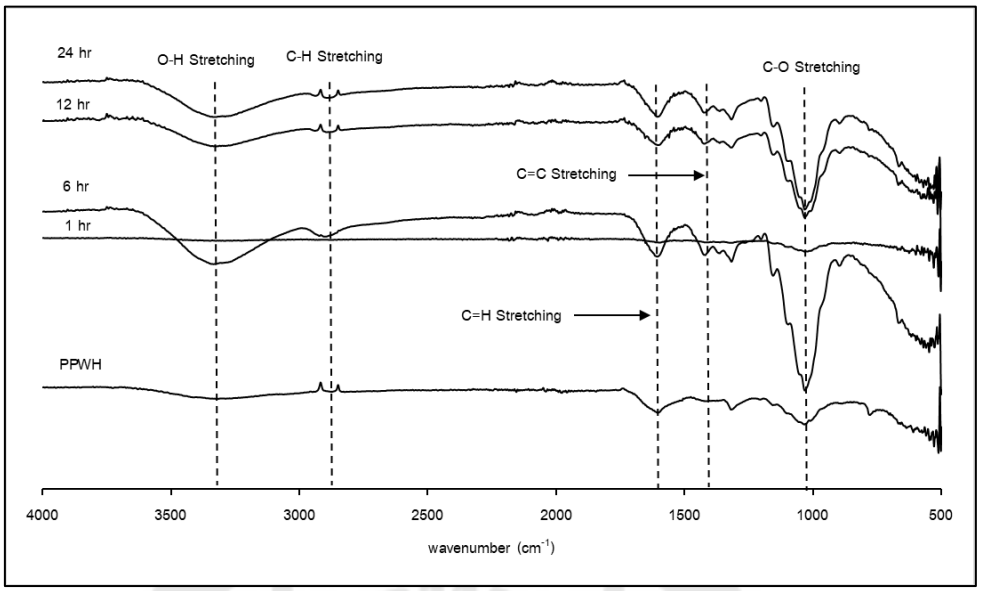
ภาพประกอบ 6 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number; I.N.) ของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน



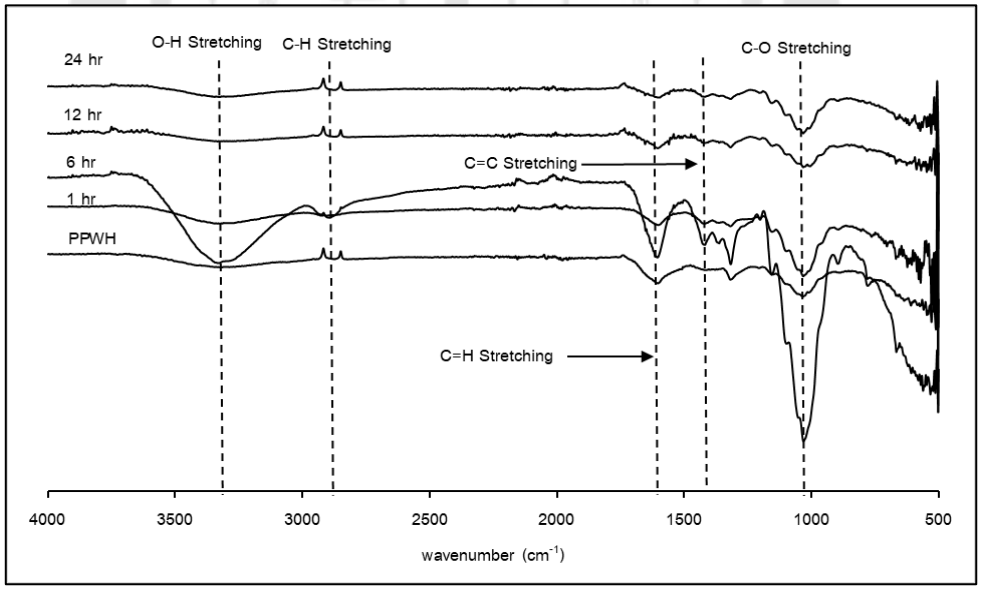
ภาพประกอบ 7 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N.) ของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน

4.1.2 **ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผักตบชวาที่ปรับสภาพ**

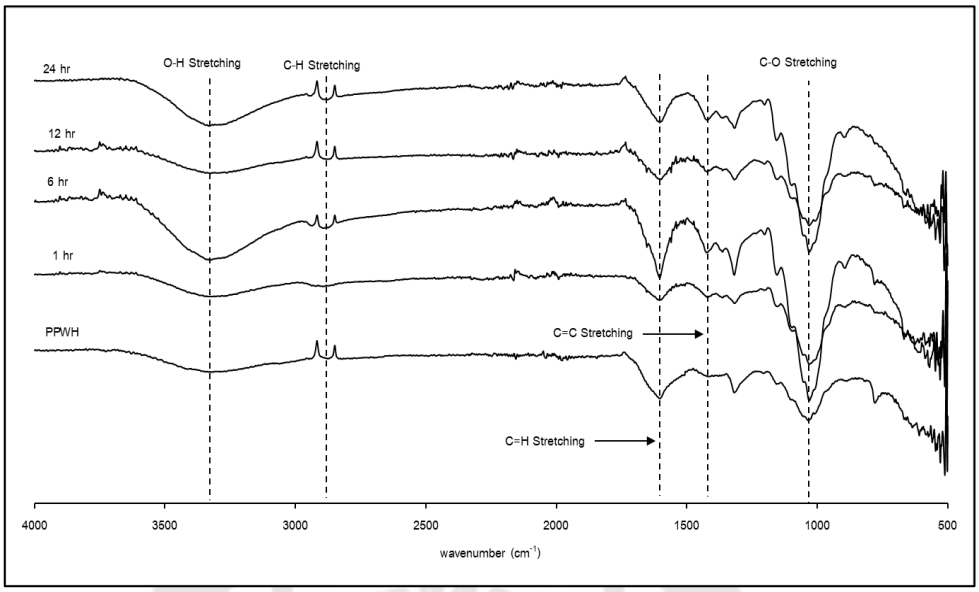
วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีและ PPWH ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ที่เลขคลื่นในช่วง 500-4000 cm^{-1} ได้ผลดังภาพประกอบ 8-10



ภาพประกอบ 8 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน



ภาพประกอบ 9 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน



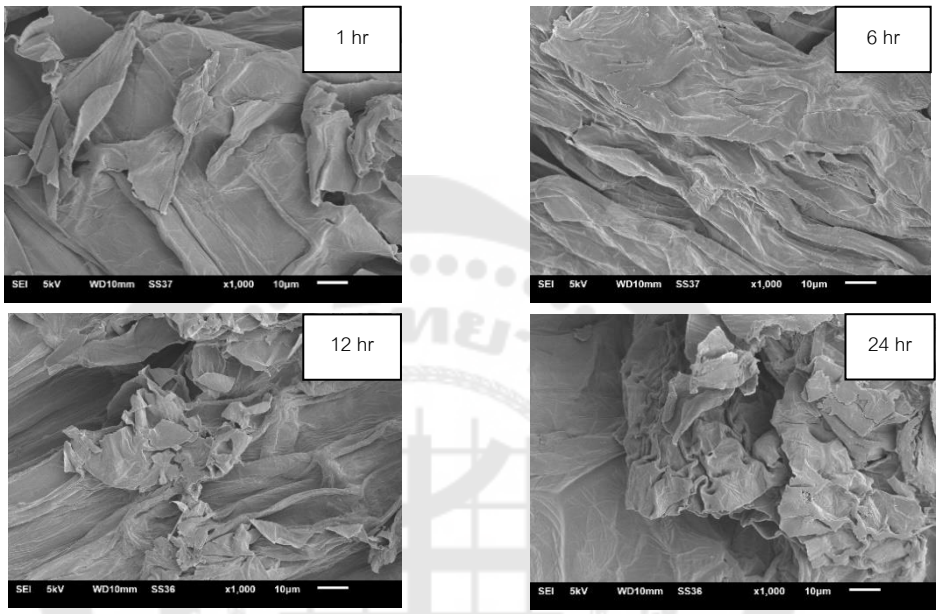
ภาพประกอบ 10 องค์ประกอบของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

จากภาพประกอบ 8-10 พบว่า สเปกตรัมของ PPWH จะมีลักษณะของพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3320 cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl) จาก O-H stretching ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 2900 cm^{-1} ปรากฏพีคที่มีลักษณะความเข้มต่ำที่เป็นแถบการยืดระหว่างพันธะไฮโดรเจนและคาร์บอนจาก C-H stretching ของกลุ่ม Methylene และ Methyl นอกจากนี้ที่เลขคลื่นประมาณ 1000 –1100 cm^{-1} ปรากฏแถบการสั่นจาก C-O stretching ของกลุ่ม Alcohol ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เซลลูโลสและเพคติน ที่เลขคลื่นประมาณ 1600 – 1750 cm^{-1} ซึ่งคาดว่าจะเป็นพีคของ C=O stretching จากพันธะ Carboxylate (COO^-) และหมู่ Ester carbonyl ที่เป็นองค์ประกอบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส[56] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH พบว่า มีลักษณะการปรากฏของช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้เคียงกับผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ แต่จะมีความเข้มของพีคที่เพิ่มขึ้น อาทิ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล(-OH) ที่เลขคลื่นระหว่าง 3200-3500 cm^{-1}และหมู่ฟังก์ชัน Carbonyl (C=O) จากกลุ่ม Carboxylate ที่เลขคลื่นประมาณ 1600-1650 cm^{-1}

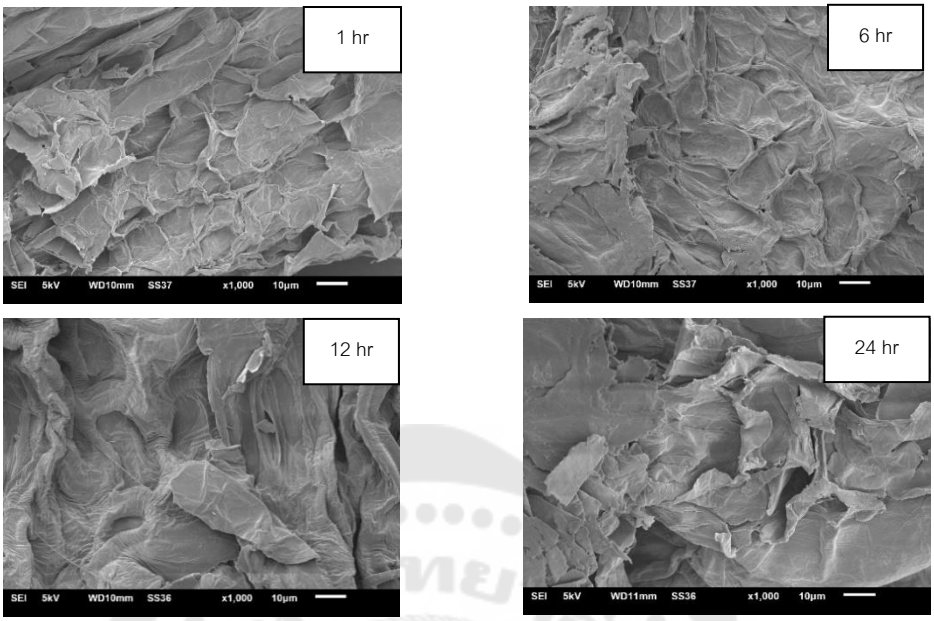
4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่มีการปรับสภาพ

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PPWH และผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

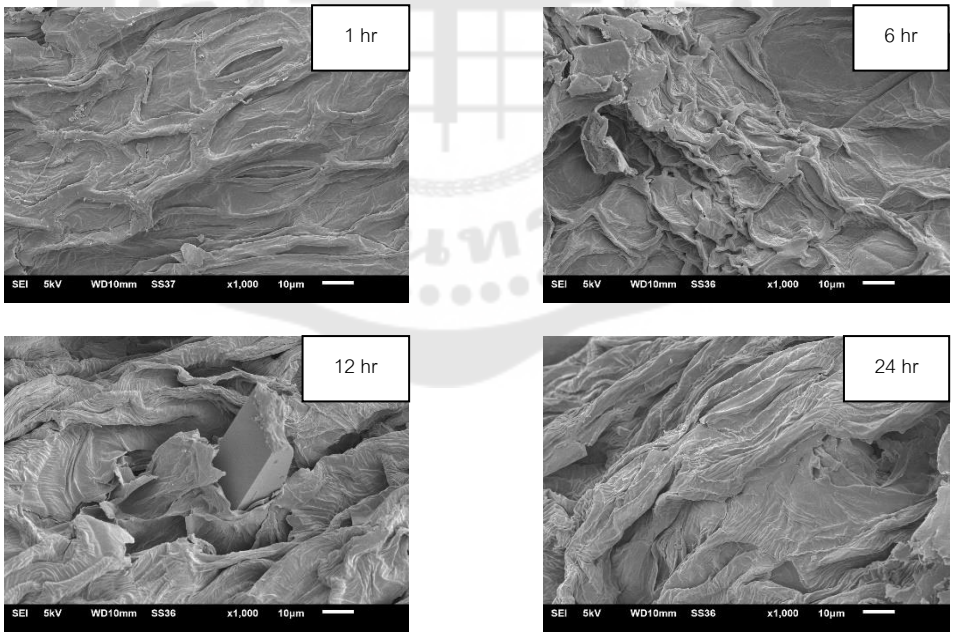
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ซึ่งฉาบผิววัสดุดูดซับด้วยทองคำ พบว่า ลักษณะพื้นผิวของ PPWH แตกต่างจากผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี โดย PPWH จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ เป็นแผ่นและมีการซ้อนกันเป็นชั้น ในขณะที่ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ ดังภาพประกอบ 11-14



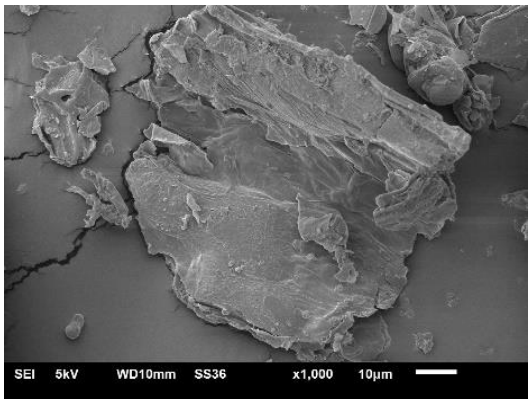
ภาพประกอบ 11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน



ภาพประกอบ 12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน



ภาพประกอบ 13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการปรับสภาพต่างกัน



ภาพประกอบ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PPWH

จากผลการศึกษาค่า I.N. และค่า M.B.N. แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพทางเคมีของผักตบชวา คือ การใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่า I.N. และค่า M.B.N. สูงกว่าการปรับสภาพที่สภาวะอื่น เนื่องจากทำให้ผักตบชวามีพื้นผิวเพิ่มมากที่สุด ดังการศึกษาในหัวข้อ 4.1.1 อีกทั้งยังสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่พบว่า NaOH ทำให้พื้นผิวของผักตบชวาเกิดความขรุขระมากขึ้น ดังนั้น จึงเลือกผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Chemical Pretreated Water Hyacinth; CPWH) สำหรับนำไปศึกษาสมบัติอื่น ๆ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าต่อไป

4.2 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี

4.2.1 การหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู

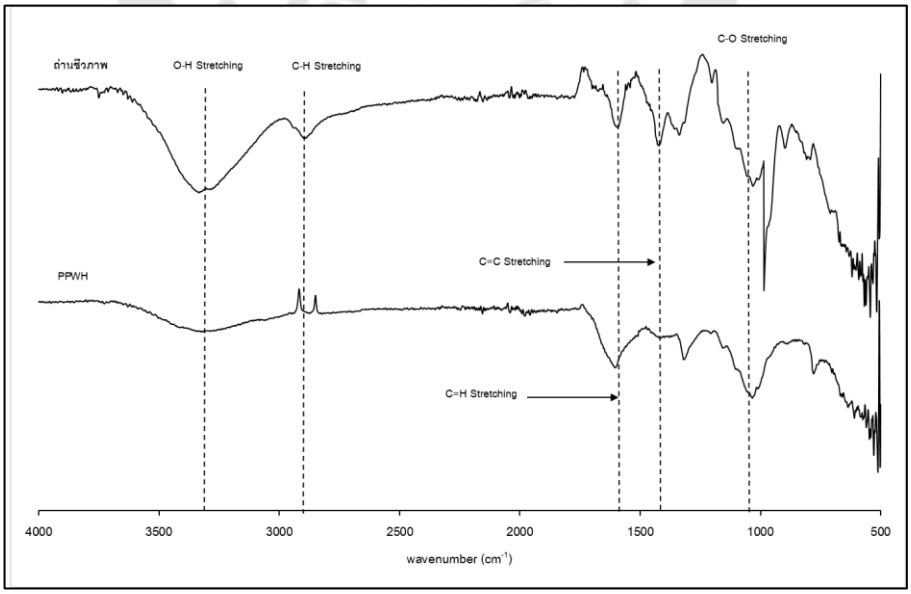
จากการปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี (ซึ่งต่อไปเรียกว่าถ่านชีวภาพ) ใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ลักษณะของถ่านชีวภาพที่ได้มีสีดำค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อนำมาทดสอบค่า I.N. และค่า M.B.N. พบว่า มีค่าเท่ากับ 714.50 และ 400.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ PPWH และ CPWH พบว่าถ่านชีวภาพมีค่าดังกล่าวสูงที่สุด (ตาราง 6)

ตาราง 6 ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพ CPWH และ PPWH

วัสดุดูดซับ	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)
ถ่านชีวภาพ	714.50	400.00
CPWH	519.56	344.83
PPWH	41.21	24.57

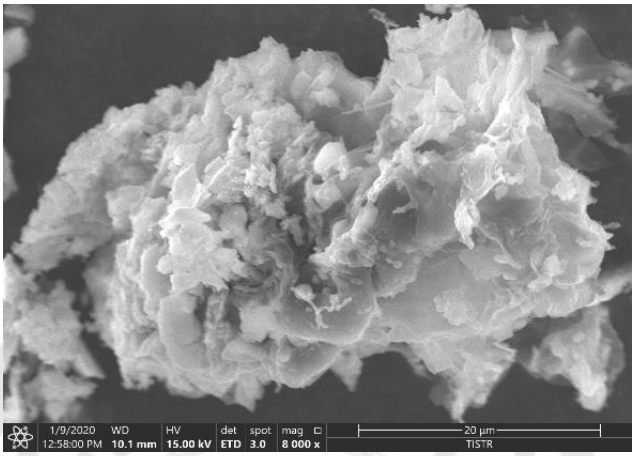
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง FT-IR เปรียบเทียบกับ PPWH (ภาพประกอบ 15) พบว่า มีลักษณะพีคที่ค่อนข้างแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ แต่ในขณะเดียวกันจะช่วยเพิ่มความเป็นวงอะโรมาติกของโครงสร้างถ่าน [57] โดยที่เลขคลื่นประมาณ 3300-3400 cm^{-1} ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอล (Phenolic Compounds) พีค C-H Stretching ที่ประมาณ 2800-3000 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) พีค C=O Stretching ที่ประมาณ 1600-1700 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทคาร์บอนิล (Carbonyl Compounds)



ภาพประกอบ 15 องค์ประกอบของถ่านชีวภาพและ PPWH

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะเกิดเป็นช่องว่างและมีรูพรุนมากกว่าการปรับสภาพทางกายภาพและเคมี (ภาพประกอบ 16)



ภาพประกอบ 16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ

4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับจากผักตบชวา

4.3.1 ปริมาณสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว

เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับจากผักตบชวา โดยการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) เถ้า (Ash Content) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) พบว่า PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ มีปริมาณสารระเหยร้อยละ 73.94±1.11 68.87±1.06 และ 22.81±0.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับปริมาณเถ้ามีค่าร้อยละ 77.75±0.18 11.18±0.37 และ 19.48±0.23 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว มีค่า 18.31±1.14 19.95±1.43 และ 55.70±0.30 โดยน้ำหนัก (ตาราง 7) ซึ่ง PPWH มีค่าปริมาณสารระเหยสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่ายส่วนใหญ่จะระเหยได้ที่อุณหภูมิสูง โดยอาจเกิดจากการสลายตัวของส่วนประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส [58] สำหรับถ่านชีวภาพมีปริมาณเถ้าต่ำและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ ปริมาณเถ้ายังเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของถ่าน เนื่องจากเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic Matter) ที่คงเหลืออยู่ในถ่านหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนกับวัตถุดิบตั้งต้น อีกทั้งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้มีการปนเปื้อนอยู่ในถ่าน [59]

ตาราง 7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณสารระเหย	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
PPWH	73.94±1.11	7.75±0.18	18.31±1.14
CPWH	68.87±1.06	11.18±0.37	19.95±1.43
ถ่านชีวภาพ	22.81±0.50	19.48±0.23	57.70±0.30

4.3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพด้วยวิธีการ Braunauer-Emmett-Teller Method (BET) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (-196 องศาเซลเซียส) ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 8 พบว่า CPWH มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรวมของรูพรุนมากกว่า PPWH โดยที่พื้นที่ผิวจำเพาะของCPWH และ PPWH มีค่าเท่ากับ 19.62 และ 16.16 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนมากกว่าวัสดุดูดซับดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน เท่ากับ 66.17 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.65×10^{-2} ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตาราง 8 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนรวม ด้วยวิธีการ BET

วัสดุดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรูพรุน (μm)	ปริมาณของรูพรุนรวม (cm^3/g)
PPWH	16.16	3.93×10^{-3}	1.21×10^{-1}
CPWH	19.62	4.43×10^{-3}	1.35×10^{-1}
ถ่านชีวภาพ	66.17	1.65×10^{-2}	1.13×10^{-1}

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหาร ได้แก่ ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน รวมถึงค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า โดยใช้ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ ทำการแปรผันปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ คือ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิในการดูดซับ และปริมาณวัสดุดูดซับ ซึ่งได้ผลการศึกษา ดังนี้

4.4.1 ระยะเวลาสัมผัส

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด โดยการเติมวัสดุดูดซับ 0.2 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1, 2, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษามีดังนี้

4.4.1.1 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ ที่ช่วงเวลา 1, 2, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่า ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 6.12 เป็น 6.20, 6.24 เป็น 6.26 และ 6.30 เป็น 6.32 ตามลำดับ (ตาราง 9) โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 1 – 24 ชั่วโมง พบว่า CPWH และถ่านชีวภาพมีค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการสัมผัสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในตัวอย่างน้ำเสีย

สำหรับค่าการนำไฟฟ้า พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างน้ำเสียลดลงจากค่าตั้งต้น โดย PPWH มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 81.0 เป็น 78.3 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ส่วน CPWH ลดลงจาก 76.7 เป็น 74.7 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ในขณะที่ถ่านชีวภาพลดลงจาก 74.0 เป็น 73.0 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร นอกจากนี้ระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (ตาราง 10)

ตาราง 9 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่เวลาต่างกัน

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
0	6.12 ± 0.02 * [a]	6.12 ± 0.02 * [a]	6.12 ± 0.02* [a]
1	6.12 ± 0.01 [a]	6.24 ± 0.01 [b]	6.30 ± 0.01 [b]
2	6.15 ± 0.04 [a b]	6.24 ± 0.01 [b]	6.31 ± 0.01 [b]
6	6.16 ± 0.04 [a b]	6.26 ± 0.05 [b]	6.32 ± 0.02 [b]

ตาราง 9 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
12	6.20 ± 0.02 [b]	6.27 ± 0.04 [b]	6.33 ± 0.02 [b]
24	6.20 ± 0.04 [b]	6.26 ± 0.01 [b]	6.32 ± 0.03 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	0.51	0.51	0.50

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

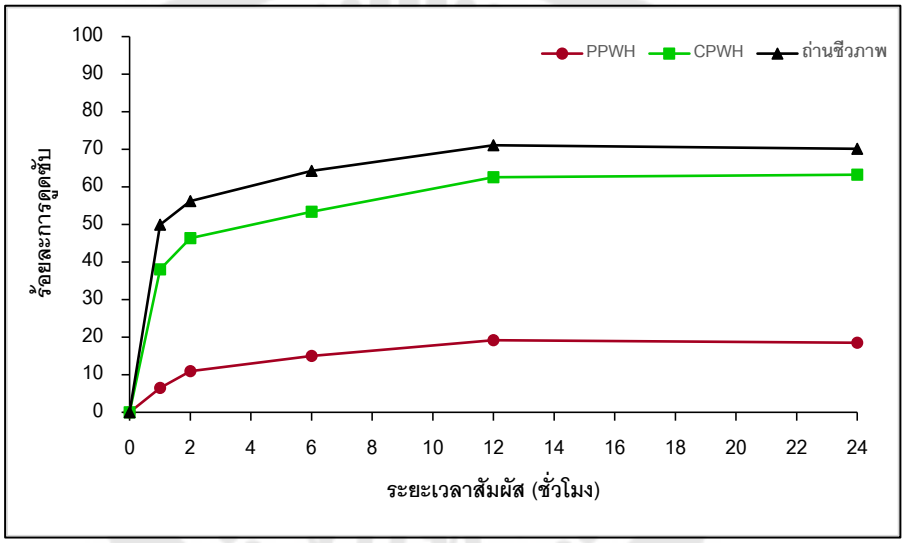
ตาราง 10 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่เวลาต่างกัน (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
0	82.00 ± 1.00 *[a]	82.00 ± 1.00 *[a]	82.00 ± 1.00 *[a]
1	81.00 ± 1.00 [a b]	76.67 ± 1.16 [b]	74.00 ± 1.00 [b]
2	79.33 ± 1.16 [b c]	76.67 ± 0.58 [b]	73.67 ± 0.58 [b]
6	78.67 ± 1.16 [c]	75.33 ± 0.58 [b c]	73.33 ± 0.58 [b]
12	79.67 ± 0.58 [b c]	75.00 ± 1.00 [c]	73.67 ± 0.58 [b]
24	78.33 ± 0.58 [c]	74.67 ± 0.58 [c]	73.00 ± 1.00 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	1.81	1.11	1.09

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.1.2 ออร์โธฟอสเฟต

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียด้วย PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 71.11, 62.59 และ 19.20 ตามลำดับ ทั้งนี้ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของถ่านชีวภาพ และ CPWH จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-6 ชั่วโมง จากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 12 ชั่วโมง และมีค่าคงที่จนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ส่วน PPWH มีแนวโน้มของร้อยละการดูดซับเป็นไปในทิศทางเดียวกับถ่านชีวภาพ และ CPWH ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ 12 ชั่วโมง วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับแตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 1, 2 และ 6 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 24 ชั่วโมง (ตาราง 11)

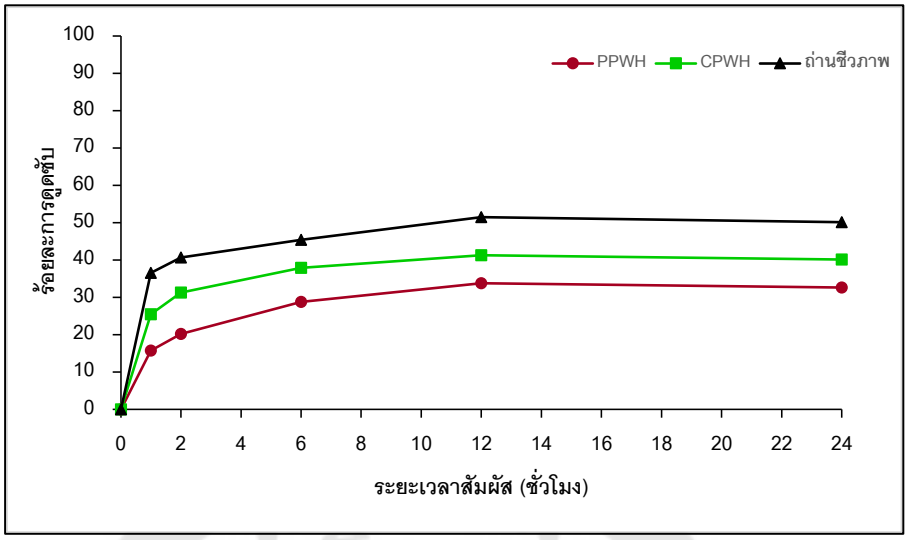
ตาราง 11 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
1	6.47 ± 1.08 [a]	38.06 ± 0.20 [a]	49.95 ± 0.71 [a]
2	10.94 ± 0.65 [b]	46.40 ± 0.64 [b]	56.21 ± 0.46 [b]
6	15.02 ± 0.06 [c]	53.43 ± 0.73 [c]	64.31 ± 0.28 [c]
12	19.20 ± 0.11 [d]	62.59 ± 0.95 [d]	71.11 ± 0.53 [d]
24	18.51 ± 0.28 [d]	63.29 ± 0.89 [d]	70.19 ± 1.30 [d]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	4.63	1.39	1.20

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.1.3 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

จากภาพประกอบ 18 พบว่า ร้อยละการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 12 ชั่วโมง และมีค่าคงที่จนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของถ่านชีวภาพมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 56.71, 44.34 และ 33.42 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดเป็นไปในทิศทางเดียวกับการดูดซับออร์โธฟอสเฟตดังข้อ 4.4.1.2 แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพและ CPWH ยังคงเป็นวัสดุดูดซับที่มีสมบัติและลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน มากกว่า PPWH



ภาพประกอบ 18 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ 12 ชั่วโมง วัสดุดูดซับ 2 ชนิด (PPWH และถ่านชีวภาพ) มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนแตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 1, 2 และ 6 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 24 ชั่วโมง ในขณะที่ CPWH พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 6 และ 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) (ตาราง 12)

ตาราง 12 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
1	15.79 ± 1.27 ^{a}	25.48 ± 0.48 ^{a}	36.57 ± 0.96 ^{a}
2	20.22 ± 1.44 ^{b}	31.30 ± 1.73 ^{b}	40.72 ± 0.96 ^{b}
6	28.81 ± 0.48 ^{c}	37.95 ± 1.27 ^{c}	45.43 ± 0.48 ^{c}
12	33.80 ± 0.48 ^{d}	41.27 ± 0.96 ^{cd}	51.52 ± 0.48 ^{d}

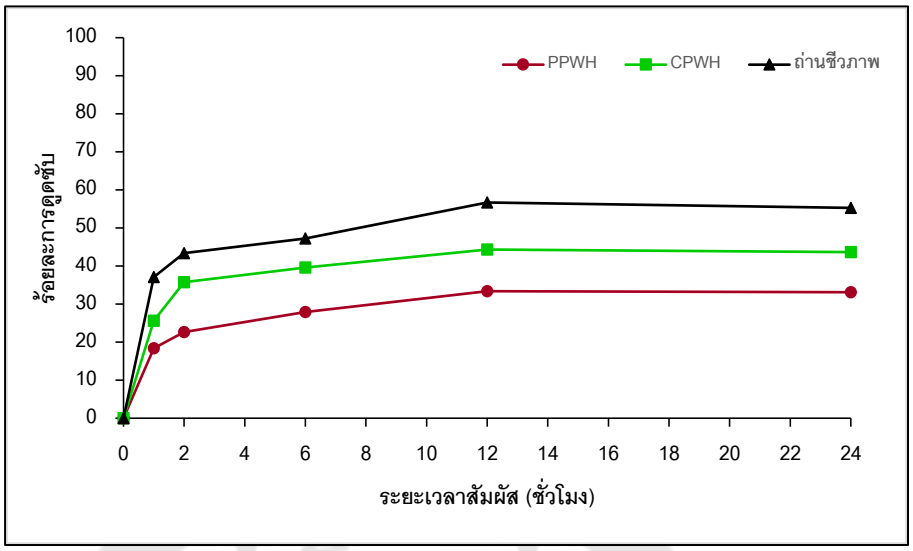
ตาราง 12 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
24	32.69 ± 0.83 [d]	40.17 ± 1.66 [d]	50.14 ± 0.83 [d]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	3.74	3.71	1.72

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.1.4 ไนไตรท์-ไนโตรเจน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียของ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ พบว่า ร้อยละการดูดซับมีค่า 33.42, 44.43 และ 56.71 ตามลำดับ ซึ่งถ่านชีวภาพยังคงประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนสูงที่สุด โดยอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟในภาพประกอบ 19 และพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนที่ดีที่สุดคือ ที่ระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง จากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้น ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ยังเป็นไปในทิศทางเดียวกับการดูดซับออร์โธฟอสเฟตและแอมโนเนีย-ไนโตรเจน ตามข้อ 4.4.1.2 และ 4.4.1.3 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 19 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนเตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ 12 ชั่วโมง วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนแตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 1, 2 และ 6 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับระยะเวลาสัมผัสที่ 24 ชั่วโมง (ตาราง 13)

ตาราง 13 ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างเสีย (ร้อยละ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
1	18.42 ± 2.28 [a]	25.66 ± 0.60 [a]	37.11 ± 0.46 [a]
2	22.63 ± 2.09 [b]	35.79 ± 0.99 [b]	43.42 ± 1.14 [b]
6	27.89 ± 1.99 [c]	39.61 ± 1.04 [c]	47.24 ± 1.39 [c]
12	33.42 ± 3.19 [d]	44.34 ± 0.68 [d]	56.71 ± 0.23 [d]

ตาราง 13 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
24	33.16 ± 0.46 [d]	43.68 ± 0.99 [d]	55.26 ± 2.28 [d]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	8.06	2.34	2.76

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า พบว่า อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสมีส่วนช่วยในดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด อีกทั้งยังพบว่า สภาวะคงที่ของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) คือ ที่ระยะเวลาสัมผัส 12 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่าร้อยละ 55 ทั้งนี้จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 12 ชั่วโมง จึงเลือกนำไปศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด โดยการเติมวัสดุดูดซับ 0.2 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษามีดังนี้

4.4.2.1 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

จากตาราง 14 และ 15 พบว่า อุณหภูมิของการทดลองทำให้ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้น พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่ถ่านชีวภาพทำให้ค่าพีเอชในตัวอย่างน้ำเสียเพิ่มขึ้นจาก 6.53 เป็น 6.62 ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงจาก 76.33 เป็น 73.33 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร กล่าวได้ว่าคุณสมบัติของถ่านชีวภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างน้ำเสีย

ตาราง 14 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
-	6.53 ± 0.02 * [a]	6.53 ± 0.02 * [a]	6.53 ± 0.02 * [a]
25	6.58 ± 0.03 [b]	6.59 ± 0.01 [b]	6.61 ± 0.02 [b]
30	6.59 ± 0.01 [b]	6.60 ± 0.01 [b]	6.61 ± 0.01 [b]
35	6.59 ± 0.01 [b]	6.60 ± 0.05 [b]	6.61 ± 0.01 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	0.48	0.48	0.48

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

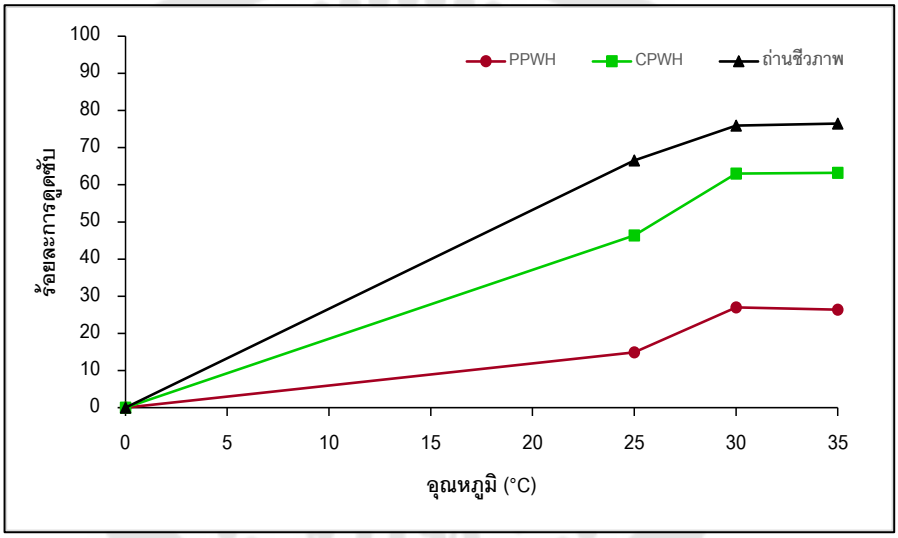
ตาราง 15 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)

อุณหภูมิ (°C)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
-	76.33 ± 1.15 *[a]	76.33 ± 1.15 * [a]	76.33 ± 1.15 * [a]
25	75.67 ± 0.58 [a b]	75.67 ± 0.58 [a b]	74.67 ± 0.58 [b]
30	75.33 ± 1.15 [a b]	76.00 ± 1.00 [a b]	73.67 ± 0.58 [b]
35	74.33 ± 0.58 [b]	74.33 ± 0.58 [b]	73.33 ± 0.58 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	1.23	1.14	1.02

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.2.2 ออร์โธฟอสเฟต

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลอง จาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น โดย PPWH มีค่าร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.90 เป็น 26.37 ส่วน CPWH มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.37 เป็น 63.20 ในขณะที่ถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66.53 เป็น 76.45 ดังภาพประกอบ 20 อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพยังคงประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH



ภาพประกอบ 20 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแตกต่างกับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ตาราง 16)

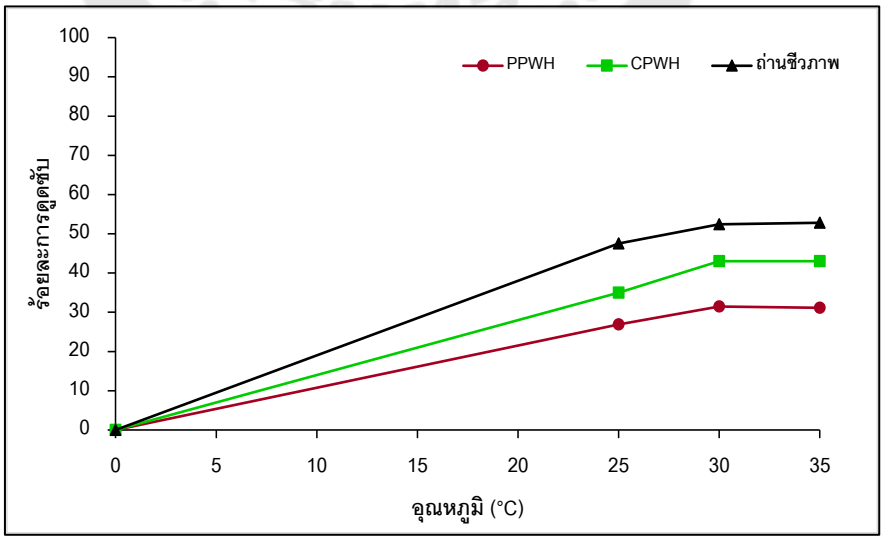
ตาราง 16 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
25	14.90 ± 0.38[a]	46.37 ± 1.18 [a]	66.53 ± 0.70 [a]
30	26.99 ± 0.65 [b]	63.00 ± 0.95 [b]	75.95 ± 0.49 [b]
35	23.37 ± 0.80 [b]	63.20 ± 0.62 [b]	76.45 ± 0.28 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	2.79	1.65	0.71

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.2.3 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า พบว่า ถ่านชีวภาพยังคงประสิทธิภาพในการดูดซับ แอมโมเนีย-ไนโตรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 47.55 เป็น 52.80, 34.97 เป็น 43.01 และ 26.92 เป็น 31.12 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติที่ พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนแตกต่างกับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ตาราง 17)

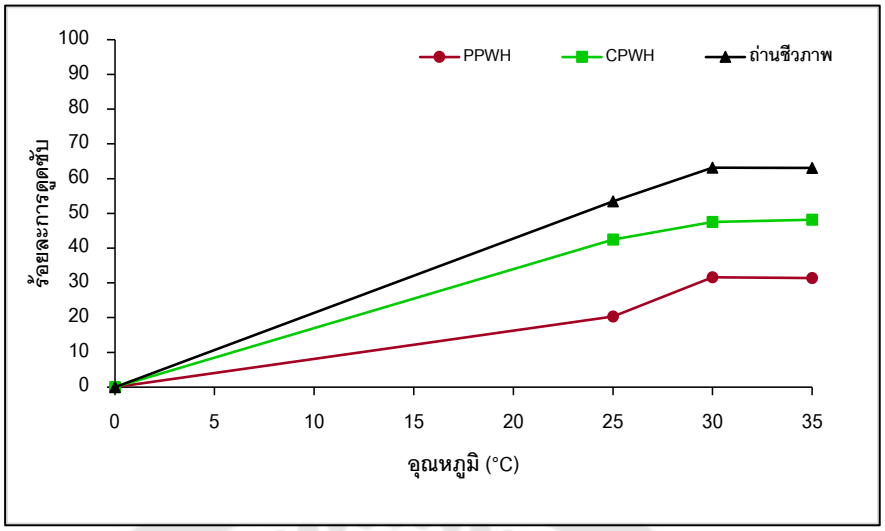
ตาราง 17 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
25	26.92 ± 0.61 [a]	34.97 ± 0.00 [a]	47.55 ± 0.00 [a]
30	31.47 ± 0.61 [b]	43.01 ± 0.61 [b]	52.45 ± 0.61 [b]
35	31.12 ± 0.61 [b]	43.01 ± 0.61 [b]	52.80 ± 0.00 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	2.03	1.23	0.69

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.2.4 ไนไตรท์-ไนโตรเจน

จากภาพประกอบ 22 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดลองจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนของ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.30 เป็น 31.43, 42.48 เป็น 48.20 และ 53.46 เป็น 63.06 ตามลำดับ โดยถ่านชีวภาพยังคงประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับเป็นไปในทิศทางเดียวกับการดูดซับออร์โธฟอสเฟต และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน



ภาพประกอบ 22 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนแตกต่างกับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างกับอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ตาราง 18)

ตาราง 18 อุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
25	20.30 ± 1.30 [a]	42.48 ± 0.98 [a]	53.46 ± 0.34 [a]
30	31.58 ± 1.30 [b]	47.52 ± 0.57 [b]	63.15 ± 0.65 [b]
35	31.43 ± 1.19 [b]	48.20 ± 1.24 [b]	63.08 ± 0.79 [b]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	4.55	2.11	1.04

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

จากผลการศึกษาการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าด้วยวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด โดยการแปรผันอุณหภูมิในการดูดซับ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 35 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า อุณหภูมิที่ต่างกันในช่วง 30 – 35 องศาเซลเซียส มีผลต่อการดูดซับธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) ดังนั้น จึงเลือกอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาในหัวข้อต่อไป

4.4.3 ปริมาณวัสดุดูดซับ

การใช้งานวัสดุดูดซับในทางอุตสาหกรรมต้องพิจารณาถึงจุดคุ้มทุนร่วมกับประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายการลดต้นทุน จึงต้องศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorbent Dose) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า โดยแปรผันปริมาณวัสดุดูดซับที่ 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษามีดังนี้

4.4.3.1 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

จากตาราง 19 และ 20 พบว่า มีค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น 6.71 และ 71.00 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น โดย PPWH มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.73 – 6.76 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 66.77 – 68.77 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ในขณะที่ CPWH มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.77 – 6.78 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 64.33 - 65.33 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ส่วนถ่านชีวภาพมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.77 – 6.81 และค่านำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 61.33 – 63.33 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร

ตาราง 19 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
-	6.71 ± 0.01 *[a]	6.71 ± 0.01 *[a]	6.71 ± 0.01 *[a]
2	6.73 ± 0.01 [b]	6.77 ± 0.01 [b]	6.78 ± 0.01 [b]
5	6.73 ± 0.01 [b]	6.78 ± 0.01 [bc]	6.77 ± 0.01 [b]
10	6.74 ± 0.01 [bc]	6.78 ± 0.01 [bc]	6.80 ± 0.01 [c]

ตาราง 19 (ต่อ)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
15	6.75 ± 0.01 ^{cd}	6.78 ± 0.01 ^{bc}	6.81 ± 0.01 ^{c}
20	6.76 ± 0.01 ^{d}	6.78 ± 0.01 ^{bc}	6.80 ± 0.01 ^{c}
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	0.47	0.47	0.47

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

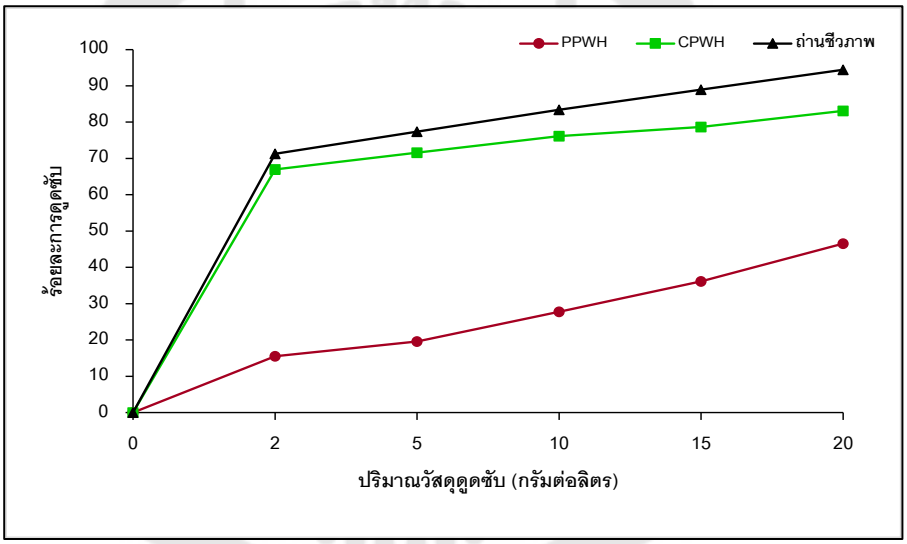
ตาราง 20 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
-	71.00 ± 1.00 *^{a}	71.00 ± 1.00 *^{a}	71.00 ± 1.00 *^{a}
2	67.67 ± 0.58 ^{b}	65.33 ± 0.58 ^{b}	65.33 ± 0.58 ^{b}
5	67.67 ± 0.58 ^{b}	65.00 ± 1.00 ^{b}	65.00 ± 1.00 ^{b}
10	67.33 ± 0.58 ^{b}	65.00 ± 1.00 ^{b}	65.00 ± 1.00 ^{bc}
15	66.67 ± 0.58 ^{b}	64.67 ± 0.58 ^{b}	64.67 ± 0.58 ^{bc}
20	66.67 ± 0.58 ^{b}	64.33 ± 0.58 ^{b}	64.33 ± 0.58 ^{c}
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	0.98	1.24	1.50

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, * คือ ค่านำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำเสียก่อนการดูดซับ, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.3.2 ออร์โธฟอสเฟต

จากผลการศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าโดยใช้ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น โดย PPWH มีค่าร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.52 เป็น 46.53 ส่วน CPWH มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66.97 เป็น 83.11 ในขณะที่ถ่านชีวภาพจะมีค่าร้อยละการดูดซับสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 71.27 เป็น 94.41 ดังภาพประกอบ 23 ซึ่งเห็นได้ว่าการปรับสภาพวัสดุดูดซับโดยการทำเป็นถ่านชีวภาพและการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี ยังคงเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด ตามลำดับ



ภาพประกอบ 23 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า การใช้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตแตกต่างกับปริมาณ 2-15 กรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตาราง 21)

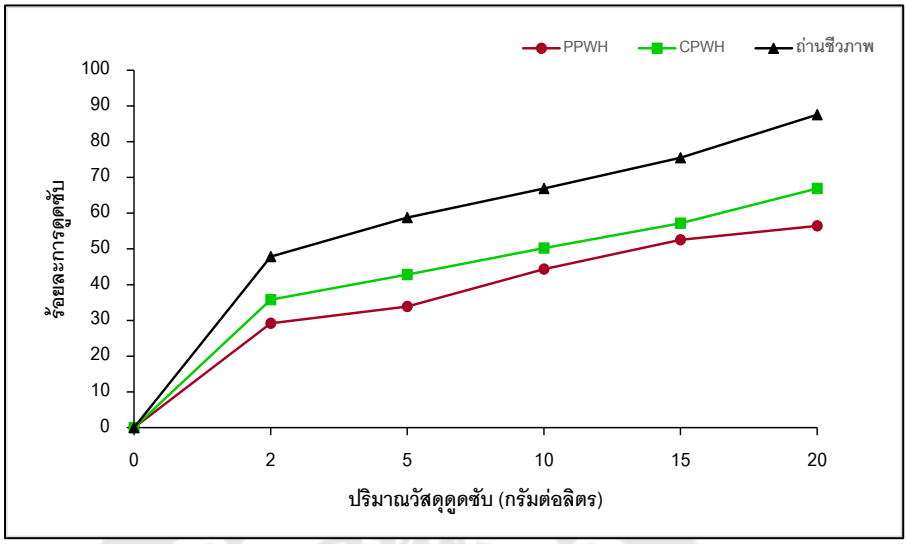
ตาราง 21 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
2	15.52 ± 0.94 [a]	66.97 ± 0.27 [a]	71.27 ± 0.22 [a]
5	19.58 ± 0.57 [b]	71.63 ± 0.17 [b]	77.38 ± 0.36 [b]
10	27.76 ± 0.18 [c]	76.16 ± 0.11 [c]	83.40 ± 0.11 [c]
15	36.15 ± 0.73 [d]	78.69 ± 0.32 [d]	88.98 ± 0.05 [d]
20	46.52 ± 0.55 [e]	83.11 ± 0.31 [e]	94.41 ± 0.09 [e]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	2.22	0.33	0.24

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.3.3 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

จากภาพประกอบ 24 พบว่า การเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด คือ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ จาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าร้อยละการดูดซับจาก 29.18 เป็น 56.42 35.80 เป็น 66.93 และ 47.86 เป็น 87.55 ตามลำดับ ซึ่งถ่านชีวภาพยังมีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH ตามลำดับ



ภาพประกอบ 24 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า การใช้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนแตกต่างกับปริมาณ 2-15 กรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตาราง 22)

ตาราง 22 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
2	29.18 ± 1.35 [a]	35.80 ± 1.17 [a]	47.86 ± 0.67 [a]
5	33.85 ± 1.78 [b]	42.80 ± 1.17 [b]	58.78 ± 0.67 [b]
10	44.36 ± 0.67 [c]	50.19 ± 0.67 [c]	66.93 ± 0.67 [c]
15	52.53 ± 1.35 [d]	57.20 ± 1.78 [d]	75.49 ± 2.02 [d]

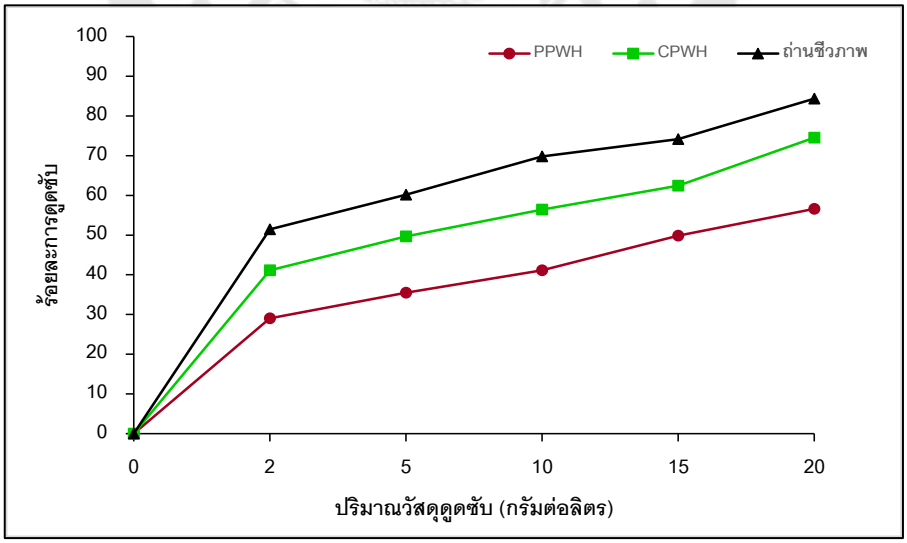
ตาราง 22 (ต่อ)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	ถ่านชีวภาพ
20	56.42 ± 0.67 [e]	66.93 ± 0.67 [e]	87.55 ± 0.67 [e]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	2.87	2.27	1.61

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

4.4.3.4 ไนไตรท์-ไนเตรเจน

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนเตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า พบว่า ถ่านชีวภาพยังคงประสิทธิภาพในการดูดซับไนไตรท์-ไนเตรเจนสูงที่สุด รองลงมาคือ CPWH และ PPWH โดยการเพิ่มปริมาณวัสดุดูซับในการทดลองจาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 51.45 เป็น 84.36 41.13 เป็น 73.87 และ 29.03 เป็น 56.61 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 ร้อยละการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า การใช้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนแตกต่างกับปริมาณ 2-15 กรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตาราง 23)

ตาราง 23 ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสีย (ร้อยละ)

ปริมาณวัสดุดูดซับ (g/L)	PPWH	CPWH	**ถ่านชีวภาพ**
2	29.03 ± 2.79 [a]	41.13 ± 1.40 [a]	51.45 ± 0.28 [a]
5	35.48 ± 1.40 [b]	49.68 ± 0.84 [b]	60.16 ± 0.28 [b]
10	41.13 ± 0.56 [c]	56.45 ± 0.84 [c]	69.84 ± 0.28 [c]
15	49.84 ± 0.56 [d]	62.42 ± 0.56 [d]	74.19 ± 0.56 [d]
20	56.11 ± 0.28 [e]	74.52 ± 1.12 [e]	84.32 ± 1.01 [e]
F-test	**	**	**
C.V. (ร้อยละ)	3.67	1.75	0.82

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$) โดยวิธี DMRT, ** คือ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p<0.05$)

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ในการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 2 เป็น 20 กรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุดูดซับที่ใช้

4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ PPWH CPWH และถ่านชีวภาพ ใช้ผลจากการศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับ (ข้อ 4.4.3) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าความจุในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน ของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (q_e) และความเข้มข้นที่จุดสมดุล (C_e) อาศัยรูปแบบสมการของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir

Isotherm) และรูปแบบสมการของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) ผลการศึกษารูปแบบการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตาราง 24-26 และภาคผนวก ข (ภาพประกอบ ข1 - ข6)

ตาราง 24 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2	K_F (L/mg)	1/n	R^2
PPWH	0.037	0.80	0.8540	0.009	1.7250	0.8149
CPWH	0.055	2.39	0.9630	2.852	0.2943	0.9147
ถ่านชีวภาพ	0.054	2.84	0.8971	0.663	1.1334	0.8102

ตาราง 25 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2	K_F (L/mg)	1/n	R^2
PPWH	0.013	2.79	0.9647	6.869	2.8738	0.8744
CPWH	0.011	5.36	0.8666	23.259	0.3406	0.8135
ถ่านชีวภาพ	0.019	20.83	0.8270	0.215	1.0888	0.7509

ตาราง 26 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจน

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2	K_F (L/mg)	1/n	R^2
PPWH	3.200	0.01	0.9354	9.574	3.1599	0.8606
CPWH	4.123	0.02	0.8119	0.449	0.3912	0.7963
ถ่านชีวภาพ	1.826	0.13	0.8650	1.263	1.5349	0.8221

จากตาราง 24-26 พบว่า แบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient; R^2) ของสมการเข้าใกล้ 1 มากกว่า[60] โดยค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (q_m) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน พบว่า PPWH มีค่า q_m เท่ากับ 0.80, 2.79 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่า K_L เท่ากับ 0.037, 0.013 และ 3.200 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ CPWH มีค่า q_m เท่ากับ 2.39 5.36 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่า K_L เท่ากับ 0.055 0.011 และ 4.123 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ สำหรับถ่านชีวภาพ มีค่า q_m เท่ากับ 2.48 20.83 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่า K_L เท่ากับ 0.054 0.019 และ 1.826 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีความจุสูงสุดในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด รองลงมาคือ CPWH และPPWH ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุสูงสุดของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจน พบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนสูงกว่าซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์ และไคโทซาน ในขณะที่ค่าความจุสูงสุดการดูดซับออร์โธฟอสเฟต และไนไตรท์-ไนโตรเจน พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดยังมีค่าน้อยกว่าวัสดุดูดซับประเภทอื่น ๆ ดังตาราง 27-29

ตาราง 27 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ชนิดวัสดุดูดซับ	q_m (mg/g)	**เอกสารอ้างอิง**
ถ่านชีวภาพจากผักกาดขาวที่ถูกกระตุ้นทางเคมี	127.20	Zhang et al. (2019)[61]
เส้นใยไม้ที่ปรับสภาพด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์	3.00	Eberhardt and Min (2008)[62]
โดโลไมท์	476.19	Nugroho et al. 2014[63]
PPWH	0.80	งานวิจัยนี้
CPWH	2.39	งานวิจัยนี้
ถ่านชีวภาพ	2.84	งานวิจัยนี้

ตาราง 28 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจน

ชนิดวัสดุดูดซับ	q_m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
ซีโอไลท์	0.0493	อัญรินทร์ (2559) [43]
ถ่านกัมมันต์	0.0837	อัญรินทร์ (2559) [43]
ไคโทซาน	11.60	Yadi et al. (2016) [64]
PPWH	2.79	งานวิจัยนี้
CPWH	5.36	งานวิจัยนี้
ถ่านชีวภาพ	20.83	งานวิจัยนี้

ตาราง 29 ค่าความจุสูงสุดการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจน

ชนิดวัสดุดูดซับ	q_m (mg/g)	เอกสารอ้างอิง
ผงถ่านกัมมันต์	1.20	Nese and Ennil 2008 [65]
Sepiolite	0.07	Nese and Ennil 2008 [65]
PPWH	0.01	งานวิจัยนี้
CPWH	0.02	งานวิจัยนี้
ถ่านชีวภาพ	0.13	งานวิจัยนี้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผักตบชวาได้ถูกนำมาปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และกายภาพ-เคมี (ถ่านชีวภาพ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสียจากการผลิตปลาร้า สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ พบว่า ถ่านชีวภาพ มีค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และเมทิลีนบลู (M.B.N) สูงที่สุด รองลงมาคือผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (CPWH) และการปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ (PPWH) โดยถ่านชีวภาพมีลักษณะสเปกตรัมของ FT-IR ที่ค่อนข้างแตกต่างจากวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด แต่ยังพบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในขณะที่ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM พบว่า พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีลักษณะที่ขรุขระและมีรูพรุน ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับที่ดี สอดคล้องกับผลการศึกษาพื้นที่ผิวด้วยวิธีการของบีอีที (BET) ที่พบว่า มีพื้นที่ผิว 66.17 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 1.65×10^{-2} ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการดูดซับ

2. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสีย พบว่า ถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนสูงที่สุด ที่สภาวะการดูดซับ คือ ระยะเวลาในการสัมผัส 8 ชั่วโมง อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณวัสดุดูดซับ 20 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนมีค่าประมาณร้อยละ 71-94

3. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสีย พบว่า แบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช ซึ่งเป็นการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีลักษณะแบบชั้นเดียว (Monolayer) มีความสม่ำเสมอ (Homogenous) โดยถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และไนไตรท์-ไนโตรเจนสูงที่สุด คือ 2.48 20.83 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหารในตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตปลาร้าสูงที่สุด

ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่นำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนธาตุอาหารก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางเคมี

การใช้ NaOH ปรับสภาพผักตบชวาทำให้ค่าการดูดซับ I.N. และ M.B.N. เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุมาจาก NaOH ส่งผลต่อพื้นผิวสัมผัส โดยเฉพาะส่วนที่เป็นเยื่อใยที่เป็นองค์ประกอบของผักตบชวา อีกทั้งการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ NaOH จะมีผลต่อองค์ประกอบของเซลลูโลสเกิดการบวมตัว รวมถึงการย่อยสลายลิกนินบริเวณพื้นผิวของผักตบชวา ดังงานวิจัยของอุสารัตน์ (2558) [13] ที่ใช้ NaOH ปรับสภาพเปลือกสับปะรดส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ โดยค่า I.N. และ M.B.N. ของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพมีค่าสูงสุด คือ 253.86 และ 512.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ การใช้ NaOH ในการปรับสภาพยังทำให้เกิดการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนิน รวมถึงสามารถทำลายความเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของผักตบชวา ส่งผลให้ CPWH มีลักษณะพื้นที่ผิวที่ขรุขระและมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ดังงานวิจัยของ นิธิศ และคณะ (2561) [66] ที่ปรับสภาพแกลบด้วยวิธี Alkali-Acid Modification สามารถช่วยในการสลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสและการสลายโครงสร้างของลิกนิน รวมถึงยังมีแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักได้ดีขึ้น

5.2.2 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ I.N. และ M.B.N. ที่พบว่า ผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพมีค่าสูงกว่า PPWH และ CPWH ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถ่านชีวภาพมีสภาพพื้นผิวที่เป็นรูพรุนจึงสามารถดูดซับโมเลกุลของไอโอดีนที่มีขนาดเล็กได้ดี รวมถึงการดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่มีขนาดกลางได้ดีอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM ที่พบลักษณะช่องว่างและมีรูพรุน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถ่านชีวภาพที่ผ่านการไพโรไลซิสทำให้สารที่ระเหยได้ง่ายจะสลายไปด้วยความร้อน ส่งผลให้เกิดช่องว่างและรูพรุนในถ่าน

5.2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับจากผักตบชวา

การปรับสภาพผักตบชวาด้วย NaOH ทำให้ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรวมของรูพรุนมากกว่า PPWH ดังงานวิจัยของอุสารัตน์ (2558) [13] ที่รายงานว่า เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรวมของรูพรุน มากกว่าเปลือก

สับปะรดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งอาจเป็นผลจากความสามารถของ NaOH ในการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนินและทำลายความเป็นโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส (Cellulose Crystalline) ในขณะที่ถ่านชีวภาพมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนมากกว่า CPWH และ PPWH อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ ทั้งนี้หากมีการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับได้ ดังงานวิจัยของ Jindo et al. (2014)[67] ที่ได้ศึกษาอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่ 400-800 องศาเซลเซียส สำหรับเตรียมถ่านชีวภาพจากฟางข้าว พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวเพิ่มขึ้นจาก 46.60 เป็น 256.96 ตารางเมตรต่อกรัม

5.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพ

5.2.4.1 ระยะเวลาสัมผัส

ร้อยละการดูดซับธาตุอาหารของถ่านชีวภาพ CPWH และ PPWH จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-6 ชั่วโมง จากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 12 ชั่วโมง และมีค่าคงที่จนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งอธิบายได้ว่า ในระยะเริ่มต้นพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับจะมีมาก ส่งผลให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลาหนึ่งที่พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับจะถูกดูดติดด้วยตัวถูกดูดซับจนเข้าสู่สภาวะสมดุลจะทำให้อัตราการดูดซับลดลงและเกิดการคายซับ (Desorption) [68] ดังงานวิจัยของ Hashem et al. (2020)[69] ที่พบว่า ถ่านชีวภาพจากผักตบชวามีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสูงสุดในช่วง 10 นาทีแรก จากนั้นประสิทธิภาพจะคงที่จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 15-25 นาที

5.2.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

ประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ไอออนในน้ำเสียได้รับพลังงานจลน์มากขึ้น สามารถดูดซับบนพื้นผิวได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้กระบวนการดูดซับดังกล่าวเป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic) ดังงานวิจัยของ Khalil et al. (2018) [70] ที่ใช้อุณหภูมิในการดูดซับแอมโมเนียมด้วยถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ 25±5, 35±5 และ 45±5 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมมีค่าร้อยละ 43.0, 53.7 และ 69.5 ตามลำดับ

5.2.4.3 ปริมาณวัสดุดูดซับ

การเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 2 เป็น 20 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับวัสดุดูดซับ[71] ดังงานวิจัยของอรดี และศศิธร (2557)[72] ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มากขึ้น

(0-32 กรัม) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 32 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึงร้อยละ 89.11 อย่างไรก็ตาม ค่าความจุของการดูดซับจะแปรผกผันกับปริมาณวัสดุดูดซับ โดยที่ค่าความจุของการดูดซับจะลดลงเมื่อวัสดุดูดซับมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจมาจากตำแหน่งที่จะเกิดการรวมตัวของวัสดุดูดซับไม่อิ่มตัว มีผลให้ค่าความจุการดูดซับมีค่าน้อยลง[73]

5.2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีลักษณะแบบชั้นเดียว (Monolayer) มีความสม่ำเสมอ (Homogenous) ที่อยู่บนพื้นที่ของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด อีกทั้งตำแหน่งในการดูดซับมีปริมาตรที่แน่นอน[74] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณากลไกการดูดซับธาตุอาหารโดยวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด อธิบายได้ว่า เป็นการดูดซับด้วยกลไกทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุแบบชั้นเดียว รวมถึงเกิดการดูดซับในช่วงอุณหภูมิต่ำ [75]

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพการดูดซับธาตุอาหารได้อย่างสมบูรณ์

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงกระบวนการคายการดูดซับ ซึ่งเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ซ้ำ

3. ควรศึกษาความสามารถในการใช้ประโยชน์ของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับธาตุอาหารในน้ำเสีย เพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน (Soil Conditioner)

4. ควรศึกษาความสามารถในการดูดซับสารมลพิษอื่น ๆ ในน้ำเสีย อาทิ โลหะหนัก สีย้อม

5. ควรมีการศึกษาสภาวะอื่น ๆ ในการเผาถ่านชีวภาพภายใต้สภาวะไพโรไลซิส อาทิ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเผา

6. หากต้องการนำถ่านชีวภาพไปใช้งานจริง ควรศึกษารูปแบบที่ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน เช่น การอัดแท่งหรือเม็ด เป็นต้น รวมถึงควรศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และสังคม เพื่อให้ตอบโจทย์และเกิดความคุ้มค่าต่อการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมและสังคม

บรรณานุกรม

1. องค์การจัดการน้ำเสีย. แผนวิสาหกิจองค์การจัดการน้ำเสีย พ.ศ.2560-2564 (ทบทวนครั้งที่ 2). กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ. 2561.

2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. สถิติสะสมจำนวนโรงงานที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ตาม พ.ร.บ.โรงงาน พ.ศ. 2535 จำแนกตามประเภท รายจำพวก ณ สิ้นปี 2559. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ. 2560.

3. กรมควบคุมมลพิษ. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม. 2559, 6 มิถุนายน. ราชกิจจานุเบกษา.เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 129ง. 2559.

4. กรมควบคุมมลพิษ. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดให้บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม. 2548, 14 พฤศจิกายน. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 122. ตอนพิเศษ 129ง. 2548.

5. กรมควบคุมมลพิษ. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. 2537. 24 กุมภาพันธ์. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 111 ตอนที่ 16. 2537.

6. กรมควบคุมมลพิษ. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน. 2553, 7 เมษายน. ราชกิจจานุเบกษา.เล่มที่ 127 ตอนพิเศษ 69ง. 2553.

7. รัตนาภร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทรอัมพร และดวงกมล ณ ระนอง. การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย. วิศวสารลาดกระบัง. 2554;28(4):31-7.

8. พอตา ประสานนาม. การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก Hydroxyethyl Cellulose [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์]: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2547.

9. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1, editor. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.

10. Sawyer, CN., McCarty, PL. and Parkin, GF. Chemistry for environmental engineering. 4th, editor. Singapore: McGrawHill; 1994.

11. Huey, D.W., Simco, B.A. , and, Criswell, D.W. Nitrite-induced methaemoglobin formation in channel catfish. Transactions of the America Fisheries Society. 1980;109:558-62.

12. เสาวภา ไวยสุศรี. การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่. รายงานผลการวิจัย,มหาวิทยาลัยศรีปทุม. 2558.

13. อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.

14. Nguyen T. AH, Ngo H. H., Guo W. and Nguyen T. V. Phosphorous removal from aqueous solutions by agricultural by-products: A critical review. Journal of Water Sustainability. 2012;2(3):193-207.

15. ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย; 2554.

16. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ: เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ. 4th, editor. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2544.

17. ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. การวิเคราะห์น้ำเสียและน้ำเสียเบื้องต้น: สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน; 2553.

18. สมเพียร จิรชัย. หลักการแปรรูปและถนอมอาหาร. กาญจนบุรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏกาญจนบุรี; 2542.

19. สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ. คู่มือวิชาการ: แนวทางการควบคุมการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ การผลิต สะสม หรือแบ่งบรรจุอาหารหมักดองจากสัตว์ ประเภท ปลาร้า ปลาส้ม ปลาจ่อม หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน: กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข; 2561.

20. คมกฤต เมฆสกุล, พิมพ์ศิริ สุวรรณพัฒน์,. การศึกษาผลกระทบในการนำระบบมาตรฐานและการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14000 ไปประยุกต์ใช้ในโรงงานปลาส้มสันเวียงใหม่ (ศรีทนปลาส้ม) จังหวัดพะเยา. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2556; 16-18 ตุลาคม 2556; ชลบุรี2556. p. 29-33.

21. จารุวรรณ พลเสน, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล และเกษม จันทร์แก้ว. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปลาส้มด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 13 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; วันที่ 8-9 ธันวาคม2559. p. 1547-53.

22. ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ. ผักตบชวา. บทความวิทยุ รายการสาระความรู้ทางการเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2537.

23. สุรชัย มัจฉาชีพ. วัชพืชในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แพร่วิทยา; 2538.

24. จิระศักดิ์ แสงพุ่ม, เดชา ฉัตรศิริเวช, และจิตรา จงวิศาล. ผลของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาสำหรับดูดซับไอเบนซิน. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต. 2543;4(1):48-54.

25. Sivasankari, B. and Ravindran,D. A study on chemical analysis of water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). International Journal of Innovative Research in Science and Technology. 2016;5(10):17566-70.

26. ลักษณา อินทร์กลับ. โภชนศาสตร์ทางชีวเคมีวิตามิน เกลือแร่ น้ำและใยอาหาร. กรุงเทพฯ: มีเดียการพิมพ์; 2543.

27. ชัชนันท์ นิวาสวงษ์, และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2555;40(4):1073-88.

28. Ofomaja, A.E., Naidoo, E.B. and Modise, S.J. Removal of copper(II) from aqueous solution by pine and base modified pine cone powder as biosorbent. Journal of Hazardous Materials. 2009;168:909-17.

29. สารชัย เวชรัชต์พิมล. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษห่ออาหารเพื่อใช้สาหรับเตาอบแบบไมโครเวฟ [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2548.

30. Barka N, . Abdennouri, M., Makhfouk, M. and Qourzal, S. Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2013;1:144-9.

31. Xuang Z, Tang, Y., Li, X., Liu, Y. and Luo, F. Study on the equilibrium, kinetics, and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel. Biochemical Engineering Journal. 2006;31(2):160-4.

32. กันตพัฒน์ กสิบุตร. การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม]. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2558.

33. Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P. and Kushwaha, P. Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk. Desalination. 2011;256(1-3):159-68.

34. Li, W.C.,Law, F.Y.and Chan, Y.H.M. Biosorption studies on copper (II) and cadmium (II) using pretreated rice straw and rice husk. Environmental Science and Pollution Research. 2017;24:8903–15.

35. Ronda, A., Martin-Lara, M.A., Calero, M. and Blazquez, G. Analysis of the kinetics of lead biosorption using native and chemically treated olive tree pruning. Ecological Engineering. 2013;58:278-85.

36. Winsley, P. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. New Zealand Science Review. 2007;64:5-10.

37. Novak, J.M., I.M. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrah, D.W. Watts, W.J. Busscher and H. Schomberg. Charcaterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. Annals of Environmental Science and Pollution Research. 2009;3:195-206.

38. ฐานิฏฐ์กานต์ ทวนไธสง, กมณชนก วงศ์สุขสิน, และ เจริญศักดิ์ เลางาม. การดูดซับตะกั่ว (II) และทองแดง (II) ในน้ำเสียโดยใช้ถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยน้ำว้า. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ “นวัตกรรมสร้างสรรค์ ศาสตร์ พระราชาสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน ไทยแลนด์ 40; 13 กรกฎาคม 2560 มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด 2560. p. 310-7.

39. กุลธิดา สะอาด. ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบาบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม)]: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์; 2557.

40. Feng, Li., Kaixuan, Shen., Xiaolin, Long., Jiasheng, Wen., Xiaojie, Xie., Xiangyun, Zeng.,Yanyan, Liang., Yansha, Wei., Zefeng, Lin., Wenrou, Huang., Ruida, Zhong. Preparation and Characterization of Biochars from *Eichornia crassipes* for Cadmium Removal in Aqueous Solutions. PLOS ONE. 2016;10:1-13.

41. เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2552.

42. ลลิดา แสงอาทิตย์. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8 [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2554.

43. อัญรินทร์ พิธาภักดีสถิตย์. การดูดซับธาตุอาหารจากน้ำคลองด้วยซีโอไลต์ร่วมกับถ่านกัมมันต์: กรณีศึกษาคลองชวดหมัน จังหวัดสมุทรปราการ [ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2559.

44. Buasri A, Chaiyut, N.,Tapang, K.,Jaroensin, S.,Panphrom, S. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using waterhyacinth as a low cost biosorbent. Civil and Environmental Research. 2012;2(2):17-25.

45. Kim, J. Lignocellulose based anion adsorption medium and process for marking and using same for the selective removal of phosphate and arsenic anionic contaminations from aqueous solution. Patent application publication. 2008;11:906-54.

46. Sarkar, M., Rahmana, A.K.M.L. and Bhoumik, N.C. Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. Water Resources and Industry. 2017;17:1-6.

47. Kolodynska, D.,Wnetrzak, R., Leahy, J.J., Hayes, M.H.B., Kwapinski, W. and Hubicki, Z. Kinetic and Adsorptive Characterization of Biochar in Metal Ions Removal. Chemical Engineering Journal. 2012;197(July):295-305.

48. Diola, M.B.L.D. and Orozco, C.R. Improved Removal of Copper Ions from Aqueous Solution Using NaOH-Pretreated Coco Peat. Engineering Journal Part C. 2013;4(EnvE Special):93-103.

49. Ganguly, A., Halder, S., Laha, A., Saha, N., Chatterjee, P.K. and Dey, A. Effect of Alkali Preteatment on Water Hyacinth Biomass for Production of Ethanol. Advanced Chemical Engineering Research. 2013;2(2):40-4.

50. Masto, R.E., Kumar, Sandeep., Rout, T.K., Sarkar, Pinaki., George, Joshy. and Ram, L.C. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena. 2013;111:64-71.

51. AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Virginia, USA: the Association of official Analytical Chemists Inc.; 1990.

52. Nunes CAaG, M.C. Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. Química Nova. 2011;34(3):472-6.

53. American Public Health Association, the American Water Works Association, the Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22th ed. Washington, DC: APHA-AWWA- WEF; 2012.

54. Lee CL, Hng PS, Paridah MT, Chin KL, Rashid U, Maminski M. Production of bioadsorbent from phosphoric acid pretreated palm kernel shell and coconut shell by two-stage continuous physical activation via N2 and air. Royal Society. 2018;5:1-19.

55. Kaewprasi C, Hequet E, Abidi N, Gourlot JP. Application of Methylene Blue Adsorption to Cotton Fiber Specific Surface Area Measurement: Part I. Methodology. The Journal of Cotton Science. 1998;2:164-73.

56. Feng N, Gou X. Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22(5):1224-31.

57. Mimmo T, Panzacchi P, Baratieri M, Davies CA, Tonon G. Effect of Pyrolysis Temperature on Miscanthus (*Miscanthus x Giganteus*) Biochar Physical, Chemical and Functional Properties. Biomass and Bioene. 2014;62(March):149-57.

58. Gua J, Lua AC. Kinetic study on pyrolytic process of oil-palm solid waste using two-step consecutive reaction model. Biomass and Bioenergy. 2001;20(3):223-33.

59. Dwivedi CP, Sahu JN, Mohanty CR, Mohan BR, Meikap BC. Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal. J Hazard Mater. 2008;156:596-603.

60. เสาวภา ไวยสุศรี. การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2559;26(3):475-86.

61. Zhang Z., Yan L., Yan H.Y.T., Li X. Adsorption of phosphate from aqueous solution by vegetable biochar/layered double oxides: Fast removal and mechanistic studies. Bioresource Technology. 2019;24:65-71.

62. Eberhardt L.T., Min SH. Biosorbents prepared from wood particles treated with anionic polymer and iron salt: Effect of particle size on phosphate adsorption. Bioresour Technol. 2008;99:626-30.

63. Nugroho F.L., Mulyatna L., Situmeang A.D.W. Removal of Phosphate from Synthetic Aqueous Solution by Adsorption with Dolomite from Padalarang. J Eng Technol Sci. 2014;46(4):410-9.

64. Yadi M.C., Benguella B., Benyelles N.G., Tizaoui K. Adsorption of ammonia from wastewater using low-cost bentonite/chitosan beads. Desalination and Water Treatment. 2016;57(45):21444-54.

65. Nese O., K.T. E. A kinetic study of nitrite adsorption onto sepiolite and powdered activated carbon. Desalination. 2008;223(1-3):174-9.

66. นิธิศ นามซารี, ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์, ธายุกร พระบำรุง. การดูดซับนิเกิล (Ni^{2+}) โดยแกลบและแกลบที่ปรับสภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2561;37(3):363-71.

67. Jindo K, Mizumoto H, Sawada Y, Monedero MAS, Sonoki T. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. Biogeosciences. 2014;11:6613-21.

68. Uddin M.T., Islam M.S., Abedin M.Z. Adsorption of Phenol from Aqueous Solution by Water Hyacinth Ash. Journal of Engineering and Applied Sciences 2007;2(2):11-7.

69. Hashem M.A., Hasan M., Momen M.A., Payel S., Tomal M.S.N. Water hyacinth biochar for trivalent chromium adsorption from tannery wastewater. Environmental and Sustainability Indicators. 2020;5(2020):1-6.

70. Khalil A, Sergeevich N, Borisova V. Removal of ammonium from fish farms by biochar obtained from rice straw: Isotherm and kinetic studies for ammonium adsorption. Adsorption Science & Technology. 2018;36(5-6):1294-309.

71. Pillai S.S, Mullassery D.M., Fernandez B.N., Girija N., Geetha P., Koshy M. Biosorption of Cr(VI) from aqueous solution by chemically modified potato starch: Equilibrium and kinetic studies. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2013;92:199-205.

72. อรดี ฤทธิชัย, ศศิธร มั่นเจริญ. การกำจัดจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2557;19:131-40.

73. ศุภกิจ แซ่เจียม. การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย [วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม]: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2560.

74. Nady A.F., El-Shafey O.I., Khalil L.B. Effectiveness of Alkali-Acid Treatment in Enhancement the Adsorption Capacity for Rice Straw: The Removal of Methylene Blue Dye. Hindawi Publishing Corporation. 2013;2013:1-15.

75. ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย. กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2554.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ก.1 การทดสอบความสามารถการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number; I.N.)

เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวภายในของวัสดุดูดซับที่อิงตาม AOAC, 1990 ซึ่งมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. ชั่งตัวดูดซับ 0.5-2.0 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) นำไปต้มเป็นเวลา 30 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมสารละลายไอโอดีน (Iodine Solution) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. กรองตัวดูดซับออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

3. ไทเทรตสารละลายไอโอดีนด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ ทำการบันทึกปริมาตรที่ใช้ และคำนวณหาความเข้มข้นของไอโอดีนที่เหลืออยู่

วิธีการคำนวณ

1. คำนวณความเข้มข้นของไอโอดีนที่เหลือในสารละลาย

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟตใช้ไทเทรต (นอร์มัล)

N_2 = ความเข้มข้นของไอโอดีนที่เหลือในสารละลาย (นอร์มัล)

V_1 = ปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ถูกนำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)

2. คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน

$$X/M = \frac{A-(DFxBxS)}{M}$$

เมื่อ X/M = ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

A = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน x 12693

B = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 126.93

S = ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ (มิลลิลิตร)

M = ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม

DF = ค่าการเจือจางสารละลาย

ก.2 การทดสอบความสามารถการดูดเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.)

เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับตามวิธีของ Nunes and Guerriro (2011) ซึ่งมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1.ชั่งวัสดุดูดซับมา 0.01 กรัม ใส่ลงในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 10 50 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. กรองวัสดุดูดซับออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

3. วิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูคงเหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 645 นาโนเมตร

วิธีการคำนวณ

ความจุในการดูดซับเมทิลีนบลู

$$Q_e = \frac{(C_0 - (C_e)xV}{M}$$

เมื่อ Q_e = ความจุในการดูดซับ (mg/g)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือของเมทิลีนบลูที่เวลาสมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลู (ลิตร)

M = จำนวนวัสดุดูดซับที่ใช้ (กรัม)

ก.3 ฟอสเฟต

การวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอบิก เป็นวิธีการวิเคราะห์ด้วยการเทียบสีด้วยหลักการแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate) และโพแทสเซียมแอนติโมนิลตา-เตรต (Potassium Antimonyl Tatrate) จะทำปฏิกิริยากับออร์โธฟอสเฟตในสภาวะที่เป็นกรดเกิดเป็นกรดฟอสโฟโมลิบดิค (Phosphomolybdic Acid) ซึ่งถูกรีดิวซ์โดยกรดแอสคอร์บิก ได้สีโมลิบดีนัมบลู (Molybdenum Blue) ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากปรับค่าพีเอชของน้ำ โดยหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ หากเป็นสีแดงเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มัล/ลิตร ทีละหยดจนสีแดงหายไป เติมน้ำยารวม เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที นำไปวัด

ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 880 นาโมเมตร บันทึกผล สร้างกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0-30 ไมโครกรัม ตามขั้นตอนเช่นเดียวกับตัวอย่าง นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำมาอ่านปริมาณออร์โธฟอสเฟตของตัวอย่างน้ำจากกราฟมาตรฐาน คำนวณค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำ

$$C_{\text{orthophosphate}} = \frac{\text{microgram phosphate from graph}}{\text{ml sample}}$$

เมื่อ $C_{\text{orthophosphate}}$ คือ ความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)

ก.4 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ ไนไตรท์-ไนโตรเจน

วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียด้วยเครื่อง Segment Flow Automate Analyzer โดยก่อนทำการวิเคราะห์ต้องสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) โดยเตรียม Calibration Solution จาก Ammonia Stock Solution และ Nitrite Stock Solution ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานจำนวน 5 ความเข้มข้น

สำหรับตัวอย่างน้ำที่นำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บรักษาสภาพที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำตัวอย่างมากรองด้วยหัวกรองสำเร็จรูปชนิด Cellulose Acetate ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ลงในหลอดพลาสติกขนาด 13 มิลลิลิตร พร้อมนำไปวิเคราะห์

ก.5 ค่าพีเอช

เป็นการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจนไอออน (H^+) โดยใช้เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter) โดยเริ่มจากการปรับเทียบเครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าครอบคลุมค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ ถ่ายตัวอย่างน้ำใส่บีกเกอร์ จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดของเครื่องวัดพีเอชลงในตัวอย่างน้ำ บันทึกค่าพีเอชที่อ่านได้

ก.6 ค่าการนำไฟฟ้า

วัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำ โดยเริ่มจากปรับเทียบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารละลายมาตรฐาน ก่อนนำไปวัดตัวอย่างน้ำ ถ่ายตัวอย่างน้ำใส่บีกเกอร์ จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดลงในตัวอย่างน้ำ และกวนผสมตัวอย่างน้ำประมาณ 30-60 วินาที บันทึกค่าการนำไฟฟ้าที่อ่านได้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ข1 การวิเคราะห์ค่าความสามารถดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับ

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ (mL)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ปรับสภาพทางกายภาพ	-	0.502	16.55	16.60	16.60
		1.005	15.50	15.40	15.30
		2.005	13.50	13.50	13.40
0.3 โมลาร์	1	0.501	15.80	15.80	15.85
		1.010	14.40	14.40	14.20
		2.003	10.50	11.50	11.50
	6	0.500	15.00	15.00	15.50
		1.002	13.50	13.60	13.50
		2.003	11.00	11.50	11.30
	12	0.501	15.00	15.10	14.90
		1.004	13.00	13.00	12.90
		2.001	10.30	10.40	10.25
	24	0.502	14.80	14.80	14.80
		1.003	12.80	12.80	12.85
		2.006	10.10	10.10	10.00
0.5 โมลาร์	1	0.500	15.30	15.20	15.30
		1.002	14.00	14.20	14.40
		2.001	10.20	11.00	11.00
	6	0.500	14.80	14.90	14.70
		1.006	11.80	11.85	11.90
		2.001	10.00	10.00	10.20
	12	0.501	14.20	14.40	14.50
		1.005	11.30	11.35	11.40
		2.003	9.80	9.85	9.70
	24	0.500	14.20	14.10	14.20
		1.003	11.10	11.20	11.10
		2.001	9.00	9.10	9.05

ตาราง ข1 (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ (mL)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.7 โมลาร์	1	0.504	15.00	15.10	15.00
		1.002	13.60	13.75	13.60
		2.005	9.90	9.90	9.80
	6	0.503	14.20	14.30	14.35
		1.002	10.80	10.70	10.90
		2.004	7.90	7.60	7.90
	12	0.500	14.00	14.10	14.20
		1.003	10.50	10.60	10.70
		2.000	8.50	8.30	8.25
	24	0.500	14.10	14.00	14.00
		1.003	10.80	10.90	10.70
		2.001	8.70	8.50	8.50
ถ่านชีวภาพ	-	0.500	13.60	13.50	13.60
		1.002	10.00	10.30	10.30
		2.002	7.00	7.50	7.60

ตาราง ข2 การวิเคราะห์ค่าความสามารถดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (mg/L)	
				เริ่มต้น	ที่เหลือ
ปรับสภาพทางกายภาพ	-	1	0.0102	10.05	6.80
		2	0.0107		6.85
		3	0.0108		7.21
		1	0.0104	49.58	28.65
		2	0.0107		27.83
		3	0.0103		27.98
		1	0.0109	100.46	47.25
		2	0.0108		48.41
		3	0.0108		45.60
0.3 โมลาร์	1	1	0.0104	10.05	4.52
		2	0.0107		4.56
		3	0.0107		5.04
		1	0.0109	49.58	16.49
		2	0.0107		16.34
		3	0.0107		16.50
		1	0.0103	100.46	32.34
		2	0.0105		30.95
		3	0.0106		31.96
0.3 โมลาร์	6	1	0.0104	10.05	3.49
		2	0.0103		3.50
		3	0.0107		3.38
		1	0.0103	49.58	15.19
		2	0.0107		14.89
		3	0.0105		14.85
		1	0.0105	100.46	23.24
		2	0.0108		23.77
		3	0.0107		23.70

ตาราง ข2 (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (mg/L)	
				เริ่มต้น	ที่เหลือ
0.3 โมลาร์	12	1	0.0107	10.05	3.09
		2	0.0107		3.10
		3	0.0106		3.11
		1	0.0106	49.58	10.24
		2	0.0103		10.68
		3	0.0108		9.38
		1	0.0107	100.46	18.48
		2	0.0107		18.54
		3	0.0104		17.54
0.3 โมลาร์	24	1	0.0106	10.05	3.39
		2	0.0103		3.56
		3	0.0105		3.39
		1	0.0106	49.58	6.85
		2	0.0107		7.04
		3	0.0108		7.12
		1	0.0108	100.46	15.89
		2	0.0104		15.94
		3	0.0106		15.88
0.5 โมลาร์	1	1	0.0102	10.05	3.40
		2	0.0103		3.43
		3	0.0105		3.41
		1	0.0108	49.58	6.27
		2	0.0101		6.57
		3	0.0105		6.65
		1	0.0109	100.46	22.73
		2	0.0104		26.30
		3	0.0104		23.59

ตาราง ข2 (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (mg/L)	
				เริ่มต้น	ที่เหลือ
0.5 โมลาร์	6	1	0.0108	10.05	3.10
		2	0.0103		3.20
		3	0.0102		3.09
		1	0.0103	49.58	5.67
		2	0.0101		5.59
		3	0.0106		5.41
		1	0.0101	100.46	22.73
		2	0.0102		21.65
		3	0.0103		20.80
0.5 โมลาร์	12	1	0.0104	10.05	3.06
		2	0.0107		3.06
		3	0.0102		3.06
		1	0.0104	49.58	4.88
		2	0.0107		4.85
		3	0.0104		4.69
		1	0.0102	100.46	20.25
		2	0.0101		21.22
		3	0.0104		19.87
0.5 โมลาร์	24	1	0.0102	10.05	3.05
		2	0.0102		3.06
		3	0.0103		3.06
		1	0.0108	49.58	4.37
		2	0.0104		4.34
		3	0.0104		4.30
		1	0.0105	100.46	17.46
		2	0.0108		16.57
		3	0.0108		16.92

ตาราง ข2 (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (mg/L)	
				เริ่มต้น	ที่เหลือ
0.7 โมลาร์	1	1	0.0104	10.05	3.06
		2	0.0104		3.06
		3	0.0105		3.06
		1	0.0107	49.58	5.62
		2	0.0103		5.56
		3	0.0108		5.55
		1	0.0106	100.46	16.52
		2	0.0106		16.35
		3	0.0102		20.98
0.7 โมลาร์	6	1	0.0107	10.05	2.97
		2	0.0105		2.99
		3	0.0102		2.97
		1	0.0104	49.58	5.46
		2	0.0106		5.42
		3	0.0104		5.40
		1	0.0105	100.46	15.97
		2	0.0104		15.83
		3	0.0102		15.61
0.7 โมลาร์	12	1	0.0106	10.05	2.85
		2	0.0107		2.89
		3	0.0104		2.84
		1	0.0109	49.58	4.53
		2	0.0103		4.69
		3	0.0101		4.64
		1	0.0104	100.46	14.03
		2	0.0103		13.69
		3	0.0102		14.11

ตาราง ข2 (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู (mg/L)	
				เริ่มต้น	ที่เหลือ
0.7 โมลาร์	24	1	0.0108	10.05	2.71
		2	0.0107		2.67
		3	0.0107		2.67
		1	0.0102	49.58	4.15
		2	0.0105		4.14
		3	0.0105		3.70
		1	0.0104	100.46	11.76
		2	0.0104		11.67
		3	0.0105		12.07
ถ่านชีวภาพ	-	1	0.0103	10.05	2.33
		2	0.0105		2.30
		3	0.0103		2.35
		1	0.0102	49.58	2.75
		2	0.0103		2.74
		3	0.0102		2.77
		1	0.0101	100.46	6.60
		2	0.0102		6.40
		3	0.0102		6.17

ตาราง ข3 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

วัสดุดูดซับ	ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาณธาตุอาหารหลังดูดซับ (mg/L)		
				PO_4	NH_3-N	NO_2-N
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ	1	1	0.2165	12.715	101.00	0.210
		2	0.2191	12.720	103.00	0.210
		3	0.2185	12.974	100.00	0.200
	2	1	0.2138	12.092	95.00	0.190
		2	0.2144	12.218	98.00	0.198
		3	0.2131	12.264	95.00	0.200
	6	1	0.2121	11.620	85.00	0.188
		2	0.2105	11.549	86.00	0.182
		3	0.2143	11.729	86.00	0.178
	12	1	0.2130	11.067	80.00	0.170
		2	0.2128	11.073	80.00	0.176
		3	0.2145	11.044	79.00	0.160
	24	1	0.2134	11.166	80.00	0.170
		2	0.2155	11.112	82.00	0.168
		3	0.2130	11.186	81.00	0.170
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี	1	1	0.2137	8.493	90.00	0.187
		2	0.2183	8.448	90.00	0.190
		3	0.2150	8.497	89.00	0.188
	2	1	0.2111	7.376	81.00	0.160
		2	0.2157	7.237	85.00	0.165
		3	0.2145	7.401	82.00	0.163
	6	1	0.2170	6.319	75.00	0.150
		2	0.2124	6.490	73.00	0.154
		3	0.2134	6.314	76.00	0.155
	12	1	0.2127	5.254	70.00	0.140
		2	0.2127	5.115	70.00	0.140
		3	0.2130	4.994	72.00	0.143
	24	1	0.2113	4.901	72.00	0.145
		2	0.2164	5.032	70.00	0.143
		3	0.2135	5.145	74.00	0.140

ตาราง ข3 (ต่อ)

วัสดุดูดซับ	ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาณธาตุอาหารหลังดูดซับ (mg/L)		
				PO_4	NH_3-N	NO_2-N
ถ่านชีวภาพ	1	1	0.2165	6.901	75.00	0.158
		2	0.2191	6.913	77.00	0.160
		3	0.2185	6.738	77.00	0.160
	2	1	0.2138	5.926	70.00	0.140
		2	0.2144	6.005	72.00	0.145
		3	0.2131	6.051	72.00	0.145
	6	1	0.2121	4.842	65.00	0.134
		2	0.2105	4.912	66.00	0.137
		3	0.2143	4.904	66.00	0.130
	12	1	0.2130	4.007	58.00	0.110
		2	0.2128	3.872	59.00	0.110
		3	0.2145	3.984	58.00	0.109
	24	1	0.2134	4.262	60.00	0.110
		2	0.2155	3.905	61.00	0.120
		3	0.2130	4.074	59.00	0.110

- ออร์โธฟอสเฟต เริ่มต้น 13.69 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนีย-ไนโตรเจน เริ่มต้น 120.33 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไนไตรท์-ไนโตรเจน เริ่มต้น 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง ข4 การศึกษาอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

วัสดุดูดซับ	อุณหภูมิ (° C)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาณธาตุอาหารหลังดูดซับ (mg/L)		
				PO_4	NH_3-N	NO_2-N
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ	25	1	0.2005	8.13	69.00	0.35
		2	0.2020	8.20	70.00	0.35
		3	0.2075	8.15	70.00	0.36
	30	1	0.2008	6.93	65.00	0.30
		2	0.2004	7.02	65.00	0.30
		3	0.2041	7.06	66.00	0.31
	35	1	0.2021	7.00	66.00	0.31
		2	0.2005	7.15	65.00	0.30
		3	0.2043	7.04	66.00	0.30
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี	25	1	0.2007	5.10	62.00	0.26
		2	0.2003	5.06	62.00	0.25
		3	0.2005	5.27	62.00	0.26
	30	1	0.2011	3.65	55.00	0.23
		2	0.2057	3.54	54.00	0.24
		3	0.2045	3.465	54.00	0.23
	35	1	0.2070	3.58	55.00	0.23
		2	0.2034	3.55	54.00	0.22
		3	0.2034	3.46	54.00	0.24
ถ่านชีวภาพ	25	1	0.2009	3.18	50.00	0.21
		2	0.2010	3.29	50.00	0.21
		3	0.2005	3.17	50.00	0.21
	30	1	0.2009	2.36	46.00	0.16
		2	0.2006	2.28	45.00	0.17
		3	0.2000	2.28	45.00	0.17
	35	1	0.2007	2.23	45.00	0.16
		2	0.2004	2.28	45.00	0.17
		3	0.2005	2.27	45.00	0.16

ออร์โธฟอสเฟต เริ่มต้น 6.60 มิลลิกรัมต่อลิตร, แอมโมเนีย-ไนโตรเจน เริ่มต้น 95.33 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนไตรท์-ไนโตรเจน เริ่มต้น 0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร

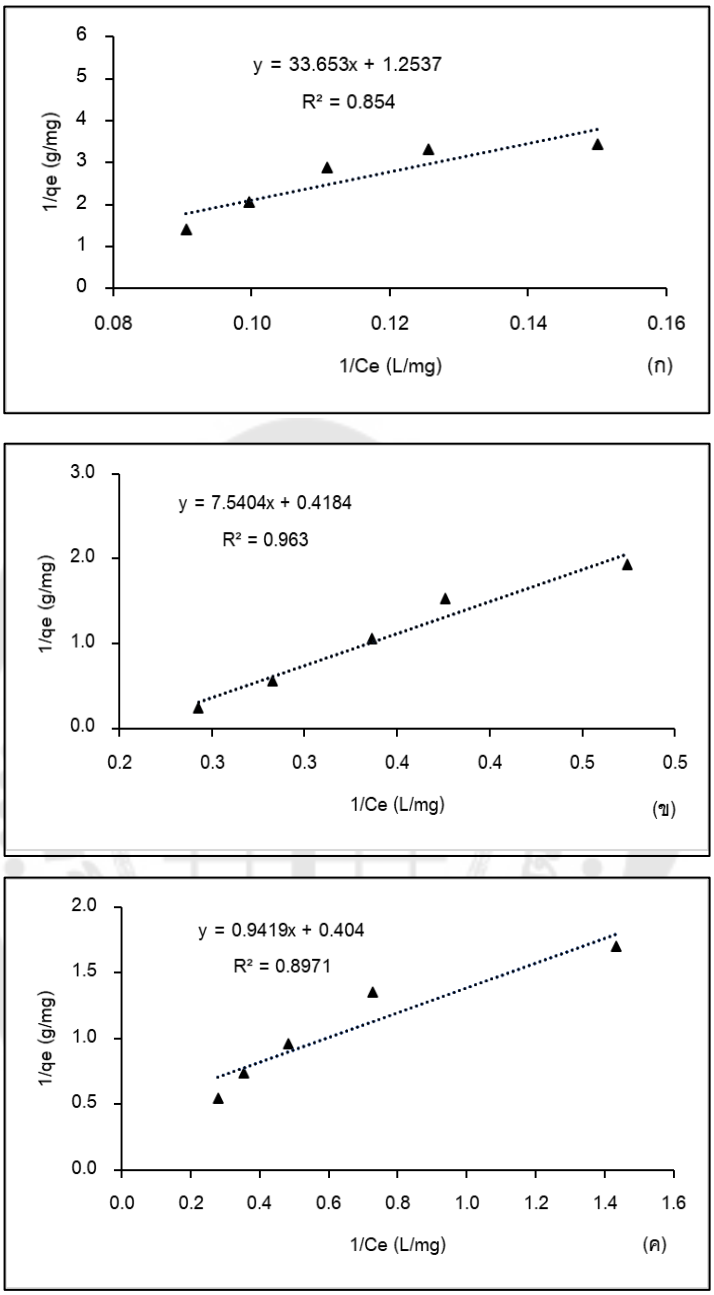
ตาราง ข5 การศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

วัสดุดูดซับ	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาณธาตุอาหารหลังดูดซับ (mg/L)		
				PO_4	NH_3-N	NO_2-N
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ	0.2	1	0.2021	10.68	60.00	0.15
		2	0.2011	10.46	60.00	0.15
		3	0.2011	10.49	62.00	0.14
	0.5	1	0.5020	10.11	57.00	0.13
		2	0.5012	10.02	55.00	0.14
		3	0.5011	9.97	58.00	0.14
	1.0	1	1.0011	8.99	48.00	0.12
		2	1.0011	9.03	48.00	0.13
		3	1.0020	9.02	47.00	0.12
	1.5	1	1.5012	8.07	40.00	0.10
		2	1.5032	7.89	42.00	0.10
		3	1.5010	7.95	40.00	0.11
	2.0	1	2.0021	6.74	37.00	0.09
		2	2.0031	6.60	37.00	0.09
		3	0.2021	6.68	38.00	0.09
ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี	0.2	1	0.2021	4.11	55.00	0.12
		2	0.2011	4.16	54.00	0.12
		3	0.2011	4.09	56.00	0.13
	0.5	1	0.5020	3.56	49.00	0.11
		2	0.5012	3.54	48.00	0.11
		3	0.5011	3.52	50.00	0.10
	1.0	1	1.0011	2.99	42.00	0.09
		2	1.0011	2.96	43.00	0.09
		3	1.0020	2.98	43.00	0.09
	1.5	1	1.5012	2.65	37.00	0.08
		2	1.5032	2.63	38.00	0.08
		3	1.5010	2.70	35.00	0.08
	2.0	1	2.0021	2.14	29.00	0.05
		2	2.0031	2.12	28.00	0.05
		3	2.0020	2.06	28.00	0.05

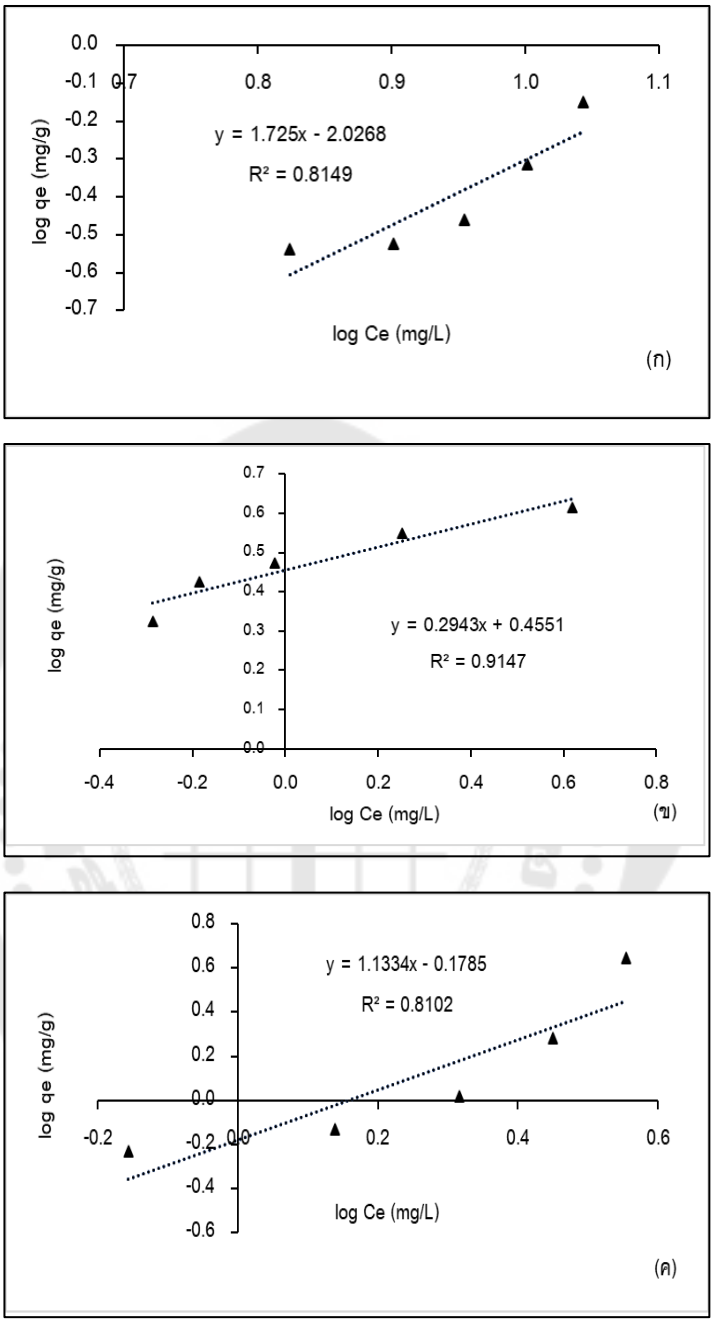
ตาราง ข5 (ต่อ)

วัสดุดูดซับ	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ซ้ำที่	น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ปริมาณธาตุอาหารหลังดูดซับ (mg/L)		
				PO_4	NH_3-N	NO_2-N
ถ่านชีวภาพ	0.2	1	0.2021	3.55	44.00	0.10
		2	0.2011	3.59	45.00	0.10
		3	0.2011	3.61	45.00	0.10
	0.5	1	0.5020	2.87	36.00	0.08
		2	0.5012	2.78	35.00	0.08
		3	0.5011	2.82	35.00	0.08
	1.0	1	1.0011	2.08	29.00	0.06
		2	1.0011	2.06	28.00	0.06
		3	1.0020	2.07	28.00	0.06
	1.5	1	1.5012	1.37	20.00	0.05
		2	1.5032	1.38	20.00	0.05
		3	1.5010	1.37	23.00	0.05
	2.0	1	2.0021	0.70	11.00	0.03
		2	2.0031	0.68	10.00	0.03
		3	2.0020	0.70	11.00	0.03

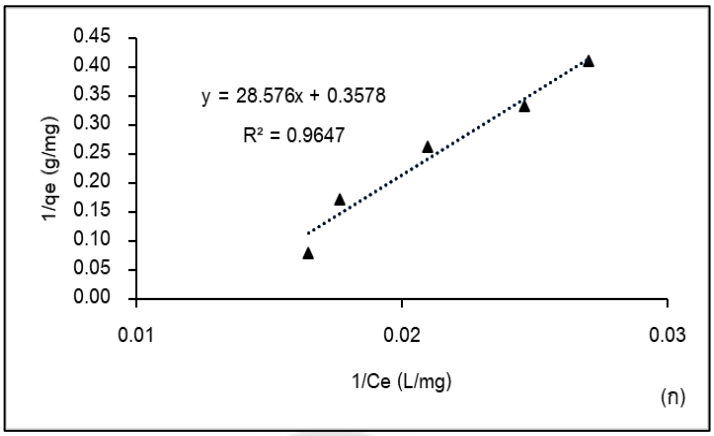
- ออร์โธฟอสเฟต เริ่มต้น 12.48 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนีย-ไนโตรเจน เริ่มต้น 85.67 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ไนไตรท์-ไนโตรเจน เริ่มต้น 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร

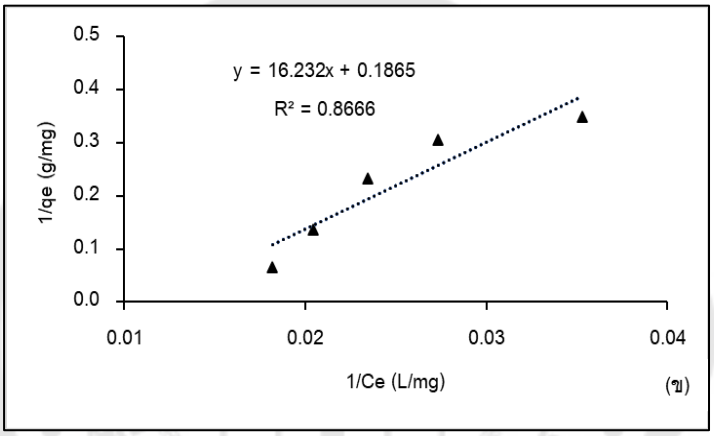


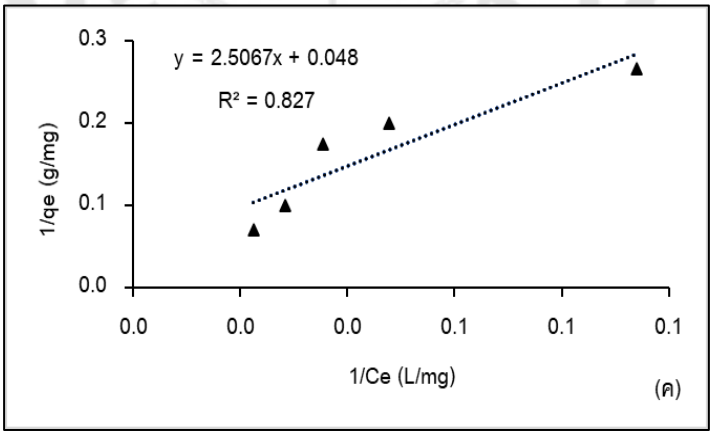
ภาพประกอบผนวก ข1 โอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ (ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ



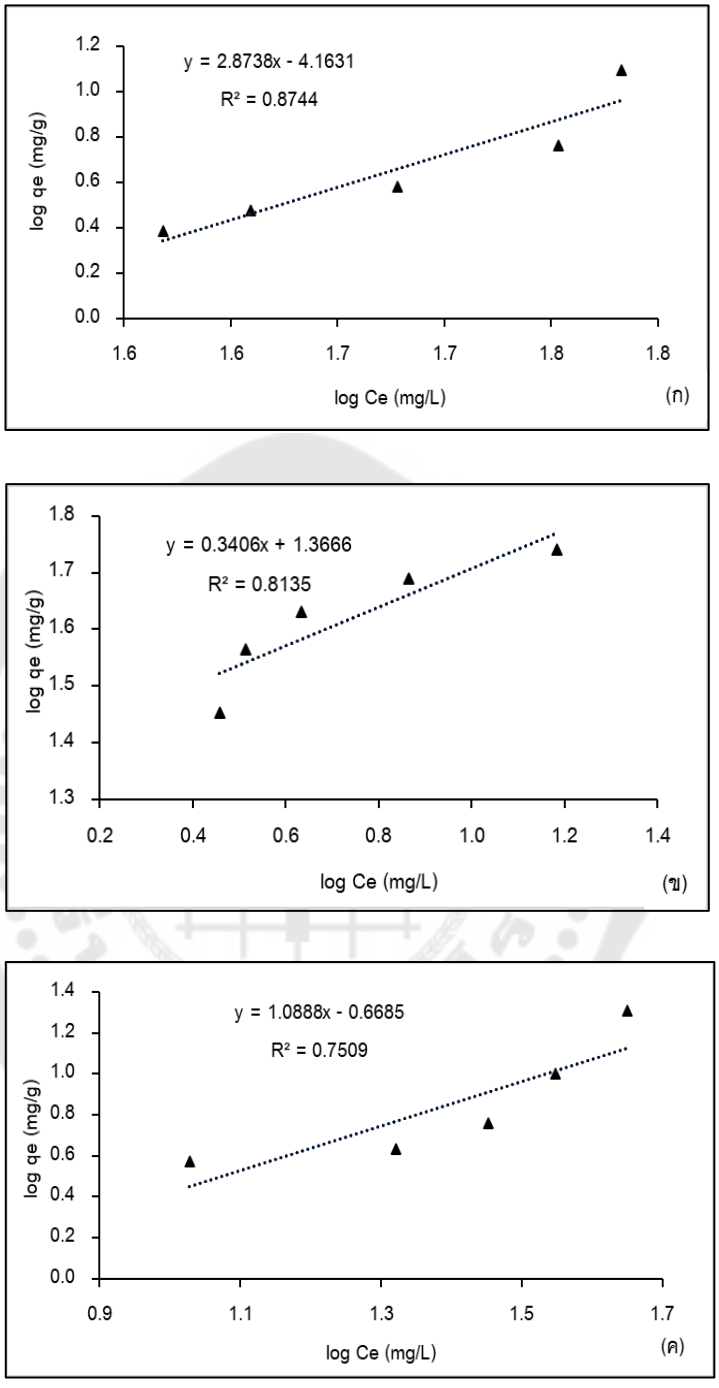
ภาพประกอบผนวก ข2 โอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของ
(ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ



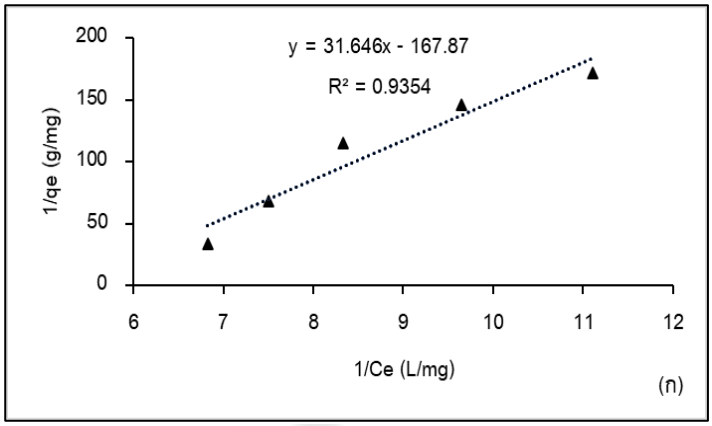


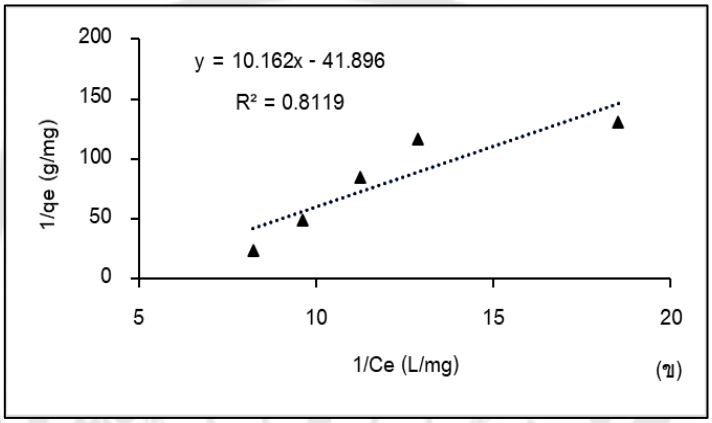


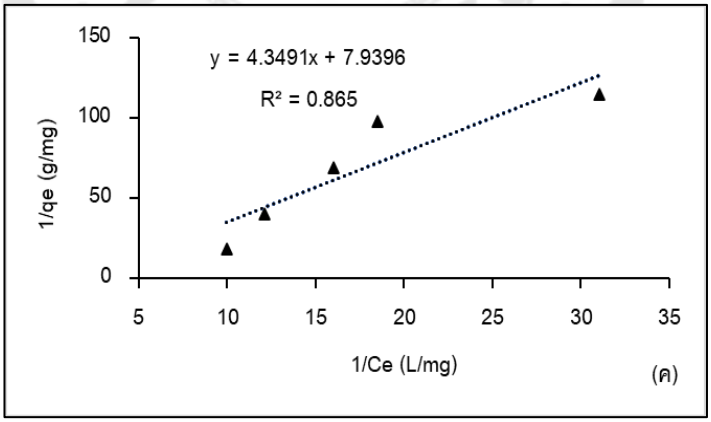
ภาพประกอบผนวก ข3 โอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ



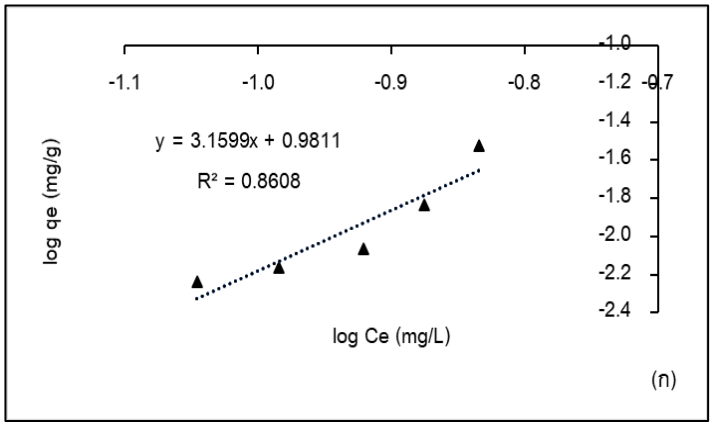
ภาพประกอบผนวก ข4 โอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ

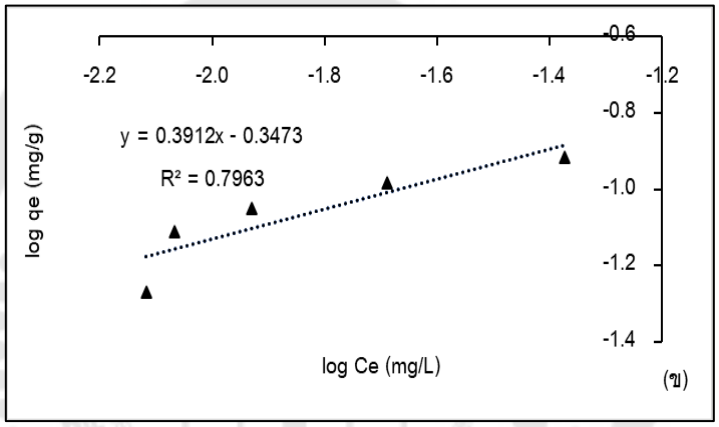


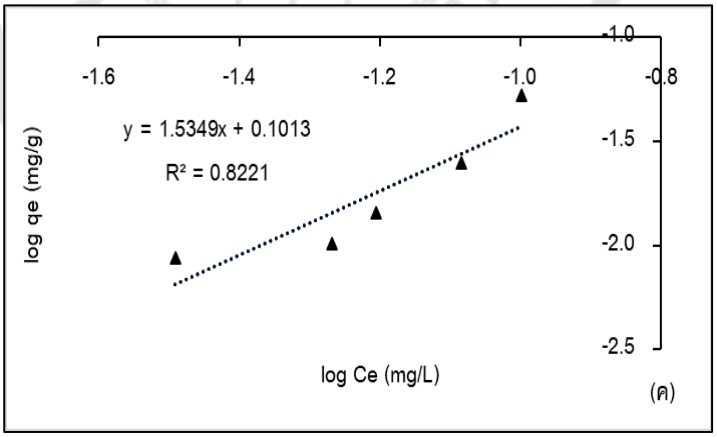




ภาพประกอบผนวก ข5 โอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ



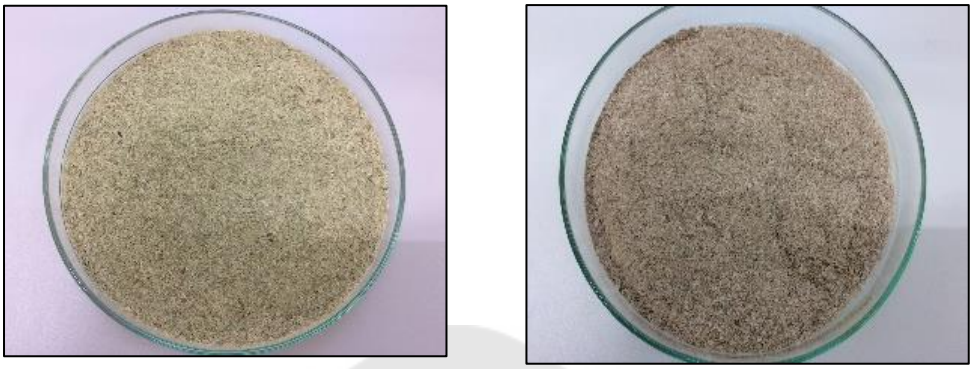




ภาพประกอบผนวก ข6 โอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับไนไตรท์-ไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ

ภาคผนวก ค

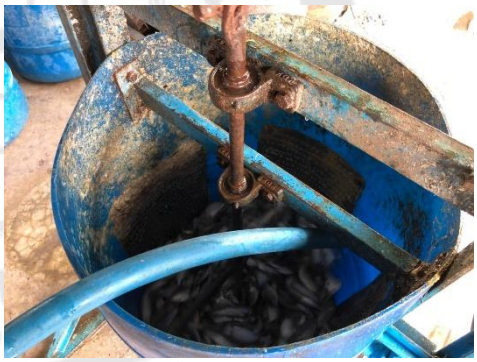
ภาพประกอบ



(ก) (ข)

(ค)

ภาพประกอบผนวก ค1 วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา
(ก) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางกายภาพ (ข) ผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี (ค) ถ่านชีวภาพ



ภาพประกอบผนวก ค2 พื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตปลาร้า
ต.โพนางดำตก อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชาญชัย คหาปนะ
วัน เดือน ปี เกิด	19 กันยายน 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดภูเก็ต
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาปฐพีศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ พ.ศ. 2563 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	289/220 หมู่ที่ 4 ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110