



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรด
เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

Preparation and Surface Modification of Pineapple Peels
for Phosphate Removal from Wastewater

ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟต
ในน้ำเสีย

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2558

ประจำปีงบประมาณ 2558

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2557 **ถึง** กันยายน พ.ศ. 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย

ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุดูดซับเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตจากเปลือกสับปะรด เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปั่นและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ถูกนำไปปรับสภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของ NaOH อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้จะมีผลต่อค่าความจุในการดูดซับไอโอดีนและค่าความจุในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุ รวมทั้งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ เมื่อนำวัสดุที่ปรับสภาพด้วยด่างมาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ พบว่าเปลือกสับปะรดดังกล่าวสามารถดูดซับเฟอร์ริกไอออนได้สูงสุด 14 มิลลิกรัมต่อกรัม การแช่เปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ นาน 10 นาที เพิ่มการดูดซับของ Fe^{3+} ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยด่างและเพิ่มการดูดซับของเฟอร์ริกไอออนด้วยการแช่ใน NH_4OH สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงก์เมียร์ โดยมีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 35.33 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อกรัม

คำสำคัญ : การกำจัดฟอสเฟต การปรับสภาพเบื้องต้น การเคลือบผิว ลิกโนเซลลูโลส

Research Title: Preparation and Surface Modification of Pineapple Peels for
Phosphate Removal from Wastewater

Researcher: Asst.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

An adsorbent for phosphate removal was prepared from pineapple peels. The pineapple peels that were blended and sieved to particle size of 200 mesh were pretreated with NaOH. Results showed that quantity of NaOH, temperature and reaction time affected the sorption capacity of iodine and methylene blue in the pretreated pineapple peels as well as the functional groups present in the peels. The alkaline pretreated samples were then soaked with 0.1 M Ferric ions. It was found that the peels adsorbed Fe^{3+} with maximum sorption capacity of 14 mg/g. Soaking of the Fe^{3+} coated pineapple peels in 1.0 M NH_4OH for 10 min. increases the Fe^{3+} fixation on the surface. The adsorption of phosphate by Fe^{3+} and NaOH modified pineapple peels was best described by Langmuir isotherm with the maximum adsorption capacity of 35.33 $\text{mg PO}_4^{3-}/\text{g}$ of adsorbent.

Keywords : Phosphate removal, pretreatment, surface coating, lignocellulose

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่จัดสรรเงินทุนในการวิจัย รวมทั้งสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความคิดสู่การปฏิบัติ ซึ่งช่วยให้เห็นผลที่เป็นรูปธรรม รวมทั้งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาตนเองในการด้านการงานวิจัย การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย.....	4
2.1.1 องค์ประกอบของเศษเหลือจากสับปะรด.....	4
2.1.2 การใช้ประโยชน์ของเศษเหลือจากสับปะรด.....	4
2.2 วัสดุลิกโนเซลลูโลส.....	6
2.2.1 การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ.....	8
2.2.2 การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุ.....	8
2.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน.....	9
2.4 ฟอสฟอรัสในน้ำ.....	10
2.4.1 แหล่งที่มาของฟอสเฟตในน้ำ.....	10
2.4.2 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อคุณภาพน้ำ.....	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
3.1 การเตรียมเปลือกสับปะรด.....	16
3.2 การศึกษาสมบัติของเปลือกสับปะรด.....	16
3.3 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	16
3.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส และระดับความเข้มข้นของ NaOH.....	16
3.3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิ.....	17
3.4 การเติมเฟอร์ริกไอออน.....	17
3.4.1 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส.....	17
3.4.2 ศึกษาผลของพีเอช.....	18
3.4.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ Fe^{3+}	18
3.4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดของ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด.....	19

3.4.5 ศึกษาการคายซับของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+}	19
3.5 การทดสอบความสามารถในการกำจัดโพสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	19
3.5.1 การเตรียมสารละลายโพสเฟต	19
3.5.2 การศึกษาผลของระยะเวลา	19
3.5.3 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ	20
บทที่ 4 ผลการวิจัย	21
4.1 การปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	21
4.1.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ และความเข้มข้นของ NaOH	21
4.1.2 ผลของอุณหภูมิ	25
4.2 การเคลือบผิวเปลือกสับปะรดด้วยเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์	26
4.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ	26
4.2.2 ผลของพีเอช	29
4.2.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น	31
4.2.4 การศึกษาการคายซับจากเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} และ เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH	34
4.2.5 สมบัติทางด้านพื้นผิวของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุง	36
4.3 การกำจัดโพสเฟตด้วยเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	37
4.3.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ	37
4.3.2 ผลของปริมาณวัสดุ	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการวิจัย	41
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก เอกสารผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย	47
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	60
ประวัติผู้วิจัย	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามส่วนต่างๆ ของสับปะรด (%วัตถุแห้ง).....	4
2.2 องค์ประกอบเยื่อใยในวัสดุกลีโนเซลลูโลส.....	6
2.3 ลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	10
2.4 การจำแนกประเภทของฟอสฟอรัส.....	11
3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันตัวอย่าง.....	16
4.1 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 30°C และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง.....	24
4.2 ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของเปลือกสับปะรดไม่ปรับปรุงและที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% (w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	25
4.3 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% (w/v) นาน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่างกัน.....	26
4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} ด้วยการแช่ใน 0.10 M $FeCl_3$ (pH=2).....	28
4.5 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่ระยะเวลาต่างกัน	29
4.6 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยแช่ใน 0.1 M $FeCl_3$ นาน 30 นาที.....	30
4.7 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที	31
4.8 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยการแช่ใน $FeCl_3$ pH 2 นาน 30 นาที.....	33
4.9 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน $FeCl_3$ (pH=2) ที่มีความเข้มข้น Fe^{3+} ต่างกัน นาน 30 นาที	34
4.10 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนรวมด้วยวิธีการของบีอีที (BET) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน	37
4.11 ไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์ที่อธิบายสมดุลการดูดซับโพลิฟอสเฟตด้วยเปลือกสับปะรด	39
4.12 ไอโซเทอร์มแบบฟรันทซ์ที่อธิบายสมดุลการดูดซับโพลิฟอสเฟตด้วยเปลือกสับปะรด	39

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพขั้นตอนการผลิตสับปะรดกระป๋อง และน้ำคั้นสับปะรดกระป๋อง	5
2.2 องค์ประกอบและการจัดเรียงโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส.....	6
2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	7
2.4 การปรับสภาพเซลลูโลสด้วย NaOH	8
2.5 การแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนบนหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl ของเซลลูโลสกับ เพอร์ริกไอออน ...	9
3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	15
4.1 (ก) ค่าความสามารถการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และ (ข) ค่าการดูดซับเมธิลีนบลู (M.B.N.) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน.....	22
4.2 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ระดับความเข้มข้นและระยะเวลาสัมผัสต่างกัน	23
4.3 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0%(w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	25
4.4 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน 0.1 M $FeCl_3$ (pH=2) เป็นเวลาต่างกัน	27
4.5 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} เมื่อแช่ใน 0.1 M $FeCl_3$ (pH=2) ด้วยเวลาต่างกัน	28
4.6 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน 0.1 M $FeCl_3$ ซึ่งมีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที.....	30
4.7 FT-IR spectrum ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที	31
4.8 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ที่มีพีเอช 2 ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน นาน 30 นาที	32
4.9 FT-IR spectrum ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} ที่มีความเข้มข้นต่างกัน นาน 30 นาที.....	33
4.10 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นที่แช่เปลือกสับปะรด เมื่อ (ก) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ Fe^{3+} (ข) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH และเส้นประแสดงเกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของเหล็กสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม	35
4.11 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดของ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรดด้วย NH_4OH	35
4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ของ (A) เปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง (B) เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH (C) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ Fe^{3+} และ (D) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติด Fe^{3+} บนพื้นผิวด้วย NH_4OH	36
4.13 ความสามารถในการกำจัดสารละลายโพสเฟตเข้มข้น 10 mg/L ของเปลือกสับปะรด ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาต่างกัน	38

4.14 ความสามารถในการกำจัดสารละลายโพลีฟอสเฟตเข้มข้น 10 mg/L ของเปลือกสับปะรดซึ่งใช้ในปริมาณต่างกัน.....	39
--	----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เปลือกสับปะรดเป็นเศษเหลือจากการแปรรูปสับปะรดทั้งจากการตัดแต่งเพื่อบริโภคสด และจากกระบวนการแปรรูปสับปะรด ซึ่งถ้าคิดจากพื้นที่ปลูกประมาณ 6 แสนไร่ จะมีเศษเปลือกสับปะรดเกิดขึ้นโดยรวมประมาณ 1.62 ล้านตันของทั้งประเทศ (สุนน, 2557) ที่ผ่านมาการใช้ประโยชน์ของเปลือกสับปะรดส่วนใหญ่คือนำไปผสมและใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง แต่การใช้ประโยชน์ในลักษณะนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำ คณะผู้วิจัยจึงต้องการเพิ่มแนวทางการใช้ประโยชน์ของเปลือกสับปะรดด้วยการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น ประกอบกับการที่เปลือกสับปะรดมีองค์ประกอบที่เป็นเยื่อใยโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลลูโลสในปริมาณสูง อีกทั้งเซลลูโลส ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเส้นใยเป็นโครงร่างหลวมๆ โดยโมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เซลลูโลสมีสมบัติเป็นวัสดุตัวกลาง (matrix) ที่สามารถจะตรึง anchor group เข้ากับโมเลกุลด้วยพันธะเคมีและให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนที่สูงได้ (พอตา, 2547) ด้วยเหตุนี้การนำเปลือกสับปะรดมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนของเซลลูโลส (cellulose-based exchanger) สำหรับกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ จึงจัดเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากวัสดุดังกล่าวให้สูงขึ้น

การเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวของชุมชน ทำให้ปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นมีมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากอัตราการเกิดน้ำเสียชุมชนโดยเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นจาก 170-288 ลิตร/คน-วัน ในปีพ.ศ. 2545 เป็น 183-406 ลิตร/คน-วัน ในปีพ.ศ. 2555 (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) การใช้ผงซักฟอกที่มีเกลือของฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบในการทำความสะอาดสิ่งของเครื่องใช้ในบ้านเรือน ทำให้น้ำเสียชุมชนมีฟอสเฟตปนเปื้อนอยู่ระหว่าง 1-90 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับลักษณะของกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยในชุมชนและกิจกรรมที่เป็นอาชีพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) เมื่อมองในระยะยาว การปล่อยน้ำเสียดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยที่ไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ที่จะส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงมีการกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของฟอสเฟตที่อนุญาตให้ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการดูดซับจัดเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและสามารถติดตั้งเพื่อใช้งานได้ในแหล่งชุมชนทั่วไป (รัตนกร และคณะ, 2554) งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยผลพลอยได้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อยของต้นสนเยรูซาเลม (Aleppo pine) (Benyoucef and Amrani, 2011) เส้นใยปาล์ม (Ismail, 2012) ขุยมะพร้าว (Krishnan and Haridas, 2008) สามารถทำให้ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด แต่มีข้อจำกัดคือความจุในการดูดซับฟอสเฟตยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการใช้ความร้อนหรือสารเคมีในการปรับปรุงโครงสร้างหรือสมบัติของวัสดุดูดซับ (รัตนกร และคณะ, 2554; Nguyen *et al.*, 2012) ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยการแทนที่ไอออนบวกของเหล็กหรืออะลูมิเนียม สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำให้กับวัสดุกล่าวได้ (Krishnan and Haridas, 2008; Kim, 2010)

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายหลักคือนำเปลือกสับปะรดมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับที่มีความจุฟอสเฟตเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน โดยนำเปลือกสับปะรดมาปรับปรุงสมบัติด้วยการปรับสภาพทางกายภาพ-เคมีและการดัดแปรพื้นผิวด้วยสารเคมีเพื่อให้ได้วัสดุดูดซับจากเปลือกสับปะรดที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ ผลลัพธ์ที่ได้คือทำให้เปลือกสับปะรดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและมีมูลค่าสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาตัวดูดซับที่มีความจุฟอสเฟตจากเปลือกสับปะรด
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในการบำบัดฟอสเฟตในน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาในการศึกษาวิจัย 1 ปี เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 และมีขอบเขตการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนใหญ่ดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมเปลือกสับปะรด

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติของเปลือกสับปะรดที่เตรียมได้

ขั้นตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรด แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ

3.1 การปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2 การดัดแปรพื้นผิวเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการเติมเฟอร์ริก-

ไอออน

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ สรุปผล จัดทำรายงานและนำเสนอผลงาน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

แนวทางในการทำวิจัยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมเปลือกสับปะรด

เปลือกสับปะรดที่ใช้เป็นเปลือกสับปะรดที่เหลือทิ้งจากการปลูกและตัดแต่งสับปะรดเพื่อบริโภคสด นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแดด และอบแห้ง แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบใบมีดตัด และนำมาร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติของเปลือกสับปะรดที่เตรียมได้

ตัวอย่างเปลือกสับปะรดจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ โดยสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope: SEM) ทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจน (คำนวณโดยใช้สมการของ BET)

ขั้นตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรด

3.1 การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปัจจัยที่ทำการศึกษาหรือตัวแปรต้นได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ

ตัวแปรตามคือ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่

- หนูฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
- ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope: SEM) (เฉพาะสภาวะที่ดีที่สุด)
- ทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู นำตัวดูดซับที่สามารถดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูได้สูงสุดไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจน (คำนวณโดยใช้สมการของ BET)

3.2 การเติมเฟอร์ริกไอออน

ปัจจัยที่ทำการศึกษาหรือตัวแปรต้น ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส พีเอชของสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

ตัวแปรตามที่ต้องทำการวิเคราะห์ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่เติมเฟอร์ริกเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ก่อนปรับปรุง โดยสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่

- วิเคราะห์หนูฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR
- วิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง SEM
- ทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู และศึกษาการคายซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุง นำตัวดูดซับที่สามารถดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูได้สูงสุดและมีการคายซับ Fe^{3+} น้อยสุดไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิค BET

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

น้ำตัวอย่างที่ใช้คือ สารละลายฟอสเฟต (PO_4^{3-}) โดยทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวดูดซับที่สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการลดภาวะมลพิษทางน้ำและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมได้
2. เป็นแนวทางในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับเพื่อบำบัดมลพิษในน้ำเสียชนิดอื่น

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย

สับปะรดจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประเทศไทย ดังจะเห็นได้จากผลผลิตที่มีมากถึง 2 ล้านตันต่อปี และมีผลผลิตต่อไร่เพิ่มขึ้นจาก 3.30 ตัน ในปี 2553 เป็น 3.80 ตัน ในปี 2557 ซึ่งในปี 2558 คาดว่าผลผลิตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากราคาที่เกษตรกรขายได้ตั้งแต่ปี 2556 เป็นต้นมาอยู่ในเกณฑ์ดี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ทั้งนี้ผลผลิตประมาณร้อยละ 10 ของผลผลิตทั้งหมดจะบริโภคภายในประเทศในรูปผลสด อีกร้อยละ 90 ของผลผลิตทั้งหมดจะเป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูป ซึ่งผลิตภัณฑ์เกือบทั้งหมดจะส่งออก ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์สับปะรดกระป๋องและน้ำคั้นสับปะรดกระป๋อง จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสัดส่วนการค้าสูงสุด คิดเป็นมูลค่าการส่งออกถึงร้อยละ 69 และร้อยละ 24 ของมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดทั้งปี ตามลำดับ (อังคณา และคณะ, 2557) สำหรับกระบวนการผลิตน้ำคั้นสับปะรดและสับปะรดกระป๋อง จะเริ่มจากเกษตรกรจำหน่ายสับปะรดที่ผ่านการตัดยอด และลำต้นให้กับโรงงานแปรรูป ซึ่งโรงงานจะทำการปอกเปลือก และคว้านแกนก่อนที่จะทำการตัดตกแต่งและบรรจุใส่กระป๋อง (รูปที่ 2.1) ดังนั้นสับปะรดหนึ่งผล ซึ่งทั่วไปจะหนักประมาณ 1.7 กิโลกรัมต่อผล เมื่อเข้าสู่กระบวนการแปรรูปในโรงงาน จะมีเศษเหลือจากการทำสับปะรดกระป๋อง (cannery waste) ประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อผล (สมบัติและคณะ, 2537 อ้างถึงในจินดา, 2547)

2.1.1 องค์ประกอบของเศษเหลือจากสับปะรด

เศษเหลือจากเปลือกสับปะรดนี้ทั่วไปเรียกว่าเปลือกหรือกากสับปะรด เนื่องจากจะพบเปลือกสับปะรด ทั้งเปลือกข้าง ส่วนหัว ส่วนล่าง เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ในเศษเหลือยังพบไส้(แกนกลาง) และเศษเนื้อเป็นส่วนประกอบในปริมาณเล็กน้อยแล้วแต่โรงงาน ซึ่งทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของเศษเหลือของสับปะรดมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

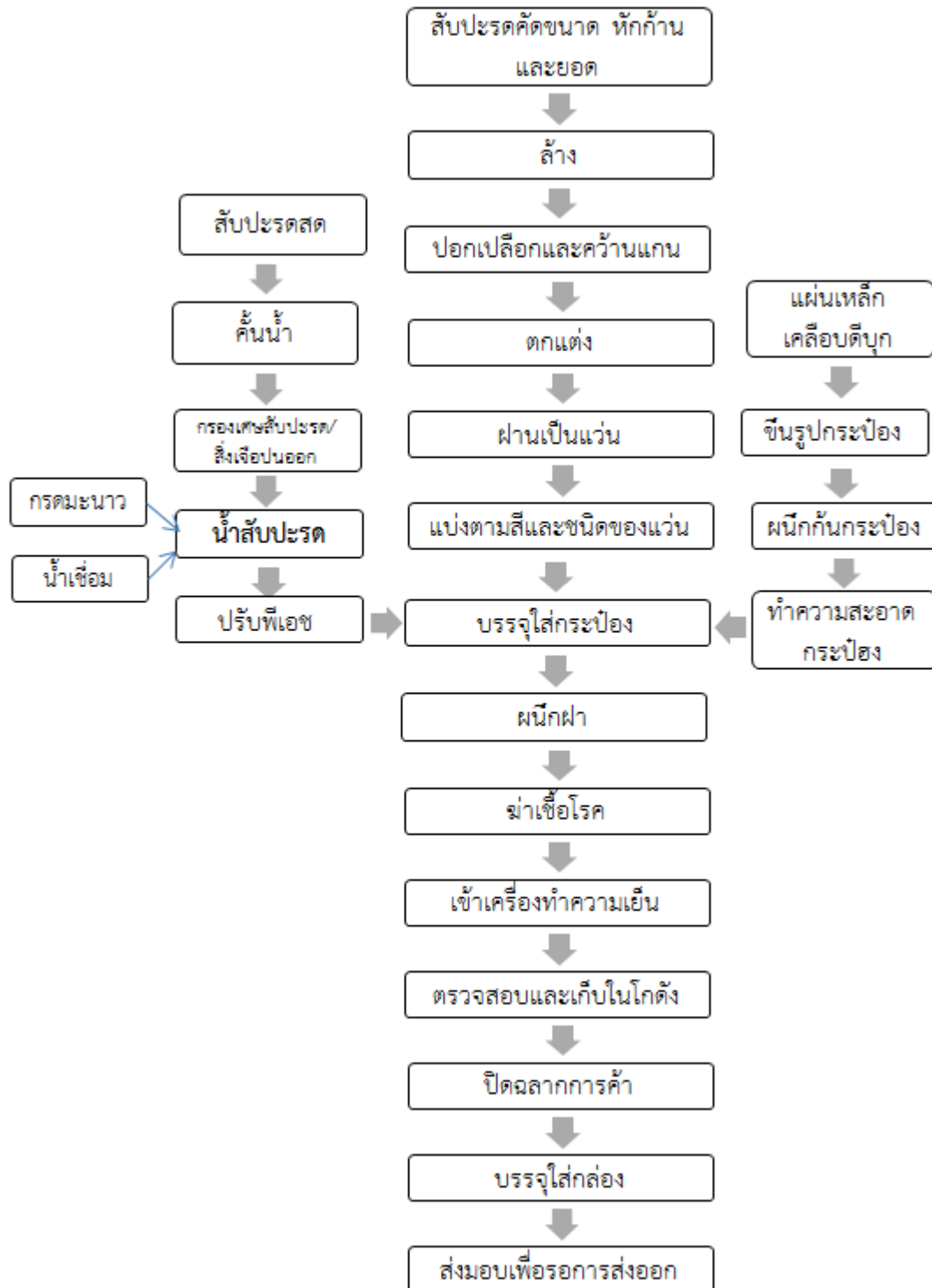
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามส่วนต่างๆ ของสับปะรด (%วัตถุแห้ง)

ส่วนประกอบ	เปลือกด้านข้าง	ส่วนหัว	ส่วนล่าง	แกน(ไส้)	เศษเนื้อ
ความชื้น	85.8	84.9	85.9	88.6	84.5
โปรตีน	4.4	4.1	5.4	3.2	3.6
ไขมัน	1.5	1.2	1.4	1.3	1.2
เยื่อใย	8.1	11.6	13.4	8.9	4.7
เถ้า	4.9	5.4	7.6	3.8	4.2

ที่มา: วรพงษ์และวิภา (2528) อ้างถึงในจินดา (2547)

2.1.2 การใช้ประโยชน์ของเศษเหลือจากสับปะรด

เศษเหลือของสับปะรดจัดเป็นวัสดุที่มีน้ำในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีเยื่อใยในปริมาณสูง (ตารางที่ 2.1) ทำให้เศษเหลือสับปะรดสามารถนำมาใช้ประโยชน์หลากหลาย ที่สำคัญคือการใช้เป็นอาหารสัตว์ ทั้งในรูปของสภาพสด หมักและแห้ง (สุนน, 2557) ด้วยเหตุที่เยื่อใยที่พบ



รูปที่ 2.1 แผนภาพขั้นตอนการผลิตสับปรดกระป๋อง และน้ำคั้นสับปรดกระป๋อง

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

(http://exim.go.th/doc/research/business/industry_profile/อุตสาหกรรมสับปรดกระป๋อง%20270447.pdf)

ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งรวมไปถึงเปลือกสับปรดนั้นมักประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในปริมาณสูง (ตารางที่ 2.2) ประกอบกับสารทั้งสองนั้น โดยเฉพาะเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์

ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของกลูโคส (Glucose) เกิดเป็นโครงสร้างแบบโครงร่างหลวมๆ ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี สามารถดัดแปรหรือตรึง anchor group เข้ากับโมเลกุลของเซลลูโลสได้ ส่งผลให้คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุสูงขึ้น ทำให้การแปรรูปเปลือกสับปะรดให้เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และนำมาพัฒนาต่อเพื่อเป็นเรซินและหรือตัวดูดซับจึงจัดเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบเยื่อใยในวัสดุลิกโนเซลลูโลส

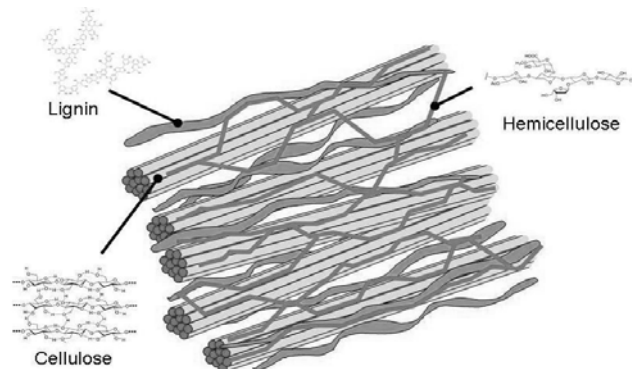
แหล่งที่มา	ส่วนประกอบของพืช	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า
วรวงษ์และวิภา (2528) ^{1/}	เปลือกสับปะรดด้านข้าง	10.4	15.0	1.7	4.9
วรวงษ์และวิภา (2528) ^{1/}	ส่วนหัว	15.2	21.7	1.9	5.4
วรวงษ์และวิภา (2528) ^{1/}	ส่วนล่าง	17.6	26.5	2.8	7.6
จินดาและคณะ (2542) ^{1/}	เปลือกสับปะรด	24.65	29.78	2.89	n/a
จินดาและคณะ (2542) ^{1/}	จุกสับปะรด	23.2	24.7	2.67	n/a
ปรัชญาและคณะ (2544) ^{1/}	ใบสับปะรด	21.15	15.19	3.10	n/a
อาทิตย์และศรเทพ (2556)	เปลือกสับปะรด	33.25	44.5	6.86	3.46
हररषषและनररषषष (มปป.) ^{2/}	ชานอ้อย	34.08	20.31	8.93	n/a
हररषषและनररषषष (มปป.) ^{2/}	เปลือกถั่วลิสง	35.13	12.96	9.04	n/a
हररषषและनररषषष (มปป.) ^{2/}	รำข้าวเจ้า	8.30	17.58	2.38	n/a
ปรัชญาและคณะ (2542) ^{1/}	หญ้าขนสด	34.96	26.02	4.15	n/a
Badal et al. (2005) ^{2/}	ฟางข้าวสาลี	48.57	27.7	8.17	n/a
Zhu et al. (2005) ^{2/}	ฟางข้าว	38.56	19.69	13.64	n/a

^{1/} อ้างถึงในจินดา (2547)

^{2/} อ้างถึงในวารารณและคณะ (2556)

2.2 วัสดุลิกโนเซลลูโลส

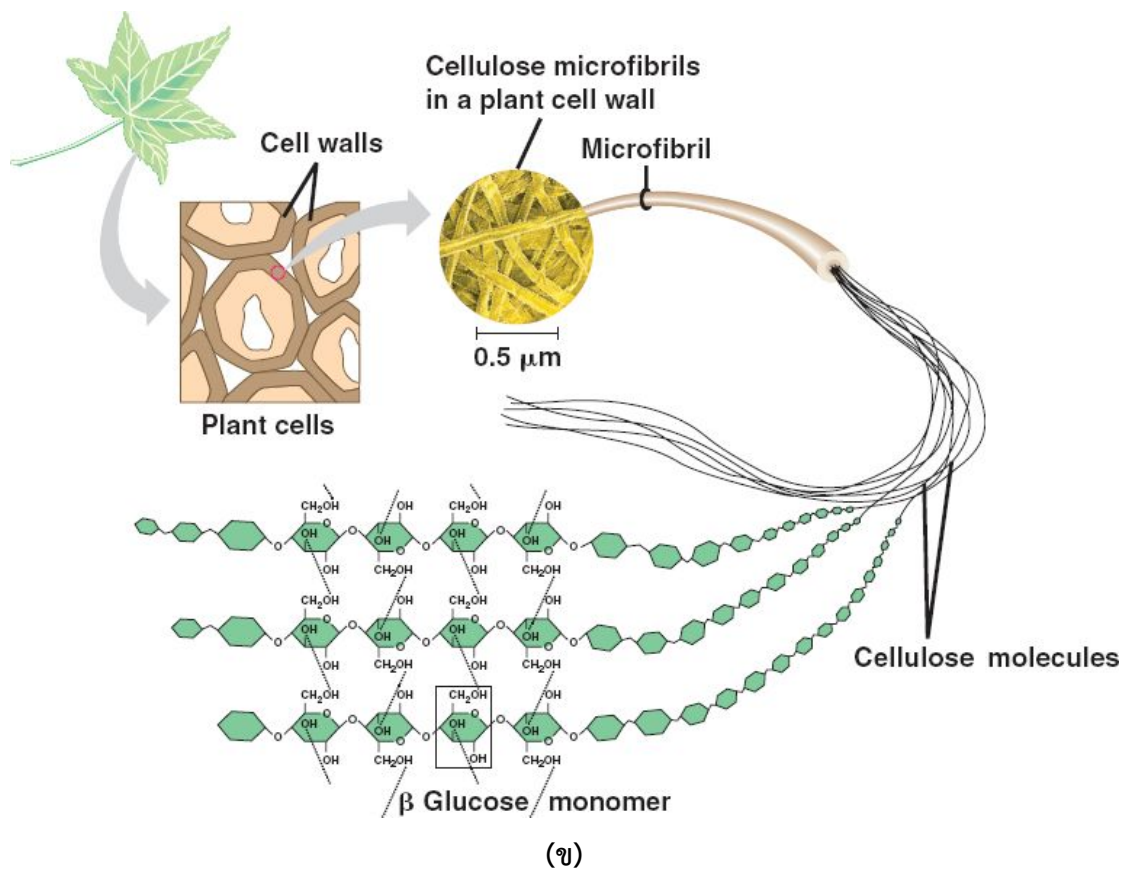
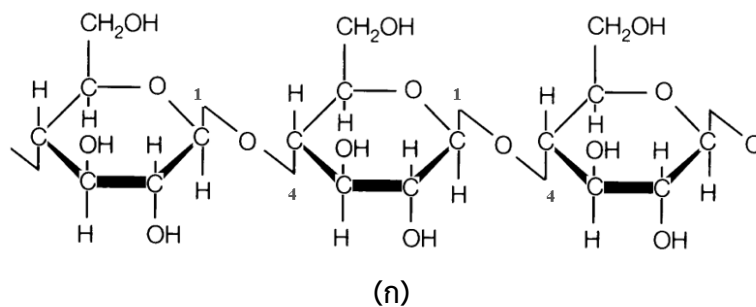
วัสดุลิกโนเซลลูโลส หมายถึงชีวมวลที่มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ โดยมีลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลเป็นดังรูปที่ 2.2 ลิกโนเซลลูโลสพบได้ทั่วไปในอาณาจักรของพืช ทั้งในต้นไม้ใหญ่-เล็กและในต้นหญ้า นอกจากนี้ยังพบได้ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวและ flagellate บางชนิด รวมไปถึงเยื่อหุ้มเซลล์ของรา ในกรณีของพืช พบว่ามีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชและส่วนประกอบต่างๆของพืช (ตารางที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบและการจัดเรียงโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: Niklas และคณะ (2013) อ้างถึงในกันตพัฒน์ (2558)

เซลลูโลส ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของวัสดุชีวโพลีเมอร์นั้น จัดเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) มีโครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งมีมวลโมเลกุลสูง เนื่องจากประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตาตังรูปที่ 2.3(ก) ในปริมาณมากถึง 10,000 หน่วยโดยประมาณ สายโซ่ของโมเลกุลกลูโคสจะมีการเรียงตัวขนานกันไปและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ในลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันที่เรียกว่า ไฟบริล (fibril) ดังรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะแข็งและมีผลึกค่อนข้างสูง ส่งผลให้ละลายในสารละลายอินทรีย์โดยทั่วไปได้ยาก คุณสมบัติเหล่านี้ส่งเสริมให้เซลลูโลสสามารถนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงและดัดแปรทางเคมี ทำให้สามารถนำอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ผ่านการปรับปรุงนี้ไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่นใช้เป็นยา เครื่องสำอาง อาหาร และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: <http://bio1151.nicerweb.com/Locked/media/ch05/cellulose.html>

แต่เนื่องจากองค์ประกอบในผนังเซลล์ของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ถูกห่อหุ้มด้วยลิกนินและเฮมิเซลลูโลส (รูปที่ 2.1) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์พืช และทำให้ผนังเซลล์ทนทานต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นก่อนการนำวัสดุลิกโนเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาปรับปรุงให้เป็นวัสดุตัวกลาง (matrix) จึงควรนำวัสดุดังกล่าวมาผ่านการกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อลด/กำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในส่วนผนังเซลล์ รวมทั้งทำให้โครงสร้างความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลง ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาให้กับวัสดุที่ผ่านการปรับปรุง

2.2.1 การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ

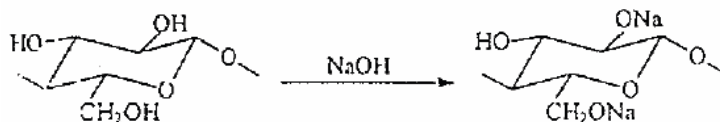
การปรับปรุงคุณภาพวัสดุในกรณีของการดูดซับนั้น ทัวไปทำไปเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความสามารถในการทำปฏิกิริยาให้กับวัสดุ ซึ่งขั้นตอนการปรับปรุงที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนหลักดังนี้คือ

1. การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical modification)

วิธีการทางกายภาพจะใช้วิธีการทางกล เช่น การบด ตัด หรือไม่ เข้าไปลดขนาดของวัตถุดิบ ซึ่งขนาดของวัสดุที่ได้จากการตัดจะมีขนาด 10-30 มิลลิเมตรและหลังจากการไม่หรือบดจะมีขนาด 0.2-2 มิลลิเมตร (วนิดา, 2553) นอกจากการลดขนาดของวัตถุดิบแล้ว วิธีการนี้ยังทำให้โครงสร้างผลึก (Crystalline) ของเส้นใยที่ประกอบด้วยไมโครไฟบริลจำนวนมากแตกออก เพิ่มพื้นที่ผิวและลดจำนวนโมโนเมอร์เฉลี่ยในโมเลกุลของโพลิเมอร์ หรือองศาของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ซึ่งจะส่งผลให้การย่อยลิกโนเซลลูโลสเกิดได้ดีขึ้น 5-25% (วนิดา, 2553)

2. การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical modification)

เป็นวิธีการใช้สารเคมี เช่น สารละลายกรด สารละลายด่าง ตัวทำละลายอินทรีย์หรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidant reagent) ในการปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุ โดยมีจุดมุ่งหมายคือกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกและเกิดการบวมตัวของเซลลูโลส ส่งผลให้วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงมีความพรุนและความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายด่างเจือจาง เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยด่างก่อนนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ จะช่วยลดปัญหาการเพิ่มขึ้นของค่า BOD, COD และ TOC ในน้ำเสียที่เกิดจากสารอินทรีย์ละลายได้จากวัสดุ (Xuang *et al.*, 2006) โดย NaOH เป็นสารเคมีที่เลือกใช้ เนื่องจากเป็นด่างแก่ สามารถกำจัดลิกนินได้ดีและมีราคาถูก (ชัชชนันท์และเฉลิม, 2555) นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการบวมตัวและลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสด้วย ทำให้หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ได้ alkaline cellulose เป็นผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 2.4 (พอตา, 2547)

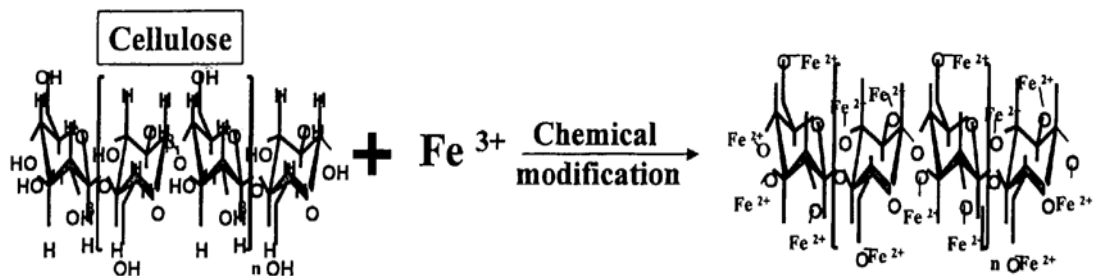


รูปที่ 2.4 การปรับสภาพเซลลูโลสด้วย NaOH

2.2.2 การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุ

การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุ (surface modification) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของวัสดุให้มีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับสารที่สนใจหรือสารที่ต้องการบำบัด ในกรณีของลิกโนเซลลูโลส โดยเฉพาะเซลลูโลส พบว่ามีหมู่ฟังก์ชัน

Hydroxyl เป็นส่วนประกอบ ทำให้วัสดุมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดี แต่เนื่องจากสารที่ต้องการบำบัดในงานวิจัยนี้คือ ฟอสเฟต (phosphates) ซึ่งเป็นไอออนลบ ด้วยเหตุนี้ การดัดแปรพื้นผิวของลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับปรุงให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ จึงเป็นขั้นตอนจำเป็นในกรณีของการใช้ประโยชน์วัสดุดังกล่าวเพื่อบำบัดไอออนลบในน้ำ งานวิจัยของ Kim (2010) พบว่าการพัฒนาตัวดูดซับทางการเกษตรโดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างหมู่ Hydroxyl ของเซลลูโลสกับไอออนบวกของโลหะบางประเภท อย่างเช่นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}), เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) สามารถเพิ่มความสามารถในการกำจัดไอออนลบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และสารหนู (AsO_4^{3-}) ในน้ำได้ ทั้งนี้ไอออนบวกของโลหะดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ ณ ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ทำให้พื้นผิวของวัสดุมีประจุบวกเพิ่มขึ้นดังตัวอย่างของการแทนที่หมู่ไฮโดรเจนอะตอมด้วยเฟอร์ริกในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนบนหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl ของเซลลูโลสกับ เพอร์รัสไอออน (Kim, 2010)

2.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน

การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนของตัวถูกดูดซับในสารละลายกับไอออนในของแข็ง โดยพอดา (2547) ได้สรุปว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

1. ไอออนในสารละลาย

- จำนวนประจุ โดยไอออนที่มีวาเลนซ์สูงกว่าจะเกิดการแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ซึ่งลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในตารางที่ 2.3
- น้ำหนักอะตอมและขนาด ซึ่งจะมีบทบาทในกรณีของไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน ไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนดีกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำกว่า เช่น $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
- ความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย โดยไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าแต่มีความเข้มข้นสูงกว่าอาจมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์สูงกว่าแต่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

2. สมบัติของวัสดุที่แลกเปลี่ยน

- ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of cross linking) โดยวัสดุที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงกว่าจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าวัสดุที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำ
- ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ถ้าส่วนโครงร่างของตัวกลาง (matrix) มีประจุลบประจำตัว Functional group จะมีประจุบวก วัสดุดังกล่าวจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity) หาก matrix มีประจุบวกประจำตัว

Functional group จะมีประจุลบ ทำให้วัสดุมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchange capacity)

ตารางที่ 2.3 ลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน
Fe ³⁺	CO ₃ ²⁻	มากที่สุด  น้อยสุด
Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	
Pb ²⁺	SO ₃ ²⁻	
Ba ²⁺	HPO ₄ ²⁻	
Sr ²⁺	CNS ⁻	
Cd ²⁺	CNO ⁻	
Zn ²⁺	NO ⁻	
Cu ²⁺	Br ⁻	
Fe ²⁺	Cl ⁻	
Mn ²⁺	CN ⁻	
Ca ²⁺	HCO ⁻	
Mg ²⁺	HSiO ⁻	
K ⁺	OH ⁻	
NH ⁺	F ⁻	
Ba ⁺		
H ⁺		
Li ⁺		

2.4 ฟอสฟอรัสในน้ำ

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติและที่พบในน้ำเสียมักพบในรูปโมเลกุลของฟอสเฟต ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.4

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ซึ่งแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้แก่ PO₄³⁻, HPO₄²⁻ และ H₂PO₄⁻ เป็นต้น

2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นอนุพันธ์ของฟอสเฟตที่ประกอบด้วยโมเลกุลของฟอสเฟตมากกว่าหนึ่งหมู่ เช่น Na₃(PO₄), Na₅P₃O₁₀ และ Na₄P₂O₇ จัดเป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทิ้งจากบ้านเรือน หรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด เมื่อสลายตัวจะกลายเป็นออร์โธฟอสเฟต

3. สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) สารฟอสฟอรัสประเภทนี้จะพบได้ในสารละลาย สารแขวนลอย หรืออินทรีย์วัตถุที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น Nucleic acid, Phospholipids และ Sugar phosphate (ยาโกลีเซ, 2553)

2.4.1 แหล่งที่มาของฟอสเฟตในน้ำ

ฟอสเฟตส่วนใหญ่จะมาจาก 2 แหล่งใหญ่ คือธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์

ตารางที่ 2.4 การจำแนกประเภทของฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัส	สูตรทางเคมี
Othophosphate	$\text{H}_2\text{PO}_4^{3-}$, HPO_4^{2-} , PO_3^{2-}
Inorganic Condensed Phosphate	
-Pyrophosphate	$\text{HP}_2\text{O}_7^{3-}$, $\text{P}_2\text{O}_4^{4-}$, $\text{CaP}_2\text{O}_7^{2-}$, $\text{MnP}_2\text{O}_7^{2-}$
- Tripolyphosphate	$\text{HP}_3\text{O}_{10}^{4-}$, $\text{P}_3\text{O}_{10}^{3-}$, $\text{CaP}_3\text{O}_{10}^{2-}$
- Trimetaphosphate	$\text{HP}_3\text{O}_9^{2-}$, $\text{P}_3\text{O}_9^{2-}$, $\text{CaP}_3\text{O}_9^{9-}$
Organic orthophosphate	
-Sugar phosphate	Glucosel phosphate, Adenosine
- Inositol phosphate	Monophosphate
- Phospholipid	Inositol Mono and Hexaphosphate
- Phosphoproteins	Glycerophosphate, Phosphatidic acids, Phosphocreatine

ที่มา: พรทวี (2557)

1. จากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศ ซึ่งถูกพัดพาและตกกลับลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินพัดพาเศษดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลของนกบางชนิด เศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายทับถมกันบริเวณแหล่งน้ำ

2. จากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่

- จากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย การผลิตสารกำจัดศัตรูพืช และการผลิตสารซักล้างและผงซักฟอก ซึ่งโรงงานเหล่านี้จะมีน้ำทิ้งที่มีฟอสเฟตในปริมาณที่สูง
- จากการเกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และ ยาปราบศัตรูพืชมากขึ้นตามลำดับ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืช รวมทั้งมูลสัตว์ จะถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ จึงเกิดการสะสมสารดังกล่าวในแหล่งน้ำมากขึ้น
- จากแหล่งชุมชน ได้แก่ บ้านเรือน อาคารพาณิชย์ โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากสถานที่ดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนของฟอสเฟตที่เกิดจากกิจกรรมการซักล้างทำความสะอาด ซึ่งกิจกรรมต่างๆเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (ธงชัย, 2539)

2.4.2 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อคุณภาพน้ำ

ฟอสฟอรัสจัดเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืช ในแหล่งน้ำทั่วไปจะมีฟอสฟอรัสในปริมาณต่ำเพื่อเป็นกลไกทางธรรมชาติในการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ รวมไปถึงแพลงก์ตอนพืช ไสยาโนแบคทีเรียและสาหร่าย ดังนั้นการระบายน้ำทิ้งที่มีสารประกอบของฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารและห่วงโซ่อาหาร แพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) แหล่งน้ำที่ได้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวมักมีสีเขียวขุ่น ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง นอกจากนี้มวลสาหร่ายบางส่วนอาจเกิดการจมตัวและย่อยสลายในน้ำ ผลที่ตามมาคือออกซิเจนในน้ำมีปริมาณลดลง จนส่งผลกระทบต่อดำรงชีพของสัตว์น้ำ (Nguyen *et al.*, 2012) คุณภาพน้ำที่เปลี่ยนไปยังสามารถก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจแก่กิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

รวมไปถึงอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตของมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่มีอยู่ในสาหร่ายบางชนิด เพื่อป้องกันปัญหาของภาวะยูโทรฟิเคชั่น องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) จึงได้กำหนดระดับความเข้มข้นสูงสุดของฟอสฟอรัสทั้งหมดในแหล่งน้ำธรรมชาติให้มีค่าต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Mullins, 2009 อ้างถึงใน Nguyen *et al.*, 2012)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chowdhury *et al.* (2011) ทำการศึกษาการดูดซับมาลาไคท์กรีนด้วยเกลบที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยนำเกลบจากโรงสีข้าวมาบด ล้างให้สะอาด และอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาแช่ใน NaOH เข้มข้น 5% ที่ความดัน 10 psi เป็นเวลา 15 นาที นำเกลบที่ผ่านการปรับสภาพมากรอง และอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์พื้นผิวของเกลบข้าวที่ผ่านการปรับสภาพเทียบกับเกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเครื่อง SEM พบว่าพื้นผิวของเกลบข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีรูพรุนมากขึ้น อีกทั้งยังมีความขรุขระ และหยาบมากกว่าเกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดมาลาไคท์กรีน พบว่าเกลบข้าวที่ผ่านการปรับสภาพสามารถกำจัดมาลาไคท์กรีนได้สูงสุด 97% โดยพื้นผิวของเกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงหลังจากใช้ดูดซับมาลาไคท์กรีน พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระลดลง และมีความเรียบขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

Nasuha and Hameed (2011) ทำการศึกษาการปรับสภาพใบชาที่คุณภาพไม่ผ่านเกณฑ์การผลิต (rejected tea) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยนำกากชามาล้างให้สะอาด ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดจนมีขนาด 250-355 ไมโครเมตรและแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.05 M เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมอล้างและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยพบว่าใบชาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นผิวคล้ายรังผึ้ง มีรอยแตก และมีรูพรุนมากกว่าใบชาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และเมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิค BET พบว่าใบชาที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก $4.2\text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $6.5\text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นจาก $0.0045\text{ cm}^3/\text{g}$ เป็น $0.0064\text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งเมื่อนำทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ากากชาที่ผ่านการปรับสภาพสามารถดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นจาก 147 mg/g เป็น 242 mg/g

Ofomaja *et al.* (2009) ทำการศึกษาการปรับสภาพพื้นผิวลูกสนด้วย NaOH เพื่อนำมาใช้ดูดซับ Cu^{2+} ในสารละลาย โดยบดลูกสนที่ผ่านการล้างและอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C 48 ชั่วโมง ให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร นำลูกสน 50g ไปแช่ใน NaOH เข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1 และ 0.15 M ปริมาตร 0.5 ลิตร แช่ไว้ 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine number: I.N.) พบว่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของลูกสนจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับสภาพ เมื่อทำการทดสอบการดูดซับ Cu^{2+} ในสารละลาย โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ และอุณหภูมิ พบว่าลูกสนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.15 M สามารถดูดซับ Cu^{2+} ได้ดีที่สุด เมื่อค่าพีเอชของสารละลาย

เท่ากับ 5 ใช้ตัวดูดซับปริมาณ 8 กรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ลูกสนสามารถดูดซับ Cu^{2+} ได้มากขึ้น

Ronda *et al.* (2013) ทำการพัฒนาตัวดูดซับจากกิ่งมะกอกเพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วในสารละลาย โดยนำกิ่งมะกอกที่บดจนมีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร มาปรับสภาพด้วย H_2SO_4 , HNO_3 หรือ NaOH เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำหนดความเข้มข้นของกิ่งมะกอกในสารละลายเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร ผลจากการปรับสภาพพบว่า กิ่งมะกอกที่ปรับสภาพด้วย H_2SO_4 และ HNO_3 มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงจาก $0.63 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $0.61 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.43 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ โดยการปรับสภาพด้วย H_2SO_4 ส่งผลให้กิ่งมะกอกมีปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นจาก $0.00154 \text{ cm}^3/\text{g}$ เป็น $0.00165 \text{ cm}^3/\text{g}$ ขณะที่การปรับสภาพด้วย HNO_3 ทำให้ปริมาตรรูพรุนรวมลดลงเหลือ $0.00098 \text{ cm}^3/\text{g}$ ส่วนการปรับสภาพด้วย NaOH ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมของกิ่งมะกอกเพิ่มขึ้นเป็น $3.53 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.00583 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ และเมื่อทำการทดสอบการดูดซับตะกั่วในสารละลายพบว่า กิ่งมะกอกที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH สามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่ากิ่งมะกอกที่ผ่านการปรับสภาพด้วย H_2SO_4 และ HNO_3 โดยสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 16.04 mg/g

Yoshita *et al.* (2009) ทำการศึกษาการปรับสภาพใบชาที่ใช้แล้ว (spent tea leaf) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับสารละลายตะกั่ว โดยนำใบชามาล้างให้สะอาด และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำใบชามาปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ขนาดของใบชา ความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาปรับสภาพ พบว่าใบชาที่มีขนาด 0.28 ถึง 0.45 มิลลิเมตร ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 0.3 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายมากที่สุด รองลงมาคือใบชาที่มีขนาด 0.28 ถึง 0.45 มิลลิเมตร ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 0.5 M เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 15.7 mg/g และ 13.4 mg/g ตามลำดับ

Kim (2010) ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ใบกระดาศ เมล็ดข้าวโพด และเส้นใยฝ้าย รวมทั้งศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเหล่านี้ด้วยไอออนของเหล็ก เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตและสารหนูในน้ำด้วยการแช่วัสดุใน FeCl_3 เข้มข้น 0.01 ถึง 0.3 M เป็นเวลา 0.1 ถึง 2 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้ง และนำมาแช่ในสารละลาย NH_4OH เข้มข้น 0.1 M ถึง 0.8 M เป็นเวลา 0.1 ถึง 10 นาที จากนั้นนำมาล้าง และอบให้แห้ง เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตและสารหนู พบว่าวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถกำจัดสารหนูให้มีความเข้มข้นลดลงจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

Krishnan and Haridas (2008) ทำการศึกษาการดัดแปรพื้นผิวขุยมะพร้าวด้วยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำ โดยนำขุยมะพร้าวมาล้างให้สะอาด ตากแดดให้แห้ง และนำขุยมะพร้าวมา 50 กรัม แช่ในสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทไนเนสไฮเดรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการเติม $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก เติม $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตรา 15 มิลลิลิตรต่อนาที จนครบ 30 นาที และในขั้นตอนที่ 2 จะทำการเติมสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ปริมาตร 300 มิลลิลิตร แช่ไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาล้าง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลจากการพิสูจน์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าขุยมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงมีพีคที่ $2\theta = 44.70$ และ 9.71 แสดงให้เห็นถึง Fe^{3+} ที่อยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลส และเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ พบว่าขุยมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวสามารถดูดซับฟอสเฟตได้สูงสุด 70.92 mg/g

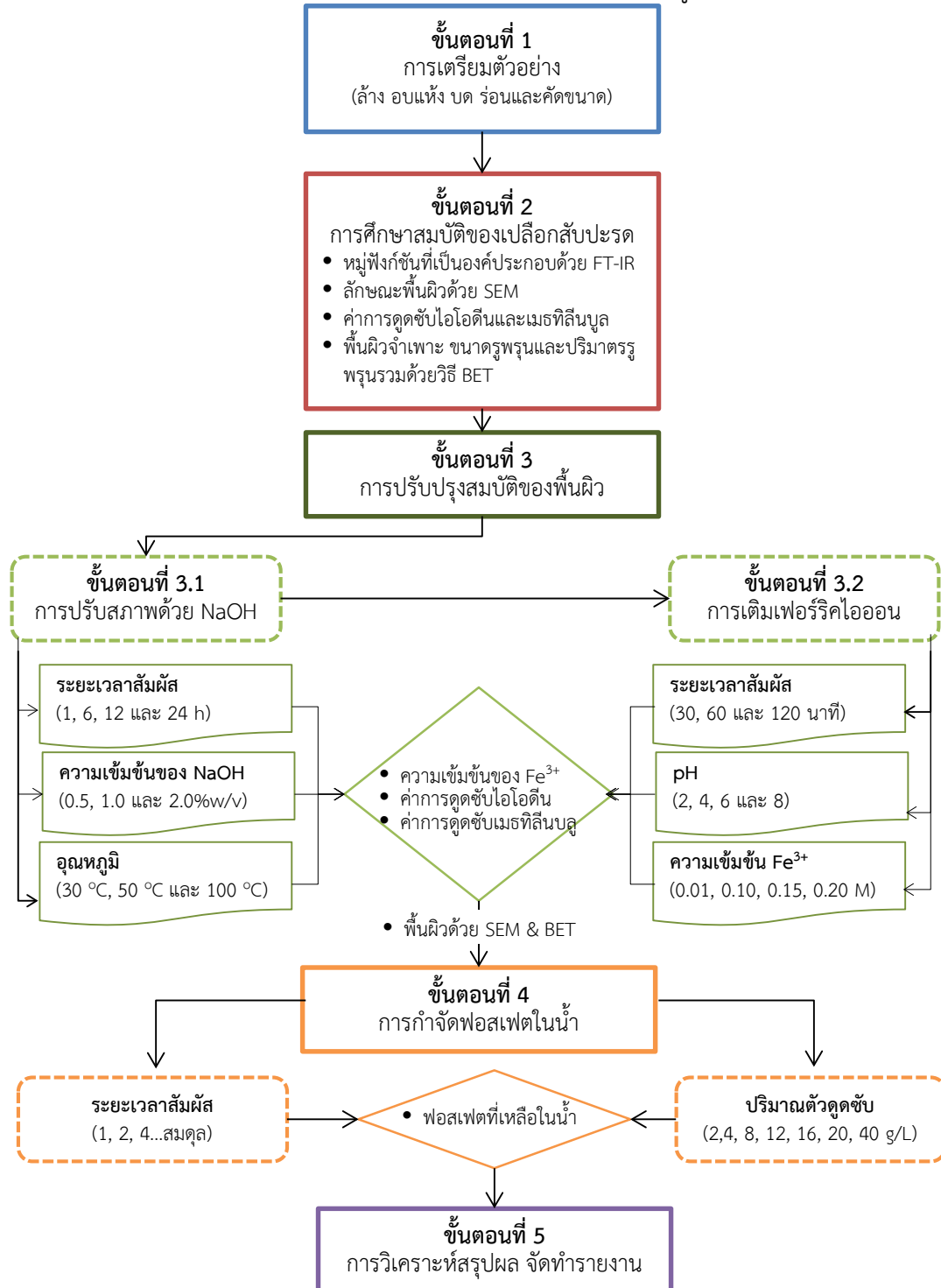
Liu *et al.* (2010) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระเจี๊ยบและนำมาดัดแปรพื้นผิวโดยใช้เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เพื่อใช้ดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในสารละลาย แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยนำเปลือกกระเจี๊ยบ มาแช่ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 45% เป็นเวลา 1 คืน และเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 2 ทำการดัดแปรพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระเจี๊ยบด้วยการแช่ในสารละลาย $FeCl_3$ เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิค BET พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 782 เป็น $920 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.498 เป็น $0.618 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 2.55 เป็น 2.69 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่า Fe^{3+} ไม่มีผลต่อการลดช่องว่างของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในสารละลาย โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลาย และระยะเวลาสัมผัส พบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 2 ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.5 กรัมต่อลิตร จะมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด และตัวดูดซับสามารถดูดซับ Cr^{6+} ได้มากที่สุด เมื่อสารละลายมีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยระบบจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 40 นาที

Zhao *et al.* (2009) ทำการสังเคราะห์เส้นใยเซลลูโลสที่เติมเฟอร์ริกจากใยฝ้ายเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารหนูในน้ำ โดยนำใยฝ้ายมาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.6 โมลาร์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรกับใยฝ้ายที่ไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรมีรูพรุนขนาดใหญ่ (5-30 ไมโครเมตร) มีพื้นผิวที่ขรุขระ และมีพื้นที่ผิว $2.23 \text{ m}^2/\text{g}$ ผลการดูดซับสารหนูในน้ำ พบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลเมื่อใช้เวลา 15 นาที และเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรสามารถกำจัดสารหนูได้ 98%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษามีวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมเปลือกสับปะรด

เปลือกสับปะรดที่ใช้เป็นเปลือกสับปะรดที่เหลือทิ้งจากการลอกและตัดแต่งสับปะรดเพื่อบริโภคสด นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแดด และอบแห้ง แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบใบมีดตัด และนำมาบดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช

3.2 การศึกษาสมบัติของเปลือกสับปะรด

เปลือกสับปะรดที่เตรียมได้ในข้อ 3.1 จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันตัวอย่าง

สมบัติของน้ำมัน	วิธีการวิเคราะห์
- หมู่ฟังก์ชัน (functional group)	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
- ลักษณะพื้นผิว	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope: SEM)
- ค่าคงที่การดูดซับไอโอดีน	ทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีน
- ค่าคงที่การดูดซับเมทิลีนบลู	ทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู
- พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนรวม [†]	วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจน (คำนวณโดยใช้สมการของ BET)

[†]วิเคราะห์บางตัวอย่าง

3.3 การปรับปรุงสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส และปริมาณ NaOH

1. แช่วเปลือกสับปะรดที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กำหนดอัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:10

2. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการกรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วย NaOH เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง สมบัติที่วิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

4. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการแช่ NaOH ที่ศึกษาจาก 1 ชั่วโมง เป็น 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็น 1.0% และ 2.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ

3.3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

1. แห่เปลือกสับปะรดที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3.1 ที่อุณหภูมิ 30°C ใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:10
2. ทำการกรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง สมบัติที่วิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1
4. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 30°C เป็น 50°C และ 100°C ตามลำดับ

3.4 การเติมเฟอร์ริกไอออน

3.4.1 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. แห่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ที่มีความเข้มข้นของ Fe^{3+} เท่ากับ 0.10 โมลาร์ และปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ทำการแช่เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อสารละลาย FeCl_3 เป็น 1:3
2. กรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ทำการวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS และคำนวณค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} ตามสมการที่ 3.1

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M} \quad (3.1)$$

- เมื่อ q = ค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรด (mg/g)
 C_0 = ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ก่อนใช้แช่เปลือกสับปะรด (mg/L)
 C_e = ความเข้มข้นของ Fe^{3+} หลังใช้แช่เปลือกสับปะรด (mg/L)
 V = ปริมาตรของสารละลาย FeCl_3 (L)
 M = จำนวนเปลือกสับปะรด (g)

3. นำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการกรองไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH สมบัติที่วิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1
5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำแต่เปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสจาก 30 นาที เป็น 60 และ 120 นาที
6. ทำชุดควบคุม ซึ่งเป็นสารละลายสารละลาย FeCl_3 ที่ไม่มีเปลือกสับปะรด โดยทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5
7. ทำแบลนด์ โดยแช่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 30, 60 และ 120 นาที และวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นที่ผ่านการแช่เปลือกสับปะรดด้วยเทคนิค AAS

3.4.2 ศึกษาผลของพีเอช

1. แห่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ที่มีความเข้มข้นของ Fe^{3+} เท่ากับ 0.10 โมลาร์ และปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1 กำหนดอัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อ FeCl_3 เป็น 1:3
2. กรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ทำการวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS และคำนวณค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} ตามสมการที่ 3.1
3. นำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการกรองไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH สมบัติที่วิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1
5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำแต่ปรับค่าพีเอชของสารละลาย FeCl_3 จาก 2 เป็น 4, 6 และ 8 ตามลำดับด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.10 โมลาร์
6. ทำการทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ โดยใช้ชุดควบคุม ซึ่งเป็นสารละลาย FeCl_3 ที่ปรับพีเอชให้มีค่าแตกต่างกันตามที่กำหนด
7. ทำแบบลงค์ โดยแห่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1 และวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นที่ผ่านการแห่เปลือกสับปะรดด้วยเทคนิค AAS

3.4.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ Fe^{3+}

1. แห่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ที่มีความเข้มข้นของ Fe^{3+} เท่ากับ 0.10 โมลาร์ ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าที่เหมาะสมตามข้อ 3.4.2 ใช้เวลาในการแห่ที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อ FeCl_3 เป็น 1:3
2. กรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ทำการวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS และคำนวณค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} ตามสมการที่ 3.1
3. นำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการกรองไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH สมบัติที่วิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1
5. ทำการทดลองข้อ 1-4 ซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของ Fe^{3+} จาก 0.10 โมลาร์ เป็น 0.01, 0.15 และ 0.20 โมลาร์ ตามลำดับ
6. ทำการทดลองข้อ 1-5 โดยใช้ชุดควบคุม ซึ่งเป็นสารละลาย FeCl_3 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

3.4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดของ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด

1. ชั่งเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} ในสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.3 จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย NH_4OH เข้มข้น 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเปลือกสับปะรดต่อสารละลายเป็น 1:3

2. กรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 และนำไปอบที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย $NaOH$ และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH เปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} (ไม่แช่ใน NH_4OH) เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย $NaOH$ และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง โดยสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวมด้วยเทคนิค Nitrogen Adsorption ที่อุณหภูมิ 77 K (คำนวณด้วยสมการของ BET) และวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.4.5 ศึกษาการคายซับของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+}

1. ชั่งเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงด้วย $NaOH$ และ Fe^{3+} ในสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.3 มา 2 กรัม แช่ในน้ำกลั่นซึ่งปรับพีเอชให้มีความเท่ากับ 7 ด้วย H_2SO_4 หรือ $NaOH$ เข้มข้นอย่างละ 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นาน 24 ชั่วโมง

2. กรองเปลือกสับปะรดผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และทำการวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นด้วยเทคนิค AAS

3. ทำการทดลองข้อ 1-2 ซ้ำ แต่เปลี่ยนวัสดุที่ใช้จาก เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงด้วย $NaOH$ และ Fe^{3+} เป็น เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย $NaOH$ และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH ที่ได้จากข้อ 3.4.4

3.5 การทดสอบความสามารถในการกำจัดโพสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

3.5.1 การเตรียมสารละลายโพสเฟต

ชั่งผงซักฟอกปริมาณ 1.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้มีโพสเฟตเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.2 การศึกษาผลของระยะเวลา

1. ชั่งเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย $NaOH$ และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH จากข้อ 3.4.4 เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย $NaOH$ ในสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงจากข้อ 3.1 มาอย่างละ 0.1 กรัม เติมสารละลายโพสเฟตลงไป 50 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. ทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณโพสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยวิธี Acid hydrolyzed ร่วมกับเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (APHA, 1995)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง

6. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่เปลือกสับปะรดลงในสารละลายโพสเฟต

3.5.3 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ

1. ชั่งเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH จากข้อ 3.4.4 เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในสถานะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงจากข้อ 3.1 มาอย่างละ 0.1 กรัม เติมสารละลายโพสเฟตลงไป 50 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.2

3. ทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณโพสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยวิธี Acid hydrolyzed ร่วมกับเทคนิคการทำให้เกิดสีด้วย Ascorbic acid (APHA, 1995)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับจาก 0.1 กรัม เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม

6. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่เปลือกสับปะรดลงในสารละลายโพสเฟต

7. ทำการศึกษารูปแบบการดูดซับโพสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH เทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

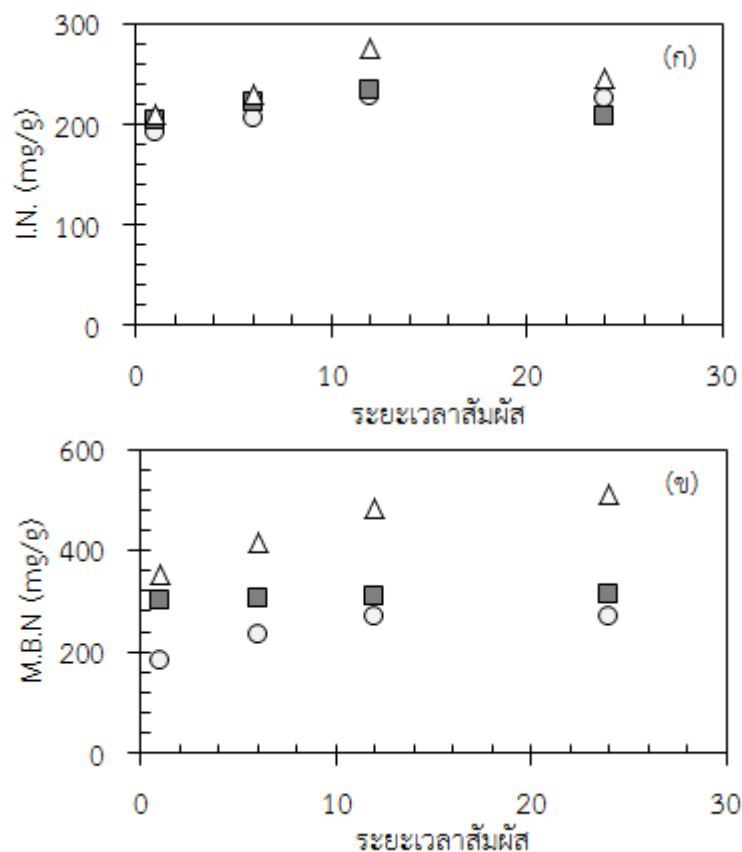
4.1 การปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิที่ใช้ สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

4.1.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของ NaOH

การปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วย NaOH ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับ ดังจะเห็นได้จากค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number, I.N.) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงกลไกการดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ผิวภายในของเปลือกสับปะรด (Ofomaja *et al.*, 2009) มีค่าเพิ่มขึ้นในเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ทุกระดับความเข้มข้น (รูปที่ 4.1ก) เทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงหรือเปลือกสับปะรดก่อนปรับสภาพ ซึ่งมีค่า I.N. เท่ากับ 80.38 ± 0.19 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับผลของค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงกลไกการดูดซับที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของเมทิลีนบลูกับไอออนของไฮโดรเจนที่หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของเซลลูโลส (Kaewprasit และคณะ, 1998) พบว่ามีค่าสูงกว่าในเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในทุกระดับความเข้มข้น (รูปที่ 4.1ข) เทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง ซึ่งมีค่า M.B.N. เท่ากับ 125.29 ± 6.40 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้พบว่าค่าการดูดซับทั้งสองค่า โดยเฉพาะค่า M.B.N. มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ซึ่งค่า I.N. และ M.B.N. ที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีสาเหตุมาจาก NaOH มีผลต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดยเฉพาะส่วนที่เป็นเยื่อใย โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH จะทำให้องค์ประกอบจำพวกเซลลูโลสเกิดการบวมตัวมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มการย่อยสลายลิกนินบนพื้นผิวของวัสดุ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ofomaja *et al.* (2009) ที่แสดงให้เห็นว่าเปลือกของลูกสนมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ปรับสภาพ ทั้งนี้ค่า I.N. และค่า M.B.N. ของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพมีค่าสูงสุดคือ 253.86 ± 3.37 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 512.00 ± 6.58 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

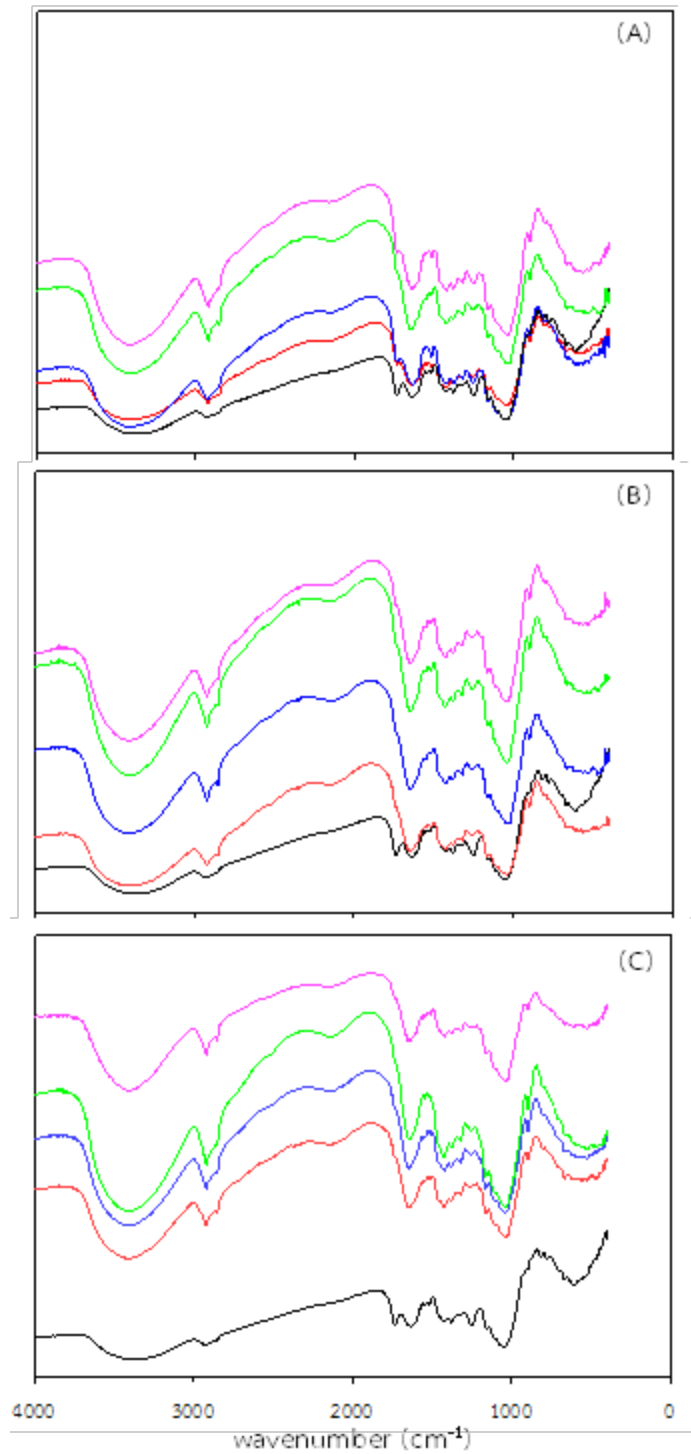
ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในทุกระดับความเข้มข้นที่ศึกษา และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงด้วยเครื่อง FT-IR ที่เลขคลื่นในช่วง 400 ถึง 4000cm^{-1} ได้ผลดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 โดยพบว่า FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ไม่ผ่านการปรับปรุงปรากฏพีกที่มีลักษณะกว้างที่เลขคลื่น 3375.96 cm^{-1} ซึ่งระบุได้ว่าเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) จาก O-H stretching และในช่วงเลขคลื่นประมาณ 2917.45 cm^{-1} ปรากฏพีกที่มีความเข้มต่ำ ซึ่งเป็นแถบการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนจาก C-H stretching ของกลุ่ม Methyl, Methylene และ Methoxy ที่พีกในช่วงเลขคลื่น $1400\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏการยืดของกลุ่ม CH aromatic และที่เลขคลื่นประมาณ $1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏแถบการสั่นจาก C-O stretching ของกลุ่ม Alcohol ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเพคตินที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกสับปะรด นอกจากนี้ยังปรากฏ



รูปที่ 4.1 (ก) ค่าความสามารถการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และ (ข) ค่าการดูดซับเมธิลีนบลู (M.B.N.) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว เมื่อ ○ คือ 0.5% NaOH , ■ คือ 1.0% NaOH และ △ คือ 2.0% NaOH

Carboxylate (COO^-) และหมู่ Ester carbonyl ที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและพิกที่เลขคลื่น 1637.19cm^{-1} และ 1738.76cm^{-1} คาดว่าเป็นพิกของ $\text{C}=\text{O}$ stretching จากพันธิกนิน (Ningchuan *et al.*, 2010) เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH พบว่าจะปรากฏแถบการดูดกลืน (absorption band) ที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้เคียงกับที่ปรากฏในเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง แต่มีความเข้มของพิกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ในการปรับสภาพ และระยะเวลาในการปรับสภาพที่นานขึ้น โดยเฉพาะหมู่ hydroxyl ที่เลขคลื่นระหว่าง $3200\text{--}3500\text{cm}^{-1}$ และหมู่ Carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) จากกลุ่ม Carboxylate ที่เลขคลื่นระหว่าง $1600\text{--}1650\text{cm}^{-1}$ รวมถึงมีการลดลงของ $\text{C}=\text{O}$ stretching ของหมู่ Ester carbonyl ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของความเข้มพิกที่เลขคลื่น 1738.76cm^{-1} ทั้งนี้เพราะหมู่ Ester จะถูกไฮโดรไลซ์ด้วย NaOH เกิดเป็นกลุ่ม Carboxylate และ Alcohol (Wan Ngah and Hanafiah, 2008) ดังสมการที่ 4.1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Souza *et al.* (2012) ที่พบว่า FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH จะปรากฏพิกของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่เลขคลื่น 3429cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลที่เลขคลื่น 1629cm^{-1} ในลักษณะที่มีความเข้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ใช้สำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนัก





รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ระดับความเข้มข้นและระยะเวลาสัมผัสต่างกัน เมื่อ (A) คือ NaOH 0.5% (w/v) (B) คือ NaOH 1.0% (w/v) และ (C) คือ NaOH 2.0% (w/v) โดยเส้น (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดปรับสภาพ 1 ชั่วโมง (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดปรับสภาพ 6 ชั่วโมง (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดปรับสภาพ 12 ชั่วโมง และ(—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพ 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 30 °C และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	เปลือกสับปะรด												
	ไม่ปรับปรุง	ปรับสภาพด้วย NaOH 0.5% (w/v)				ปรับสภาพด้วย NaOH 1.0% (w/v)				ปรับสภาพด้วย NaOH 2.0% (w/v)			
		1 ชม.	6 ชม.	12 ชม.	24 ชม.	1 ชม.	6 ชม.	12 ชม.	24 ชม.	1 ชม.	6 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
3200-3500 (O-H ของ Alcohol)	b, m	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s	b, s
2800-3000 (C-H aliphatic)	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w
1730-1750 (C=O ของ Ester)	w	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw
1600-1650 (C=O ของ Carboxylate)	sh, w	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m	sh, m
1400-1450 (C-H aromatic)	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w
1200-1250 (C-O ของ Carbonyl)	w	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw	vw
1000-1150 (C-O ของ Alcohol)	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s

หมายเหตุ: b = board, m = medium, s = strong, sh = sharp, w = weak, vw= very weak

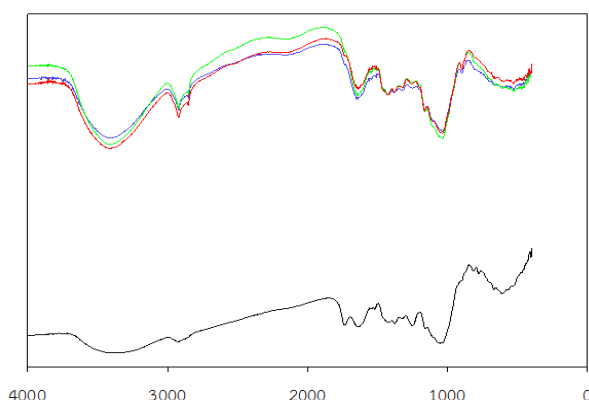
4.1.2 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลต่อพื้นที่ผิวของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ดังจะเห็นได้จากค่า I.N. และค่า M.B.N. ของเปลือกสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 253.86 ± 3.37 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 275.09 ± 0.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และจาก 512.00 ± 6.58 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 548.51 ± 7.55 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับสภาพจาก 30°C เป็น 50°C (ตารางที่ 4.2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiao and Xiong (2014) ที่พบว่าพื้นที่ผิวของเยื่อกระดาษที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการปรับสภาพเป็น 100°C ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลูของเปลือกสับปะรดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากองค์ประกอบบางส่วนของลิกโนเซลลูโลสในเปลือกสับปะรดถูกทำลายที่อุณหภูมิสูง (Xu *et al.*, 2010)

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูของเปลือกสับปะรดไม่ปรับปรุงและที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% (w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตัวดูดซับ	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
เปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง	80.38 ± 0.19	125.29 ± 6.40
เปลือกสับปะรดปรับสภาพที่อุณหภูมิ		
- 30°C	253.86 ± 3.37	512.00 ± 6.58
- 50°C	275.09 ± 0.94	548.51 ± 7.55
- 100°C	245.19 ± 1.68	523.58 ± 4.72

การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพจาก 30°C เป็น 50°C และ 100°C ไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นได้จากลักษณะ FT-IR สเปกตรัม ที่ปรากฏแถบการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ตลอดจนความเข้มของสเปกตรัมมีลักษณะใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0%(w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกันโดยเส้น (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพที่ 30°C (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพที่ 50°C และ(—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพที่ 100°C

ตารางที่ 4.3 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% (w/v) นาน 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่างกัน

เลขคลื่น (cm^{-1})	เปลือกสับปะรด			
	ไม่ปรับปรุง	ปรับสภาพด้วย NaOH 2.0% (w/v) นาน 24 ชั่วโมง		
		30°C	50°C	100°C
3200-3500 (O-H ของ Alcohol)	b, m	b, s	b, s	b, s
2800-3000 (C-H aliphatic)	w	w	w	w
1730-1750 (C=O ของ Ester)	w	vw	vw	vw
1600-1650 (C=O ของ Carboxylate)	sh, w	sh, m	sh, m	sh, m
1400-1450 (C-H aromatic)	w	w	w	w
1200-1250 (C-O ของ Carbonyl)	w	vw	vw	vw
1000-1150 (C-O ของ Alcohol)	sh, s	sh, s	sh, s	sh, s

หมายเหตุ: b = board, m = medium, s = strong, sh = sharp, w = weak, vw = very weak

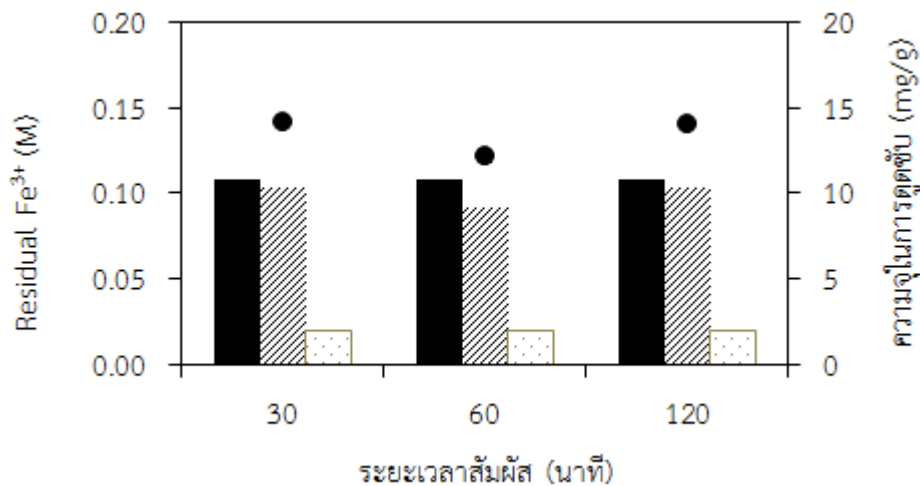
ด้วยเหตุที่การปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% (w/v) นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ให้เปลือกสับปะรดมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากที่สุด อีกทั้งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนัก จึงเลือกสภาวะดังกล่าวเพื่อใช้ในการปรับสภาพเปลือกสับปะรด ก่อนนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยไอออนบวกต่อไป

4.2 การเคลือบผิวเปลือกสับปะรดด้วยเฟอร์ริกไอออน

ในขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบไอออนบวกของเหล็ก ซึ่งในการศึกษาคือเฟอร์ริกไอออน บนพื้นผิวของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เพื่อให้วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงมีความสามารถในการดูดซับไอออนลบของฟอสเฟต โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสค่าพีเอช (pH) และความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)

4.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

เมื่อทำการแช่เปลือกสับปะรดซึ่งผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 เป็นเวลา 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ พบว่าปริมาณ Fe^{3+} ในสารละลายที่ใช้แช่เปลือกสับปะรด มีความเข้มข้นลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.11 โมลาร์ เหลือ 0.018 โมลาร์ (รูปที่ 4.4) เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชุดควบคุม ซึ่งเป็นตัวอย่างสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับชุดทดลองแต่ไม่เติมเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพ พบว่าปริมาณ Fe^{3+} มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} ก่อนนำไปแช่เปลือกสับปะรด (รูปที่ 4.4) ประกอบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในแบบลค์ ซึ่งเป็นการแช่ตัวอย่างเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพในน้ำกลั่น พบว่าน้ำกลั่นที่ผ่านการแช่เปลือกสับปะรดมีปริมาณ Fe^{3+} มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่องมือวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า Fe^{3+} ที่



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน 0.1 M $FeCl_3$ (pH=2) เป็นเวลาต่างกัน โดย (■) คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} (▨) คือความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในชุดควบคุม (░) คือความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในชุดทดลอง และ (●) คือความจุในการดูดซับ Fe^{3+}

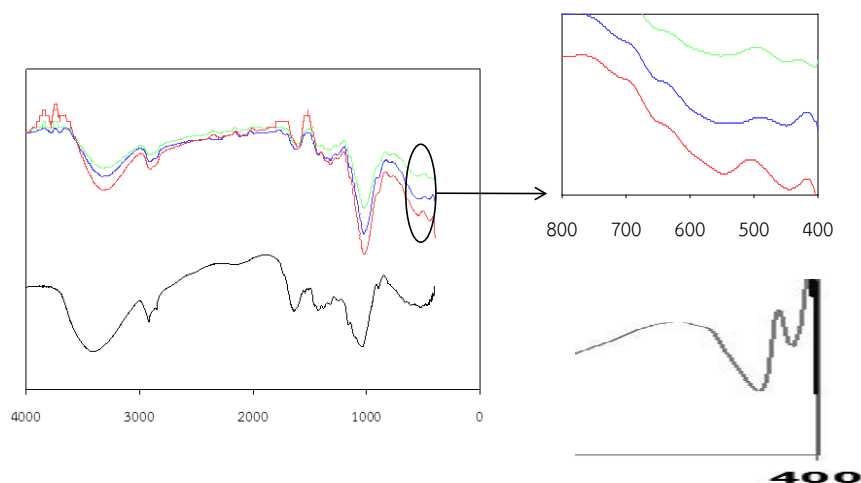
ลดลงในชุดทดลองเกิดจากการยึดเกาะบนพื้นผิวเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี ANOVA-Duncan พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์ริกไอออนหลังการแช่เปลือกสับปะรดในทุกช่วงเวลามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อนำไปคำนวณค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} พบว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH สามารถดูดซับ Fe^{3+} ได้ระหว่าง 12.13-14.11 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการแช่เปลือกสับปะรดในสารละลาย $FeCl_3$ จาก 30 นาที เป็น 60 และ 120 นาที ไม่ส่งผลให้ความจุในการดูดซับ Fe^{3+} บนผิวของเปลือกสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการกระบวนการดูดซับได้เข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงเวลาที่ศึกษา ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ไม่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} (ตารางที่ 4.4) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดซึ่งผ่านการปรับสภาพด้วย 2% NaOH นาน 24 ชั่วโมง เพียงอย่างเดียว โดยเปลือกสับปะรดดังกล่าวมีค่า I.N. และ M.B.N เท่ากับ 275.09 ± 0.94 และ 548.51 ± 7.55 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การลดลงของค่า I.N. และ M.B.N. บอถึงการลดลงของพื้นที่ผิวการดูดซับของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} ซึ่งสามารถใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนการยึดเกาะของ Fe^{3+} บนพื้นผิวของเปลือกสับปะรดในผลการทดลองก่อนหน้า โดยงานวิจัยของ Zhao *et al.* (2009) ซึ่งศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายด้วย Fe^{3+} ได้พบผลในลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเส้นใยฝ้ายมีพื้นที่ผิวลดลงจาก 8.20 ตารางเมตรต่อกรัมก่อนการดัดแปร เหลือ 2.23 ตารางเมตรต่อกรัม ภายหลังการดัดแปร เมื่อทำการทดสอบทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการแช่ $FeCl_3$ ต่อค่า I.N. และ M.B.N. พบว่าระยะเวลาการแช่เปลือกสับปะรดใน $FeCl_3$ ตั้งแต่ 30-120 นาที ไม่มีผลต่อค่าการดูดซับทั้งสองค่าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือก
สับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} ด้วยการแช่ใน 0.10 M FeCl_3 (pH=2)

ระยะเวลาแช่ใน FeCl_3	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- 30 นาที	80.21±0.33	95.06±4.34
- 60 นาที	74.26±1.44	105.16±6.11
- 120 นาที	76.71±0.80	92.92±2.82

อย่างไรก็ตามพบว่า การแช่เปลือกสับปะรดซึ่งปรับสภาพด้วย NaOH ใน FeCl_3 ได้ทำให้ลักษณะและความเข้มของ FT-IR สเปกตรัมเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดซึ่งปรับสภาพด้วย NaOH เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5) ทั้งนี้สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH จะมีความเข้มลดลงหลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วย Fe^{3+} โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเลขคลื่นประมาณ $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ และ $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะหนักกับหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว (Ning-chuan and Xue-yi, 2012) รวมถึงมีการปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ 444.82 cm^{-1} และ 550.83 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการยืดของพันธะ Fe-O ดังงานวิจัยของ Garcia *et al.* (2013) ที่พบแถบ FT-IR สเปกตรัมของ Fe-O ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 445 และ 540 cm^{-1} อย่างไรก็ตามพบว่าการแปรผันระยะเวลาในการแช่ FeCl_3 ตั้งแต่ 30 ถึง 120 นาที ไม่ส่งผลให้สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกช่วงระยะเวลาการแช่ FeCl_3 นาน 30 นาที เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} เมื่อแช่ใน 0.1 M FeCl_3 (pH=2) ด้วยเวลาต่างกัน โดยเส้น (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} นาน 30 นาที (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} นาน 60 นาที และ (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} นาน 120 นาที

ตารางที่ 4.5 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่ระยะเวลาต่างกัน

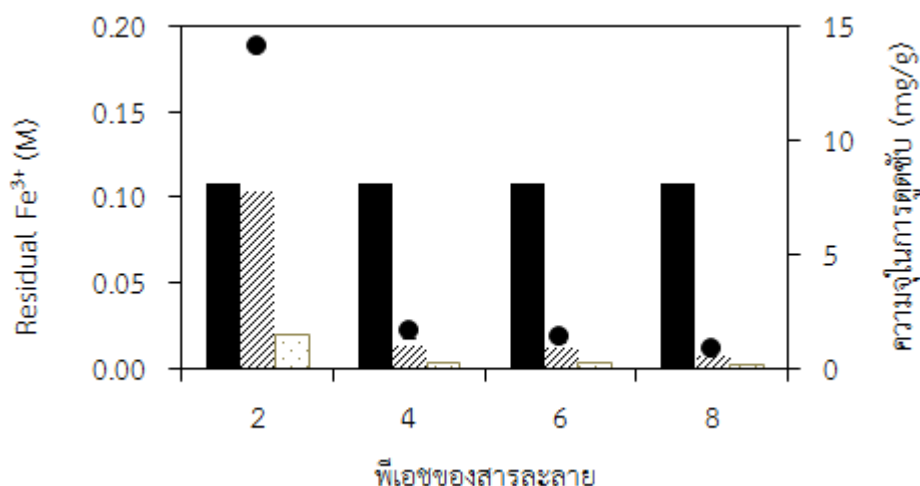
เลขคลื่น (cm^{-1})	เปลือกสับปะรด			
	ปรับสภาพ	เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 M		
		30 นาที	60 นาที	120 นาที
3200-3500 (O-H ของ Alcohol)	b, m	b, w	b, w	b, w
2800-3000 (C-H aliphatic)	w	w	w	w
1600-1650 (C=O ของ Carboxylate)	sh, m	sh,w	sh,w	sh,w
1000-1150 (C-O ของ Alcohol)	sh, s	sh, m	sh, m	sh, m
550 (Fe-O)	-	w	w	w
440-450 (Fe-O)	-	w	w	w

หมายเหตุ: b = board, m = medium, s = strong, sh = sharp, w = weak, vw= very weak

4.2.2 ผลของพีเอช

พีเอชของสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับของ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยในชุดทดลอง ซึ่งก็คือสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่แช่เปลือกสับปะรด พบว่าปริมาณ Fe^{3+} ในสารละลายมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของพีเอช เมื่อพิจารณาปริมาณ Fe^{3+} ในชุดควบคุม ซึ่งเป็นสารละลาย FeCl_3 ที่ปรับพีเอชให้มีค่าต่างกันแต่ไม่เติมเปลือกสับปะรด พบว่าสารละลายมีปริมาณเฟอร์ริกไอออนลดลงเช่นเดียวกันกับชุดทดลอง แต่ปริมาณการลดลงเกิดขึ้นในระดับที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการลดลงของเฟอร์ริกไอออนบางส่วนในชุดทดลอง อาจเกิดจากการตกตะกอนของ Fe^{3+} ในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และอีกส่วนจะลดลงเนื่องจากการเกาะยึดกับพื้นผิวของเปลือกสับปะรด สอดคล้องกับผลการคำนวณค่าความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดซึ่งผ่านการปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} ที่พบว่าสามารถดูดซับ Fe^{3+} ได้น้อยลงจาก 14.11 ± 0.114 มิลลิกรัมต่อกรัมที่พีเอชเท่ากับ 2 เหลือ 1.59 ± 0.019 , 1.36 ± 0.025 และ 0.82 ± 0.025 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 4, 6 และ 8 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ahalya *et al.* (2006) ที่พบว่า Fe^{3+} จะเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชตั้งแต่ 4 เป็นต้นไป ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ Fe^{3+} ด้วยเกลบมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N.) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยปรับพีเอชของสารละลาย FeCl_3 ที่ใช้ในการทดลองให้มีค่าเป็น 2, 4, 6 และ 8 พบว่า ค่า I.N. และ M.B.N มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชของสารละลาย (ตารางที่ 4.6) แสดงให้เห็นว่าเปลือกสับปะรดมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับค่าความจุการดูดซับของ Fe^{3+} ที่น้อยลงตามค่าพีเอช โดยผลการทดสอบทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชในการแช่ FeCl_3 ต่อค่า I.N. และ M.B.N. พบว่าการแช่เปลือกสับปะรดในสารละลาย FeCl_3 ที่มีค่าพีเอชต่างกันมีผลต่อค่าทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

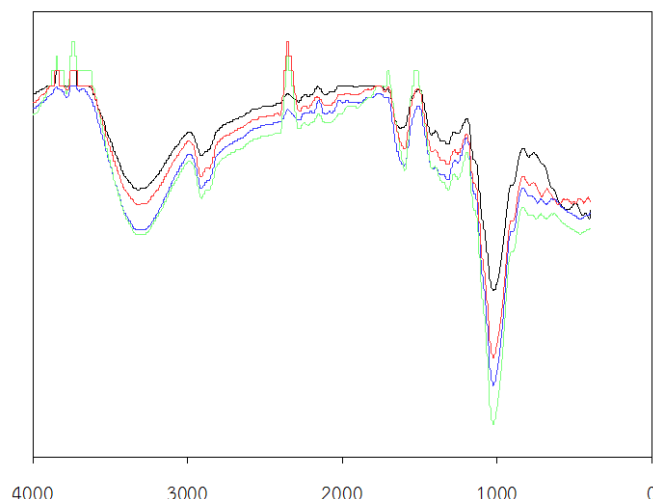


รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือก
 สับปะรดที่แช่ใน 0.1 M FeCl_3 ซึ่งมีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที โดย (■) คือความเข้มข้น
 เริ่มต้นของ Fe^{3+} (▨) คือความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชุดควบคุม (░) คือความเข้มข้นของ
 Fe^{3+} หลังแช่เปลือกสับปะรด และ (●) คือความจุในการดูดซับ Fe^{3+}

ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือก
 สับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยแช่ใน 0.1 M FeCl_3 นาน 30 นาที

พีเอชของสารละลาย FeCl_3	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
2	80.21±0.33	95.06±4.34
4	233.72±1.97	415.74±2.08
6	239.86±2.35	439.42±1.75
8	256.17±5.39	503.12±2.46

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวด้วย Fe^{3+} ที่พีเอช 2-8 (รูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.7) พบว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 3200-3500 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของ O-H stretching และพีคที่ประมาณ 1022.36 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของ C-O stretching มีลักษณะเข้มข้นตามค่าพีเอชของสารละลาย FeCl_3 ที่ใช้ในการแช่เปลือกสับปะรด นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของความเข้มพีคที่ประมาณ 444.82 และ 550.83 cm^{-1} ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะของ Fe-O บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าพีเอชในสารละลายจาก 2 เป็น 4, 6 และ 8 มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{3+} กับเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนของ Fe^{3+} เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นดังที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงเลือกใช้การปรับปรุงเปลือกสับปะรดที่พีเอชของสารละลาย FeCl_3 เท่ากับ 2 เป็นค่าที่ใช้ในการศึกษาต่อไป เนื่องจากทำให้เปลือกสับปะรดเกิดการดูดซับ Fe^{3+} ได้มากที่สุดรวมถึงมี FT-IR สเปกตรัมที่ตำแหน่งการสร้างพันธะของ Fe-O บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด



รูปที่ 4.7 FT-IR spectrum ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที โดยเส้น (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6 และ (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีค่าพีเอช 8

ตารางที่ 4.7 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน นาน 30 นาที

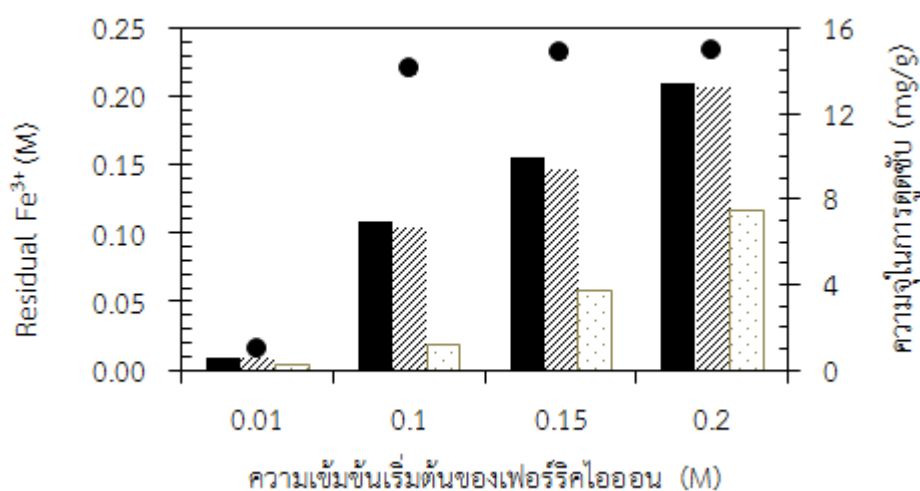
เลขคลื่น (cm^{-1})	เปลือกสับปะรด			
	เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เข้มข้น 0.10 M ที่มีค่าพีเอช			
	2	4	6	8
3200-3500 (O-H ของ Alcohol)	b, w	b, w	b, m	b, m
2800-3000 (C-H aliphatic)	w	w	w	w
1600-1650 (C=O ของ Carboxylate)	sh, w	sh, w	sh, w	sh, w
1000-1150 (C-O ของ Alcohol)	sh, m	sh, s	sh, s	sh, s
550 (Fe-O)	w	vw	vw	vw
440-450 (Fe-O)	w	vw	vw	vw

หมายเหตุ: b = board, m = medium, s = strong, sh = sharp, w = weak, vw = very weak

4.2.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ผลการแช่เปลือกสับปะรดซึ่งผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ในสารละลาย FeCl_3 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} เท่ากับ 0.01, 0.10, 0.15 และ 0.20 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 2 นาน 30 นาที พบว่าความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายที่ใช้แช่เปลือกสับปะรด (ชุดทดลอง) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} (รูปที่ 4.8) นอกจากนี้พบว่าปริมาณ Fe^{3+} ที่เหลือใน

สารละลายมีค่าแปรผันตรงกับความสัมพันธ์เริ่มต้นของ Fe^{3+} และเมื่อทำการคำนวณค่าความจุในการดูดซับ พบว่าความจุในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์เริ่มต้นของ Fe^{3+} โดยเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH สามารถดูดซับ Fe^{3+} ในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.01, 0.10, 0.15 และ 0.20 โมลาร์ ได้ 1.023 ± 0.02 , 14.106 ± 0.11 , 14.836 ± 0.15 และ 14.928 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ประกอบกับความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการลดลงของ Fe^{3+} ในชุดทดลองเกิดจากการยึดเกาะของ Fe^{3+} ที่พื้นผิวเปลือกสับปะรด อย่างไรก็ตามการทดสอบทางสถิติด้วย ANOVA-Duncan พบว่าเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.10 โมลาร์ ความจุในการดูดซับจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการดูดซับ Fe^{3+} จนถึงจุดอิ่มตัว ทำให้ความสามารถในการดูดซับ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ไม่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย FeCl_3 ที่ใช้



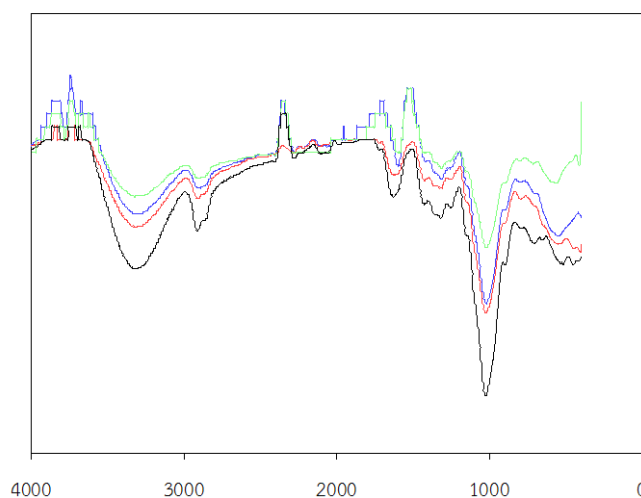
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe^{3+} ในสารละลายและความจุในการดูดซับ Fe^{3+} ของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีพีเอช 2 ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันนาน 30 นาที โดย (■) คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} (▨) คือความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชุดควบคุม (□) คือความเข้มข้นของ Fe^{3+} หลังแช่เปลือกสับปะรด และ (●) คือความจุในการดูดซับ Fe^{3+}

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N.) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยการแช่ในของสารละลาย FeCl_3 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน พบว่า ค่า I.N. และ M.B.N. มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} โดยการลดลงเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่ใช้แช่เปลือกสับปะรดจาก 0.01 โมลาร์เป็น 0.1 โมลาร์ (ตารางที่ 4.8) แสดงให้เห็นว่าเปลือกสับปะรดมีพื้นผิวสำหรับการดูดซับน้อยลง เนื่องจากการยึดเกาะของ Fe^{3+} บนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยเทคนิค FT-IR ได้สนับสนุนคำอธิบายดังกล่าว เนื่องจากพบว่าแถบการยืดของ O-H ในย่านเลขคลื่นประมาณ 3332.49 cm^{-1} และการยืดของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1620.89 cm^{-1} รวมถึงพีคที่ประมาณ 1022.36 cm^{-1} ที่แสดงถึงการยืดของพันธะคาร์บอนและ

ตารางที่ 4.8 ค่าการดูดซับไอโอดีน (I.N.) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) ของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} โดยการแช่ใน FeCl_3 pH 2 นาน 30 นาที

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} (M)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.01	245.36±2.87	438.84±2.70
0.10	80.21±0.33	95.06±4.34
0.15	72.85±1.18	92.59±0.85
0.20	70.34±0.43	89.56±1.22

ออกซิเจน(C-O) ของกลุ่มแอลกอฮอล์ มีความเข้มต่ำลงภายหลังการแช่เปลือกสับปะรดในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ Fe^{3+} เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.9) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arief *et al.* (2008) ซึ่งพบว่าที่แถบการยืดในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3408 cm^{-1} ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) และแถบการยืดของ C-O ที่ในช่วง $1000\text{-}1200 \text{ cm}^{-1}$ ของสาหร่ายสีเขียว มีความเข้มลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ Cd^{2+} ที่ดูดซับ นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของแถบการยืดของพันธะ Fe-O ซึ่งปรากฏในย่าน $440\text{-}450 \text{ cm}^{-1}$ และ $530\text{-}550 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อแช่เปลือกสับปะรดในสารละลายที่มี Fe^{3+} เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.9)



รูปที่ 4.9 FT-IR spectrum ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน Fe^{3+} ที่มีความเข้มข้นต่างกัน นาน 30 นาที โดยเส้น (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.01 M (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.10 M (—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 M และ(—) คือสเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.20 M

ตารางที่ 4.9 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน FeCl_3 (pH=2) ที่มีความเข้มข้น Fe^{3+} ต่างกัน นาน 30 นาที

เลขคลื่น (cm^{-1})	เปลือกสับปะรด			
	เคลือบผิวด้วย Fe^{3+} เข้มข้น			
	0.01 M	0.10 M	0.15 M	0.20 M
3200-3500 (O-H ของ Alcohol)	b, m	b, w	b, w	b, w
2800-3000 (C-H aliphatic)	w	w	w	w
1600-1650 (C=O ของ Carboxylate)	sh, w	sh, w	sh, w	sh, w
1000-1150 (C-O ของ Alcohol)	sh, s	sh, m	sh, m	sh, m
550 (Fe-O)	w	w	w	w
440-450 (Fe-O)	w	w	w	w

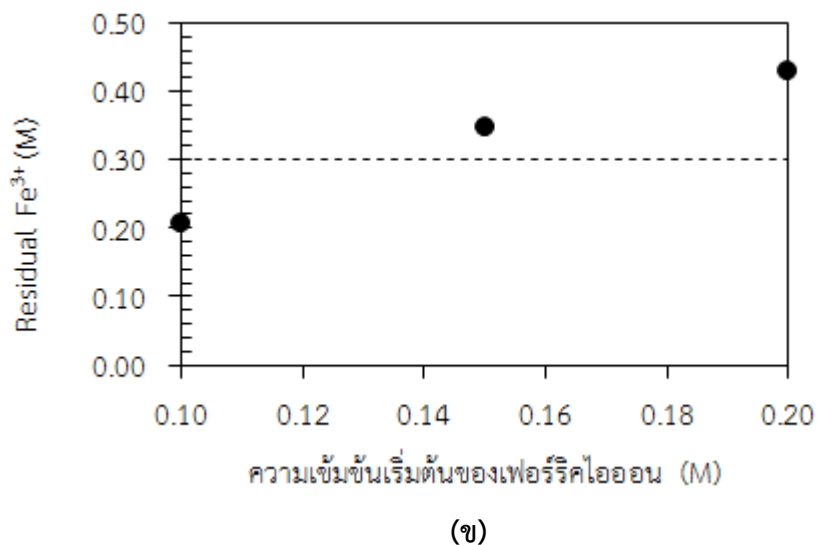
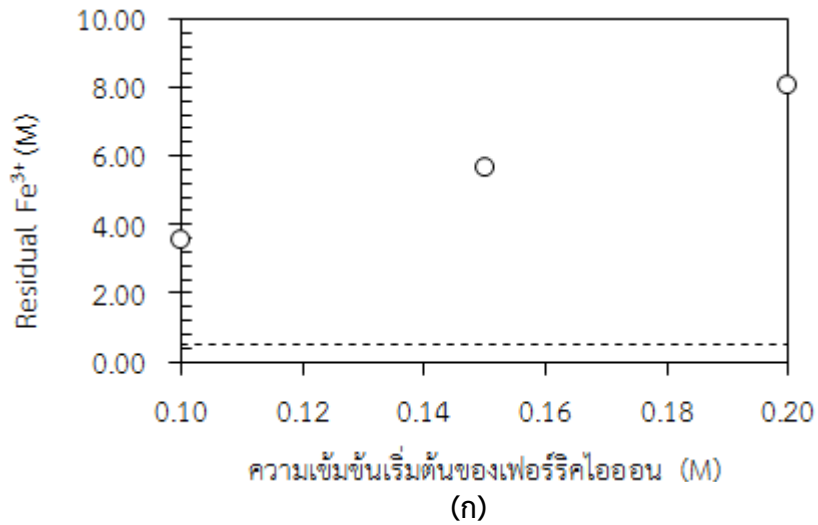
หมายเหตุ: b = board, m = medium, s = strong, sh = sharp, w = weak, vw = very weak ด้วยเหตุที่การเพิ่มความเข้มข้นของ Fe^{3+} ตั้งแต่ 0.1 โมลาร์ ไม่ส่งผลให้ค่าความถี่ในการดูดซับของเปลือกสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลของความเข้มข้น Fe^{3+} ต่อค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนหรือเมทิลีนบลู รวมไปถึงหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของเปลือกสับปะรดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วง 0.10-0.20 โมลาร์ มาศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.2.4 การศึกษาการคายซับจากเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} และเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH

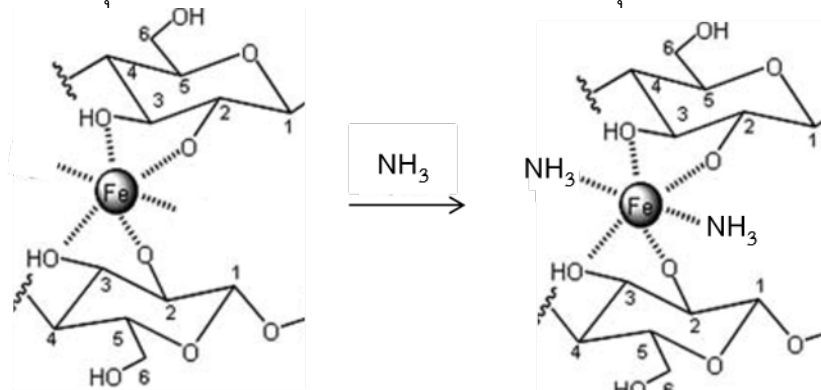
ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นที่ใช้แช่เปลือกสับปะรดซึ่งปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าน้ำกลั่นภายหลังจากแช่เปลือกสับปะรดมีปริมาณ Fe^{3+} เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe^{3+} ที่ใช้ปรับปรุงเปลือกสับปะรด (รูปที่ 4.10ก) โดยปริมาณที่พบในน้ำกลั่นจะมีค่าเท่ากับ 3.571 ± 0.074 , 5.657 ± 0.001 และ 8.079 ± 0.147 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคายซับได้เท่ากับ 12.65%, 20.05%, และ 28.63% ตามลำดับ อีกทั้งปริมาณที่พบมีค่าเกินเกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของเหล็กสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549) แสดงให้เห็นว่าเปลือกสับปะรดซึ่งปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} มีประสิทธิภาพการเกาะติดของ Fe^{3+} บนพื้นผิวต่ำ

เมื่อทำการแช่เปลือกสับปะรดซึ่งปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} ในสารละลาย NH_4OH เข้มข้น 1.0 โมลาร์ นาน 10 นาที และนำเปลือกสับปะรดดังกล่าวไปแช่ในน้ำกลั่นที่มีพีเอชเป็น 7 นาน 24 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นภายหลังจากแช่เปลือกสับปะรดดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้า (รูปที่ 4.10ข) อีกทั้งปริมาณที่พบมีค่าไม่เกินเกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของเหล็กสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่า NH_4OH สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดของเฟอร์ริกไอออนบนพื้นผิวเปลือกสับปะรด เนื่องจาก NH_3 จะทำหน้าที่

เป็นลิแกนด์ (Ligand) และใช้อิเล็กตรอนคูโดด (lone-pair electron) สร้างพันธะกับ Fe^{3+} ดังรูปที่ 4.11 ทำให้โครงสร้างของตัวดูดซับมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น (Kim *et al.*, 2006)



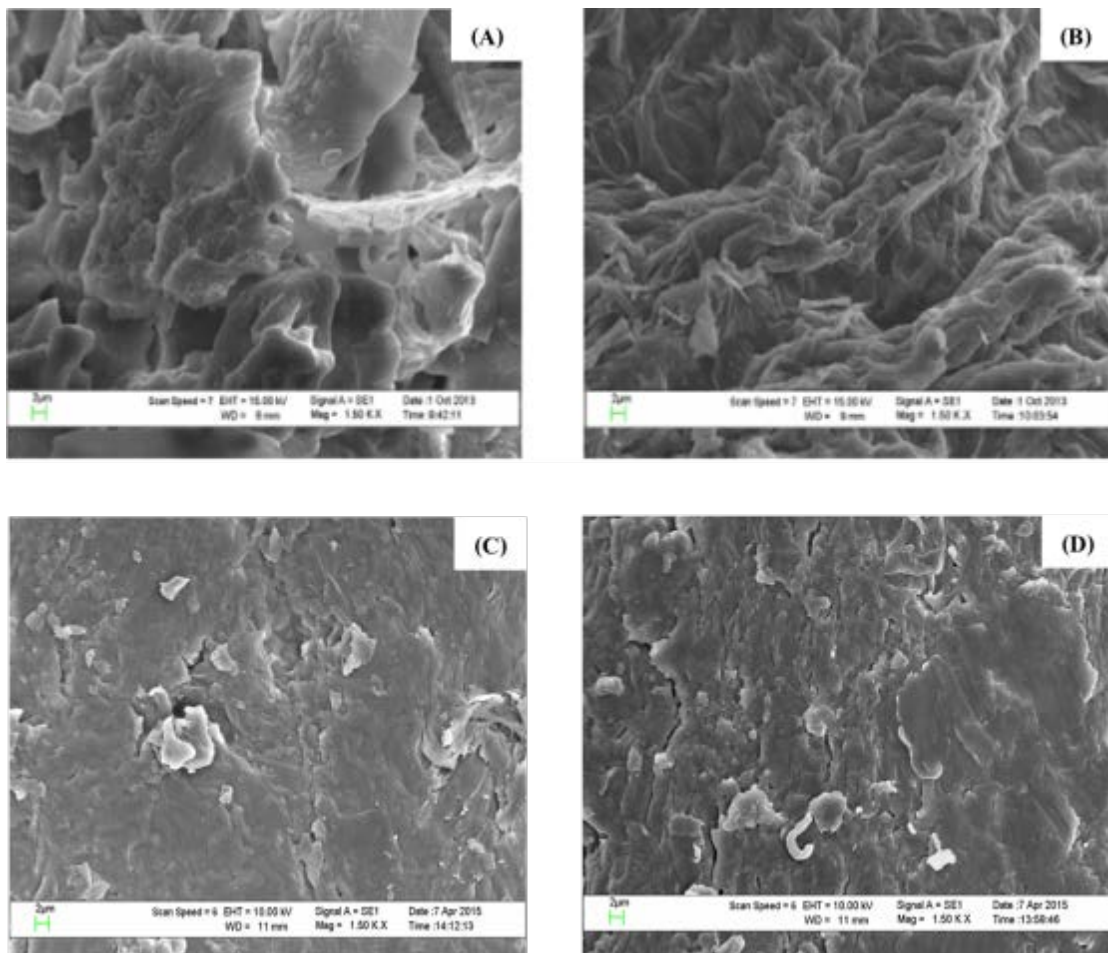
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในน้ำกลั่นที่แช่เปลือกสับปะรด เมื่อ (ก) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ Fe^{3+} (ข) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH และเส้นประแสดงเกณฑ์ความเข้มข้นสูงสุดของเหล็กสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.11 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดของ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรดด้วย NH_4OH

4.2.5 สมบัติทางด้านพื้นผิวของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุง

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกสับปะรดก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของเปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง (ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ) มีลักษณะของพื้นผิวเป็นแผ่นเรียบและซ้อนกันเป็นชั้นๆ (รูปที่ 4.12A) เมื่อทำการปรับสภาพด้วย NaOH พบว่าพื้นผิวของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพมีลักษณะขรุขระมากขึ้น (รูปที่ 4.12B) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความสามารถของ NaOH ในการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนินและทำลายความเป็นโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส (Cellulose crystalline) ส่งผลให้เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนรวมเพิ่มมากขึ้นเป็น $26.90\text{m}^2/\text{g}$ และ $2.84 \times 10^{-2}\text{cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) ในขณะที่เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH ร่วมกับ Fe^{3+} มีลักษณะผิวเรียบขึ้น (รูปที่ 4.12C) เช่นเดียวกันกับเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH (รูปที่ 4.12D) แสดงให้เห็นถึงการดูดซับของเฟอร์ริกไอออนที่พื้นผิวของเปลือกสับปะรด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นผิวจำเพาะและ



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ของ (A) เปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง (B) เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH (C) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ Fe^{3+} และ (D) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติด Fe^{3+} บนพื้นผิวด้วย NH_4OH

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนและปริมาตรของรูพรุนรวมด้วยวิธีการของบีอีที (BET) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน

ชนิดของตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรู พรุน (nm)	ปริมาตรของ รูพรุนรวม (cm^3/g)
- เปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง	8.38	7.68	1.61×10^{-2}
- เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH	26.90	5.32	2.84×10^{-2}
- เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ Fe^{3+}	6.33	3.64	1.79×10^{-2}
- เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH	6.85	3.49	1.80×10^{-2}

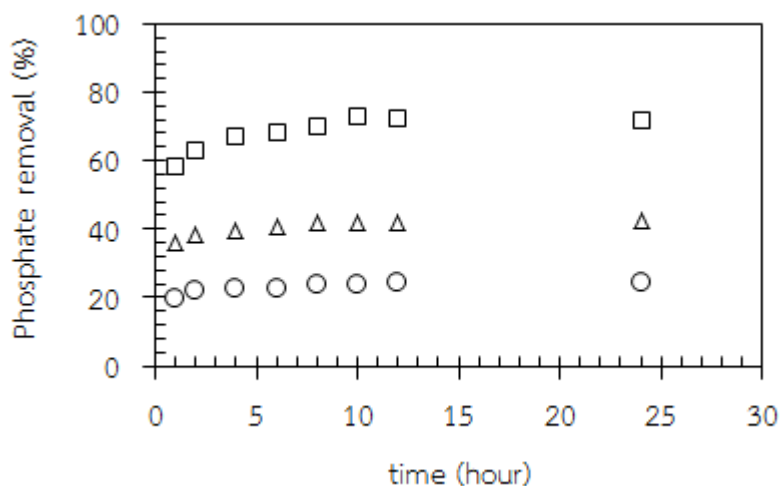
ปริมาตรของรูพรุนรวมด้วยวิธีการของบีอีที (BET) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ที่พบว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ FeCl_3 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนรวมลดลงเหลือ $6.33 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $1.79 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$ เมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในขณะที่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} บนผิวของสับปะรดมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ตารางที่ 4.10) รวมถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ Fe^{3+} (ไม่ใช้ NH_4OH) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตาข่าย ดังในรูปที่ 4.11 จากการสร้างพันธะระหว่าง NH_3 กับ Fe^{3+} บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด

4.3 การกำจัดโพสเฟตด้วยเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

การศึกษาความสามารถในการกำจัดโพสเฟตของเปลือกสับปะรด 3 ชนิด ได้แก่ (1) เปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง (2) เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และ (3) เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH โดยทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัสและปริมาณตัวดูดซับ ได้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

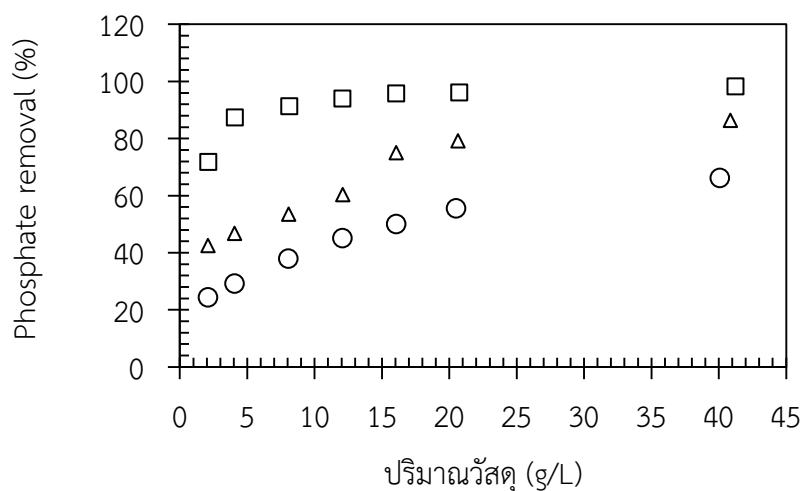
เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดโพสเฟตของเปลือกสับปะรดทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลาการสัมผัสแตกต่างกัน พบว่าวัสดุที่ใช้ทดสอบทั้ง 3 ชนิดสามารถกำจัดโพสเฟตในน้ำได้ โดยปฏิกิริยาการกำจัดโพสเฟตเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นความสามารถในการกำจัดโพสเฟตมีแนวโน้มคงที่ (รูปที่ 4.13) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโพสเฟตระหว่างวัสดุทั้งสามชนิด พบว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโพสเฟตสูงที่สุด รองลงมาคือเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุง ตามลำดับ (รูปที่ 4.13) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่พื้นผิวของเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH มี Fe^{3+} ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบของโพสเฟต



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดสารละลายโพสเฟตเข้มข้น 10 mg/L ของเปลือกสับปะรด ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อ ○ คือเปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง, Δ คือเปลือกสับปะรดปรับสภาพด้วย NaOH และ □ คือเปลือกสับปะรดปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติตติวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH

4.3.2 ผลของปริมาณวัสดุ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดโพสเฟตเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของเปลือกสับปะรดทั้ง 3 ชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับปะรดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 กรัมต่อลิตร ถึง 40 กรัมต่อลิตร พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโพสเฟตของวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเปลือกสับปะรดที่ใช้ (รูปที่ 4.14) ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณวัสดุที่ใช้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยา (Pillai *et al.*, 2013) โดยเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติตติวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH มีความสามารถในการกำจัดโพสเฟตได้สูงกว่าร้อยละ 90 เมื่อใช้ปริมาณวัสดุเท่ากับ 8 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการ ANOVA-Duncan พบว่าร้อยละของการกำจัดโพสเฟตมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติตติวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH ในปริมาณตั้งแต่ 16 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป เนื่องจากสัดส่วนของโพสเฟตในน้ำเสียเมื่อเทียบกับตัวดูดซับมีน้อยลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ สำหรับเปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง และเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH พบว่ามีค่าร้อยละการกำจัดโพสเฟตของสูงสุดเท่ากับ 66 % และ 86% ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตรของเปลือกสับปะรดดังกล่าว ในการบำบัดสารละลายโพสเฟต ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติตติวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.14 ความสามารถในการกำจัดสารละลายโพสเฟตเข้มข้น 10 mg/L ของเปลือกสับปะรด ซึ่งใช้ในปริมาณต่างกัน เมื่อ ○ คือเปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุง, Δ คือเปลือกสับปะรด ปรับสภาพด้วย NaOH และ □ คือเปลือกสับปะรดปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติดผิว ของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตที่ดูดซับไว้โดยเปลือกสับปะรด (q) กับความเข้มข้นของโพสเฟตที่เหลือในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (Ce) พร้อมกับศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการอธิบายสมดุลการดูดซับโพสเฟตของเปลือกสับปะรด เปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์ที่อธิบายสมดุลการดูดซับโพสเฟตด้วยเปลือกสับปะรด

ชนิดตัวดูดซับ	แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม			
	สมการเส้นตรง	K_L	q_m	R^2
- เปลือกสับปะรดไม่ปรับปรุง	$y=30.1790x+2.8482$	0.094	0.35	0.9921
- เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH	$y=6.3222x+0.1707$	0.027	5.86	0.9257
- เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH	$y=0.7031x+0.0283$	0.039	35.33	0.9927

ตารางที่ 4.12 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิชที่อธิบายสมดุลการดูดซับโพสเฟตด้วยเปลือกสับปะรด

ชนิดตัวดูดซับ	ฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม			
	สมการเส้นตรง	K_F	n	R^2
- เปลือกสับปะรดไม่ปรับปรุง	$y=2.0270x-2.0163$	0.453	1.590	0.9515
- เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH	$y=1.228x-0.8514$	6.537	0.814	0.8039
- เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH	$y=0.9470+0.1142$	1.301	1.056	0.9726

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์มีความเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับโพลีฟอสเฟตด้วยวัสดุทั้ง 3 ชนิด มากกว่าแบบจำลองแบบฟรอนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีลักษณะแบบชั้นเดียว และมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน (โกวิทย์ และคณะ, 2551) โดยเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (q_m) เท่ากับ 35.33 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.039 ส่วนเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับปรุงมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 5.86 และ 0.35 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์เท่ากับ 0.027 และ 0.094 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดผิวของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH มีความจุในการดูดซับโพลีฟอสเฟตมากกว่าเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และเปลือกสับปะรดก่อนการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

เปลือกสับปะรดสามารถนำมาพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพให้เป็นวัสดุดูดซับที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้โดยการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปเคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จากการศึกษาพบว่าเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 2.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C มีพื้นผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังปรากฏแถบการยืดของ O-H ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นในช่วง $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ และแถบการยืดของ C-O ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลที่เลขคลื่น $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่เด่นชัดขึ้น เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH สามารถดูดซับเฟอร์ริกไอออนได้สูงถึง 14 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยวัสดุดังกล่าวมีพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เพียงอย่างเดียว แต่ปรากฏแถบยืดเลขคลื่นประมาณ $440\text{--}450$ และ 550 cm^{-1} ที่แสดงให้เห็นถึงการสร้างพันธะของ Fe-O บนพื้นผิวเปลือกสับปะรด การแช่เปลือกสับปะรดที่เคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ นาน 10 นาที ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการเกาะยึดของเฟอร์ริกไอออนที่ผิวหน้าของเปลือกสับปะรด จากการศึกษาการดูดซับโพลีฟอสเฟตด้วยวัสดุดูดซับต่างกัน 3 ชนิดด้วยวิธีการแช่ พบว่าสามารถดูดซับฟอสเฟตได้ปริมาณแตกต่างกันจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เปลือกสับปะรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และเพิ่มการดูดติดของ Fe^{3+} ด้วย NH_4OH สามารถดูดซับฟอสเฟตได้สูงสุด 35.33 มิลลิกรัมต่อกรัม เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 5.86 มิลลิกรัมต่อกรัม และเปลือกสับปะรดก่อนปรับปรุงมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับโพลีฟอสเฟตเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการดูดซับฟอสเฟต เพื่อเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดิน
2. ควรศึกษาความสามารถในการบำบัดไอออนลบของมลสารชนิดอื่นในน้ำเสียเช่น NO_3^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และเคลือบติดผิวด้วย Fe^{3+}

บทที่ 6
สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

1. บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่องการเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก)
2. บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2015) เรื่อง Preparation of Biosorbent from Pineapple Peels: Pretreatment with NaOH (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก)

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2556. "ระบบบำบัดน้ำเสีย : น้ำเสียชุมชน." สืบค้นเมื่อ 26 ตุลาคม 2558 จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#top.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3470 (พ.ศ. 2549) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง ยกเลิกมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค เล่ม 1 และออกประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค มาตรฐานเลขที่ มอก. 257-2549. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 123 ตอนที่ 64 ง วันที่ 6 กรกฎาคม 2549..
- กันตพัฒน์ กสิบุตร. 2558. "การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา, จารุวรรณ ตาหวัดน์, ปิยวัฒน์ โพธิ์มงคลกุล และฉัฐรัส คงสมภักดิ์. 2551. "จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม(VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน." *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 18(1) : 68-79.
- จินดา สนิทวงศ์ ณ อยุธยา. 2547. *การใช้เศษเหลือและผลพลอยได้จากสับปะรดเป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง*. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ชันันท์ นิवासวงศ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. "การผลิตเซลล์ลูโลสจากเอทานอลในประเทศไทย." *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*. 40(4): 1073-1088.
- ธงชัย พรหมสวัสดิ์. 2539. "แนวทางการลดปริมาณสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งชุมชนจากการใช้สารซักฟอก." *Thai Environmental Engineering Journal*. 1(1) : 39-43.
- พรทิ กองร้อย. 2557. "การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากการซักล้างโดยแหนแดง". รายงานวิจัย ฉบับสมบูรณ์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- พอลา ประสานนาม. 2547. "การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก hydroxyethyl cellulose." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ยาโก๊ะ ขาเริ่มดาเบะ. 2553. "การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- รัตนกร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทอัมพร และดวงกมล ณ ระนอง. 2554. "การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย." *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 28(4): 31-37.
- วนิดา ปานอุทัย. 2553. "การผลิตเอทานอลจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วราภรณ์ มงคลเคหา, วริศรา เพือกผาสุข และวริษฐา ศูนย์ปาน. 2556. "การเตรียมไฮโดรไลสจากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. "สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2558." สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2558 จาก http://www.oae.go.th/download/document_tendency/journalofecon2558.pdf.
- สุมน โพธิจันทร์. 2557. "การใช้ผลพลอยได้จากสับปะรดเป็นอาหารโคเนื้อ-โคนม." สืบค้นเมื่อ 26 ตุลาคม 2558 จาก http://expert.dld.go.th/attachments/article/166/pine_ap.pdf.
- อังคณา คงสุวรรณ, ตรี อินทราริณี เวียร์ยันโตโร, และอภิรักษ์ เพียรมงคล. 2557. "การสกัดเส้นใยจากเปลือกและแกนสับปะรด." หน้า 891-895. ใน **การประชุมวิชาการ Graduate Reserach ครั้งที่ 15** ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อาทิตย์ ปัญญาศักดิ์ และศรเทพ ธัมวาสร. 2556. "อิทธิพลของระยะเวลาการหมักและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพพีเอ็มอาร์". *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*. 44(1) : 55-58.
- Ahalya, N. Kanamadi, D.R. and Ramachanda, V.T. 2006. "Biosorption of iron(III) from aqueous solution using the husk of *Cicer arietinum*." *Indian Journal of Chemical Technology*. 13: 122-127.
- APHA. 1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th Edition. USA: American Public Health Association.
- Arief, O.V. Trilestari, K. Sunarso, J. Indraswati, N. and Ismadji, S. 2008 "Recent progress on biosorption of heavy metals from liquids using low cost biosorbents: Characterization, Biosorption Parameters and Mechanism Studies." *Clean-Soil, Air, Water*. 36(12) : 937-962.
- Benyoucef, S and Amrani, M. 2011. "Adsorption of phosphate ions onto low cost Aleppo pine adsorbent." *Desalination*. 275(1-3) : 231-236.
- Chowdhury, S. Mishra, R. Saha, P. and Kushwaha, P. 2011. "Adsorption thermodynamic, kinetic and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk." *Desalination*. 265(1-3) : 159-168.
- Garcia, P.V. Toledo, N. Denardin, J. Yazigil, D.V. Cruz, C. Spodinie, E. and Luo, Z. 2013. "One potsolvothermal synthesis of organic acid coated magnetic iron oxide nanopartical." *Journal of the Chilean Chemical Society*. 58(4): 707-717.
- Ismail, Z. 2012. "Kinetic study for phosphate removal from water by recycled date-palm wastes as agricultural by-products." *International Journal of Environmental Studies*. 69(1) : 135-149.
- Jiao, C. and Xiong, J. 2014. "Accessibility and morphology of cellulose fibres treated with sodium hydroxide." *Bio Resources*. 9(4): 6504-6513.

- Kim, J. Mann, D.J. and Spencer, G.J. 2006. "Arsenic removal from water using Lignocellulose Adsorption Medium (LAM)." *Journal of Environmental Science and Health*. 41: 1529–1542.
- Kim. J. Y. **Linocellulose-based anion-adsorbing medium (LAM) and Process for Making and using same for the selective removal of phosphate and arsenic anionic contaminants from aqueous solutions.** USA. U.S. Patent No. 7,758,756 B2. 2010.
- Krishnan, K. A. and Haridas, A. 2008. "Removal of phosphate from aqueous solutions and sewage using natural and surface modified coir pith." *Journal of Hazardous Materials*. 152(2) : 527-535.
- Liu, W. Zhang, J. Zhang, C. Wang, Y. and Li, Y. 2010. "Adsorptive removal of Cr(VI) by Fe-modified activated carbon prepared from *Trapa natans* husk." *Chemical Engineering Journal*. 162(2) : 677-684.
- Nasuha, N. and Harneed, B. H. 2011. "Adsorption of methylene blue from aqueous solution on NaOH-modified rejected tea." *Chemical Engineering Journal*. 166 : 783-786.
- Nguyen, T.A. H. Ngo, H. H. Guo, W. and Nguyen, T. V. 2012. "Phosphate removal from aqueous solutions by agricultural by-products: A critical review." *Journal of Water Sustainability*. 2(3) : 193-207.
- Ning-chuan, F. and Xue-yi, G. 2012. "Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel." *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*. 22: 1224-1231.
- Ning-chuan, F. Xue-yi, G. and Sha, L. 2010. "Enhanced Cu(II) adsorption by orange peel modified with sodium hydroxide." *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*. 20 : 146-152.
- Ofomaja, A. E. Naidoo, E. B. and Modise, S. J. 2009. "Removal of copper(II) from aqueous solution by modified pine cone powder as biosorbent." *Journal of Hazardous Materials*. 168(2-3) : 909-917.
- Pillai, S.S. Mullassery, D.M. Fernandez, B.N. Girija, N. Geetha, P. and Koshy, M. 2013. "Biosorption of Cr(VI) from aqueous solution by chemically modified potato starch: Equilibrium and kinetic studies." *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 92: 199–205.
- Ronda, A. Martin-Lara, M. A. Calero, M. and Blazquez, G. 2013. "Analysis of the kinetics of lead biosorption using native and chemically treated olive tree pruning." *Ecological Engineering*. 58 : 278-285.
- Souza, D.V.T.M. Diniz, M.K. Massocatto, L.C. Tarly, T.R. Caetono, J. and Dragunski, C.D. 2012. "Removal of Pb(II) from aqueous solution with orange sub products chemically modified as biosorbent." *Bio Resources*. 7(2): 2300-2318.

- Wan Ngah, W.S. and Hanafiah, M.A.K.M. 2008. "Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents." *Bioresource Technology*. 99: 3935–3948.
- Xu, J. Cheng, J.J. Sharma-Shivappa R.R. and Burns, C.J. 2010. "Sodium Hydroxide Pretreatment of Switchgrass for Ethanol Production." *Energy Fuels*. 24: 2113–2119.
- Xuang, Z. Tang, Y. Li, X. Li, Y. and Luo, F. 2006. "Study on the equilibrium, kinetics, and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel." *Biochemical Engineering Journal*. 31 : 160-164.
- Yoshita, A. Lu, J. L. Ye, J. H. and Liang, Y. R. 2009. "Sorption of lead from aqueous solutions by spent tea leaf." *African Journal of Biotechnology*. 8(10) : 2212-2217.
- Zhao, Y. Huang, M. Wu, W. and Jin, W. 2009. "Synthesis of the cotton cellulose based Fe(III)-loaded adsorbent for arsenic(V) removal from drinking water." *Desalination*. 249(3) : 1006-1011.
- <http://bio1151.nicerweb.com/Locked/media/ch05/cellulose.html>
- http://exim.go.th/doc/research/business/industry_profile/อุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง%20270447pdf.

ภาคผนวก ก
เอกสารผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย

1.

ภาคผนวก ข
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล...ดร.อุสรรัตน์ ภาวรัชย์สิทธิ์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8

หน่วยงานสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8000-8099 ต่อ 6249 โทรสาร 02-329-8428

e-mail kpusarat@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	จุลชีววิทยา (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี	2536
M.Sc.	Environmental Science	Florida Institute of Technology, USA	2539
Ph.D.	Environmental Engineering & Science	Clemson University, USA	2545

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ...การบำบัดและฟื้นฟูคุณภาพสิ่งแวดล้อม.....

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2537-2545	ทุนรัฐบาล	ทบวงมหาวิทยาลัย
2547	ทุนวิจัยประเภทส่งเสริมงานวิจัย งบประมาณเงิน รายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
2548	ทุนวิจัยประเภทส่งเสริมงานวิจัย งบประมาณเงิน รายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
2549-2550	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่	สกอ ร่วมกับ สกว
2554-2555	ทุนวิจัยประเภทงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์ งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
2556	ทุนวิจัยประเภทส่งเสริมนักวิจัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Rattiya Ongmali, Saranya Phunpruch and Usarat Thawornchaisit. 2014. Cellular lipid production of a heterotrophic bacterium isolated from poultry processing wastewater. *Songhlanakarin J. Sci Tech.* 36(3) : 355-387.

2. Parichart Hasunthre, Vichuta Toomthong, Sukanda Yoschoch and Usarat Thawornchaisit. 2011. The potential of restaurant trap grease as biodiesel feedstock. *Songhlanakarin J. Sci Tech.* 33 : 525-530.
3. Chatchavaporn Yingsobat and Usarat Thawornchaisit. 2011. Efficiency of Triple Superphosphate fertilizer to stabilize cadmium in different soil texture characteristics. *J. Environ. Res.* 33: 41-55.
4. Usarat Thawornchaisit and Chongrak Polprasert. 2009. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils. *J. Hazard. Mater.* 165: 1109-1113.
5. Usarat Thawornchaisit and Kesinee Pakulanont. 2007. Application of dried sewage sludge as phenol biosorbent. *Bioresource Technol.* 98 : 140-144.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Rattiya Ongmali, Usarat Thawornchaisit and Saranya Phunpruch. 2010. Lipid-accumulating capacity of bacteria isolated from a poultry processing wastewater. *Proceeding of the 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*, October 4-6, 2010, Pattaya, Thailand.