

การดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟดัดแปลงด้วย
โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต และปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม
กรกฎาคม 2566
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การดูดซับตะกั่วและสีมาเมกนิน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและ
โซเดียมไบคาร์บอเนต



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต และปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
กรกฎาคม 2566
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ADSORPTIVE REMOVAL OF LEAD(II) ION AND EMAMECTIN BENZOATE USING SODIUM
CARBONATE AND SODIUM BICARBONATE MODIFIED SPENT COFFEE GROUND



RATTANAPORN RATTANAGORNPAIBULL

A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Bachelor of Science and Master of Science Degree in Environmental Science
July 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและ
โซเดียมโบคาร์บอเนต

ของ รัตนาภรณ์ รัตนากรไพบุลย์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต และปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร. ภูมิศร์ ทับทิมแดง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐภูมิ พรหมณะ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. สุมล นิลรัตน์นิศากร)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ)

- เรื่อง:** การดูดซับตะกั่วและอิมามกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมโบคาร์บอเนต
- ผู้วิจัย:** รัตนาภรณ์ รัตนากรไพบุลย์, วิทยานิพนธ์: วท.บ. (เคมี) และ วท.ม (วิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2566
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐภูมิ พรหมณะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สมล นิลรัตน์นิศากร
- คำสำคัญ:** กากกาแฟ, อิมามกติน เบนโซเอต, ตะกั่ว, การดูดซับ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมโบคาร์บอเนต เพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและอิมามกติน เบนโซเอต มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับและสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลง (2C-SCG และ 2B-SCG) เปรียบเทียบกับกากกาแฟที่ไม่ถูกดัดแปลง (SCG) โดยมีกากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG) เป็นชุดควบคุม การศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผงและเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด พบว่าโครงสร้างของกากกาแฟทั้ง 4 แบบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินหลังการดัดแปลงด้วยด่างทำให้พันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนินถูกทำลาย จึงเกิดหมู่ฟังก์ชันที่จับกับไอออนของตะกั่วได้ โดยเกิดการดูดซับทางเคมีแบบขั้นเดียวตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ และจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งตัวดูดซับ 2C-SCG สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด มีความสามารถในการดูดซับ 39.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH 6 ใช้เวลาในการดูดซับ 360 นาที ขณะที่การดูดซับอิมามกติน เบนโซเอตเป็นการดูดซับทางกายภาพแบบหลายชั้นตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยตัวดูดซับ SCG สามารถดูดซับอิมามกติน เบนโซเอตได้ดีที่สุด มีความสามารถในการดูดซับ 3.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH 4 ซึ่งพื้นผิวตัวดูดซับมีประจุเป็นบวก ใช้เวลาในการดูดซับ 360 นาที อย่างไรก็ตามการดัดแปลงกากกาแฟด้วยด่างทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะทางเคมีกับอิมามกติน เบนโซเอตได้ จึงทำให้กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH และเวลาในการดูดซับ

Title: ADSORPTIVE REMOVAL OF LEAD(II) ION AND EMAMECTIN BENZOATE USING SODIUM CARBONATE AND SODIUM BICARBONATE MODIFIED SPENT COFFEE GROUND

Author: RATTANAPORN RATTANAGORNPAIBULL, Thesis: B.S. (Chemistry) and M.S. (Environmental Science), University of Phayao, 2023

Advisor: Assistant Professor Dr. Rattapoom Prommana Co–advisor Dr.Sumol Nilratnisakon

Keywords: Spent Coffee Ground, Emamectin Benzoate, Lead, Adsorption

ABSTRACT

This research was to study the modification of coffee grounds using sodium carbonate (Na_2CO_3) and sodium bicarbonate (NaHCO_3) to adsorb lead (II) ion (Pb^{2+}) and Emamectin benzoate. The objective was to determine the adsorption efficiency of adsorbents and to determine the optimum conditions to use modified coffee grounds (2C–SCG and 2B–SCG) as an adsorbent compared with unmodified coffee grounds (SCG) and used coffee grounds soaked in water (W–SCG) as a control adsorbent. Structural characterization by powder X–ray diffractometer and Fourier–transform Infrared spectroscopy showed that the structure of the four adsorbents consisted of cellulose, hemicellulose, and lignin. The modification using Na_2CO_3 and NaHCO_3 caused bond breaking between cellulose and lignin and forming a functional group which could bind to Pb^{2+} . Adsorption of Pb^{2+} was one–layer chemical adsorption fitted to Langmuir isotherm and pseudo–second–order kinetic model. The results showed that 2C–SCG had the highest adsorption efficiency with adsorption capacity of 39.66 mg/g at pH 6 and took 360 minutes to absorb. While the adsorption of Emamectin Benzoate was a multilayer physical adsorption fitted to the Freundlich isotherm and pseudo–second–order kinetic model. SCG had the highest adsorption efficiency with an adsorption capacity of 3.80 mg/g at pH 4, where the adsorbents surface was positively charged, and took 360 minutes to absorb. However, the modification of coffee grounds using Na_2CO_3 and NaHCO_3 formed a functional group that could bond with Emamectin benzoate, thereby making the modified coffee grounds was stable to changes in pH and adsorption time.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ พรหมณะ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่คอยให้คำปรึกษา ให้การสนับสนุน และให้คำแนะนำอย่างดีเสมอมา ตั้งแต่เริ่มเตรียมกระบวนการวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสิ้น กลายเป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์ฉบับนี้ได้ ขอขอบพระคุณ ดร.สุมล นิสรรัตน์ศาการ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิจัย ช่วยเติมเต็มส่วนที่บกพร่อง ทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีขอขอบพระคุณ ดร.ภูมิศร์ ทับทิมแดง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ทั้งยังให้ข้อคิดที่ดีแก่ผู้วิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตชญา อิศกุล ประธานหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่วิจัย การใช้เครื่องมือ และการเบิกสารเคมี ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี และสาขาอุตสาหกรรมเคมีและเทคโนโลยีวัสดุ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ขอขอบคุณ พี่น้อง ที่ร่วมเรียน แบ่งปัน ให้กำลังใจ และช่วยเหลือตลอดการทำวิจัย สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและครอบครัว ที่ให้การดูแล ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ เรื่องมาโดยตลอดจนกระทั่งผู้วิจัยประสบความสำเร็จ และขอขอบคุณประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่เอ่ยนามและไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ช่วยเหลือ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ข้อคิดที่ดีแก่ผู้วิจัยเสมอมา

รัตนภรณ์ รัตนกรไพบูลย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่จะได้รับการจากการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การปนเปื้อนของโลหะหนักและสารกำจัดศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อม.....	5
ข้อมูลการจำแนกความอันตรายของสารโดย GHS (GHS Hazards Classification)	9
กากกาแฟ (Coffee Ground).....	10
การประยุกต์ใช้กากกาแฟเป็นตัวดูดซับ.....	15
กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	18
การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics)	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	29

สารเคมี	29
อุปกรณ์.....	29
เครื่องมือ	30
การเตรียมตัวดูดซับ (Dai, Zhang and Zhang, 2016)	30
การทดลองดูดซับตะกั่ว (Cherdchoo, Nithettham and Charoenpanich, 2019)	33
การทดลองดูดซับสารอีมาเมกดิน เบนโซเอต (Dai, et al., 2019)	35
การศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัย	37
ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับกากกาแฟและกากกาแฟ ที่ถูก ดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ.....	37
ผลการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว.....	45
ผลการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชอีมาเมกดิน เบนโซเอต	59
บทที่ 5 บทสรุป.....	74
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	80
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	88
ภาคผนวก ข ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5 – 40 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	90
ภาคผนวก ค ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	92

ภาคผนวก ง พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ การดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	95
ภาคผนวก จ ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B- SCG	99
ภาคผนวก ฉ ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH เท่ากับ 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วย SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	101
ภาคผนวก ช ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ที่ pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5–360 นาที ด้วย SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG	103
ภาคผนวก ซ พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ การดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วย SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG.....	106
ประวัติผู้วิจัย	110



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 องค์ประกอบของกากกาแฟ (McNutt and He, 2019)	12
ตาราง 2 การใช้กากกาแฟและถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเป็นตัวดูดซับ	16
ตาราง 3 สรุปตัวดูดซับทั้งหมดในการทดลอง	33
ตาราง 4 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบบนสเปกตรัมฟลูออโรสโพรมอินฟราเรดของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....	44
ตาราง 5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 2 – 6 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....	49
ตาราง 6 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....	50
ตาราง 7 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 5 – 360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)	52
ตาราง 8 ค่าคงที่ตามแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชของการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)	56

ตาราง 9 ค่าคงที่ตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการ ดูดซับ ตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....59

ตาราง 10 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 4 – 10 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....63

ตาราง 11 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....64

ตาราง 12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 5 – 360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)66

ตาราง 13 ค่าคงที่ตามแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชของการดูดซับ อีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจาก ไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)..... 70

ตาราง 14 ค่าคงที่ตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียม ไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)..... 72

ตาราง 15 สรุปผลปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)76

ตาราง 16 สรุปผลปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG).....	78
ตาราง 17 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	88
ตาราง 18 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย W-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	88
ตาราง 19 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	89
ตาราง 20 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	89
ตาราง 21 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	90
ตาราง 22 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย W-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	90
ตาราง 23 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	91
ตาราง 24 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	91
ตาราง 25 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที.....	92
ตาราง 26 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที	92
ตาราง 27 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที	93

ตาราง 28 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที	93
ตาราง 29 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของการดูดซับตะกั่วด้วย SCG	95
ตาราง 30 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช ของการดูดซับตะกั่วด้วย W-SCG.....	96
ตาราง 31 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช ของการดูดซับตะกั่วด้วย 2C-SCG	97
ตาราง 32 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช ของการดูดซับตะกั่วด้วย 2B-SCG	98
ตาราง 33 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	99
ตาราง 34 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	99
ตาราง 35 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	100
ตาราง 36 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	100
ตาราง 37 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	101
ตาราง 38 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	101
ตาราง 39 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	102
ตาราง 40 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	102

ตาราง 41 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที.....	103
ตาราง 42 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที	104
ตาราง 43 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที	104
ตาราง 44 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที	105
ตาราง 45 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย SCG	106
ตาราง 46 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย W-SCG	107
ตาราง 47 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย 2C-SCG.....	108
ตาราง 48 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย 2B-SCG.....	109

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ตะกั่วที่พบในธรรมชาติ.....	6
ภาพ 2 อีมาเมกติน เบนโซเอต ความเข้มข้น 5% โดยมวล ยี่ห้อเดอะเน็กซ์.....	7
ภาพ 3 โครงสร้างของอีมาเมกติน เบนโซเอต.....	8
ภาพ 4 ลักษณะพื้นผิวของกากกาแฟสัปดาห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	11
ภาพ 5 ลักษณะภายนอกของกากกาแฟ.....	12
ภาพ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส (Rudnik, 2013).....	13
ภาพ 7 โครงสร้างของลิกนิน (Adler, 1977).....	13
ภาพ 8 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด, FT-IR (ภาพ a).....	14
ภาพ 9 ความแตกต่างของกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าและโรบัสต้า.....	14
ภาพ 10 การทำให้เป็นกลางด้วยด่าง.....	17
ภาพ 11 การสร้างพันธะระหว่างลิกนินและเซลลูโลส.....	18
ภาพ 12 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ.....	19
ภาพ 13 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี.....	19
ภาพ 14 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี.....	20
ภาพ 15 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี.....	20
ภาพ 16 โครงสร้างของเมทิลีน บลู.....	25
ภาพ 17 โครงสร้างของไนโตรเบนซีน.....	26
ภาพ 18 โครงสร้างของ 4-คลอโร-2-เมทิล ฟีนอกซี แอซิดิก แอซิด (MCPA).....	27
ภาพ 19 โครงสร้างของเตตระไซคลิน (Tetracycline).....	28
ภาพ 20 สรุปขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ.....	32
ภาพ 21 สรุปขั้นตอนการทดลองดูดซับตะกั่ว.....	34

ภาพ 22	สรุปขั้นตอนการทดลองดูดซับสารอีมาเมกดิน เบนโซเอต	36
ภาพ 23	การเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของ กากกาแฟ	38
ภาพ 24	โครงสร้างของลิกนินและเซลลูโลสบนพื้นผิวกากกาแฟ	39
ภาพ 25	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วย	40
ภาพ 26	กลไกการทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนินด้วยโซเดียมคาร์บอเนต	41
ภาพ 27	การเปรียบเทียบสเปกตรัมฟลูออโรกราฟของกากกาแฟ (SCG), กาก กาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG),	42
ภาพ 28	การเกิดเรโซแนนซ์หลังการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนต	43
ภาพ 29	การเปรียบเทียบสเปกตรัมฟลูออโรกราฟของกากกาแฟที่ถูก	45
ภาพ 30	ค่า pH หลังการดูดซับ (a) และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (b) ของกากกาแฟ (SCG),	46
ภาพ 31	ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	48
ภาพ 32	ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5 – 40.....	50
ภาพ 33	ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	52
ภาพ 34	กลไกการดูดซับตะกั่วบนเซลลูโลสและลิกนิน	54
ภาพ 35	แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (L) และแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช (F)	54
ภาพ 36	การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิวกากกาแฟ.....	56
ภาพ 37	จลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วตามสมการปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม (1).....	58
ภาพ 38	ค่า pH หลังการดูดซับ (a) และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (b) ของกากกาแฟ	60
ภาพ 39	ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.5 มิลลิกรัม	62
ภาพ 40	ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นตั้งแต่ 2.50 –	64
ภาพ 41	ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.50 มิลลิกรัมต่อ	65
ภาพ 42	โครงสร้างการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟ	67
ภาพ 43	แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (L) และแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช (F).....	68
ภาพ 44	กลไกการดูดซับทางเคมีของอีมาเมกดิน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟ	69

ภาพ 45 จลนพลศาสตร์การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	71
ภาพ 46 โครงสร้างลิแกนด์ที่เกาะกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบนพื้นผิวกากกาแฟ	74
ภาพ 47 กลไกการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและ	75
ภาพ 48 กลไกการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วย.....	75
ภาพ 49 การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์	77
ภาพ 50 การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช	77
ภาพ 51 การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต บนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลอง.....	79
ภาพ 52 การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต บนพื้นผิวกากกาแฟที่ถูกดัดแปลง	80



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มักมีข่าวเตือนภัยเรื่องอันตรายจากสารตกค้างในผัก ผลไม้ และอาหารอยู่บ่อย ๆ เป็นผลจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชในพื้นที่การเกษตร เนื่องจากเกษตรกรต้องการเพิ่มผลผลิตและลดความเสียหายของผลผลิตจากศัตรูพืช หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐ และเอกชนได้ร่วมตรวจพืชผลทางการเกษตรหลากหลายชนิดพบว่ามีการตกค้างทั้งโลหะหนัก และยาฆ่าแมลงในผัก ผลไม้ หรือแม้กระทั่งผักอินทรีย์ แม้จะพบในปริมาณที่ต่ำกว่ามาตรฐาน แต่สารเหล่านี้สามารถสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมรวมถึงร่างกายมนุษย์ ก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต และทำลายระบบนิเวศได้ โลหะหนักที่พบว่าตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรค่อนข้างบ่อยคือ ตะกั่ว (Lead) การตกค้างของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมมีหลายสาเหตุ เนื่องจากตะกั่วถูกใช้ประโยชน์ ในอุตสาหกรรมมากมาย ทั้งการผลิตแบตเตอรี่ น้ำมันหล่อลื่น ยาง และพลาสติก แต่สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร คือ การปนเปื้อนของตะกั่วในปุ๋ยเคมีและ สารกำจัดศัตรูพืชซึ่งเกษตรกรใช้อยู่เป็นประจำ โดยตะกั่วมีความเป็นพิษต่อสมองและ เซลล์ประสาทมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ง่ายผ่านระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และจากการสัมผัสโดยตรง จึงมักจะพบผู้ป่วยโรคพิษตะกั่วได้บ่อย โดยเฉพาะในเด็กอายุต่ำกว่า 6 ปี นอกจากโลหะหนัก ยาฆ่าแมลงก็เป็นสารที่พบว่ามี การตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรและยังถูกสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ยาฆ่าแมลงที่ใช้ กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ อีมาเมกติน เบนโซเอต (Emamectin- benzoate) เป็นสาร กลุ่มเอเวอร์เมกติน (Avermectin) กลุ่ม 6 เกษตรกรนิยมใช้ในการกำจัดหนอนและเพลี้ยใน ต้นฝ้าย ข้าวโพดและชา จึงถูกพบว่าเกิดการตกค้างในดินและแหล่งน้ำได้ นอกจากนี้ยังพบการ ตกค้างในผัก ผลไม้หลายชนิด ทั้งคะน้า ส้ม และผักชีฝรั่ง อีมาเมกติน- เบนโซเอตมีความเป็น พิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำต่าง ๆ ในระดับไมโครกรัม มีผลกับทั้งแพลงก์ตอนสัตว์ ไรแดง ปลา กุ้ง และหอย ทำให้เป็นอัมพาตและตายอย่างเฉียบพลัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ ให้เสียสมดุลอย่างรุนแรงได้ นอกจากนี้ยังเป็นพิษต่อการทำงานของเซลล์ประสาทมนุษย์ โดยให้ โทษทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรังอีกด้วย

จากปัญหาการปนเปื้อนของตะกั่วและอีมาเมกติน เบนโซเอตดังกล่าว จึงต้องหา วิธีการกำจัดสารเหล่านี้ออกจากสิ่งแวดล้อม โดยการดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถ

ใช้กำจัดสารปนเปื้อนออกจากสิ่งแวดล้อมได้ ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้งานตัวดูดซับหลากหลายแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับการดูดซับสารปนเปื้อนและมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเพื่อนำไปใช้งานในสถานการณ์จริง ตัวดูดซับ (Adsorbents) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีการศึกษาสภาวะแล้ว เช่น ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ (Zeolite) โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ (Metal-organic framework) เป็นต้น แต่ตัวดูดซับเหล่านี้มีราคาสูง จึงมีการพัฒนาตัวดูดซับที่มีราคาถูกจากของเหลือทิ้ง เช่น กากกาแฟ กากชา ชังข้าวโพด โดยกากกาแฟเป็นตัวดูดซับหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีปริมาณมาก หาได้ง่าย และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากการเติบโตของธุรกิจร้านกาแฟ รวมถึงอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่มีกาแฟเป็นองค์ประกอบ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อใช้ในการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตออกจากน้ำเสีย และเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของกากกาแฟกับกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงทั้งสองแบบ รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟที่ดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตของกากกาแฟเปรียบเทียบกับกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตของกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต
3. เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตของกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

สมมติฐานของการวิจัย

กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตจะสามารถดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตได้มากกว่ากากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตจะไปทำลายพันธะระหว่างลิกนินและเซลลูโลสบนพื้นผิวกากกาแฟ ปรับสภาพพื้นผิวจากกรดให้เป็นกลางมากขึ้น และเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอต

ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านระยะเวลาในการศึกษา

เริ่มต้นการศึกษาเดือน พฤศจิกายน 2562

สิ้นสุดการศึกษาเดือน กันยายน 2563

2. ขอบเขตด้านเนื้อหา

2.1 ตรวจสอบลักษณะเชิงโครงสร้างของกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต ดังนี้

2.1.1 องค์ประกอบของกากกาแฟและกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

2.1.2 หมู่ฟังก์ชันที่พบในโครงสร้างของกากกาแฟและกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

2.2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับของกากกาแฟเปรียบเทียบกับกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กากกาแฟเป็นตัวดูดซับ โดยสภาวะในการดูดซับที่ทำการศึกษา มีดังนี้

2.3.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

2.3.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับ

2.3.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

2.4 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับของกากกาแฟและกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

3. ขอบเขตด้านสถานที่

ทำการศึกษา ณ คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

การใช้กากกาแฟในการดูดซับตะกั่วและอิมามกติน เบนโซเอต จะเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากธรรมชาติ โดยอาจใช้กากกาแฟเป็นตัวจับกับสารปนเปื้อนในระบบบำบัดน้ำเสียหรือใช้เป็นตัวกรองในการทำผายตามต้นน้ำ ซึ่งกากกาแฟเป็นของเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายจึงทำให้เกิดความคุ้มค่า และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดงานวิจัย โดยประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

(Innovative environmental friendly product) ได้ เช่น กระถางต้นไม้ที่กักเก็บยาฆ่าแมลงไว้ได้
การใช้กากกาแฟเป็นไส้กรองน้ำ การนำชาหรือถ้วยชาที่ดูดซับยาฆ่าแมลงตกค้างในชา เป็นต้น



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปนเปื้อนของโลหะหนักและสารกำจัดศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อม

ทุกวันนี้มีการใช้ปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการมนุษย์และลดการสูญเสียอันเกิดจากศัตรูพืช ทำให้เกิดการตกค้างของสารเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังพบว่าในปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชมีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่ แม้จะมีการตรวจสอบปริมาณโลหะหนักไม่ให้เกินมาตรฐาน แต่ก็เป็นที่น่ากังวลว่าเมื่อมีการใช้ซ้ำ ๆ เป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการตกค้างและถูกสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ (दारुंग, สังข์ทอง และวิทยากรณ์ คงอยู่, 2559) ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการตรวจพบทั้งสารกำจัดศัตรูพืชและโลหะหนักที่ตกค้างอยู่ในดินและพืชผลการเกษตรหลากหลายชนิด เพื่อไม่ให้สารเหล่านี้ถูกสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมจนก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์ จึงต้องหาวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนเหล่านี้ออกจากสิ่งแวดล้อมให้ได้

ในงานวิจัยนี้ สนใจการกำจัดไอออนของตะกั่ว (Lead (II) ion, Pb^{2+}) และยาฆ่าแมลงอีมาเมกติน เบนโซเอต (Emamectin benzoate) ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ถูกพบว่าปนเปื้อนในปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชมากที่สุด โดยจากการวิเคราะห์ปุ๋ย 8 สูตรพบว่า มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่หลายชนิด ซึ่งตะกั่วถูกพบอยู่ในปุ๋ยทุกสูตร และยังพบในปริมาณสูงที่สุดถึง 5-25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบทองแดง นิกเกิล และแคดเมียมในปริมาณที่ลดลงตามลำดับ (ตุลญา มะสีพันธ์ และศรีเลิศ ไซติพันธ์รัตน์, 2557) ในขณะที่อีมาเมกติน เบนโซเอตเป็นยาฆ่าแมลงที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการเกษตร แต่กลับถูกสะสมในการตรวจสอบสารตกค้าง อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยพบว่าการตกค้างของอีมาเมกติน-เบนโซเอตในชาจากประเทศจีน (Zhou, et al., 2016) รวมถึงผัก และผลไม้อื่น ๆ ด้วยเช่นกัน ดังนั้น จะกำจัดตะกั่วและอีมาเมกติน เบนโซเอตออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการดูดซับเพื่อลดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ลักษณะและความเป็นพิษของตะกั่วและอีมาเมกติน เบนโซเอตจะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

1. ตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุโลหะ (Metal) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวค่อนข้างช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน มนุษย์สามารถรับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายได้ผ่านผิวหนังจากการสัมผัสโดยตรง ระบบ-ทางเดินหายใจ

จากการสูดดมไอสาร และระบบทางเดินอาหารจากการกินตามห่วงโซ่อาหาร โดยโลหะหนัก จะถูกสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อสัตว์และเนื้อเยื่อพืช และจะสะสมความเป็นพิษเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขั้นตอนการบริโภคในห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วที่พบในธรรมชาติมีทั้งในรูปตะกั่วอินทรีย์ที่สามารถดูดซึม ผ่านผิวหนังได้โดยตรง และตะกั่วอนินทรีย์ซึ่งถูกดูดซึมเฉพาะบริเวณที่มีบาดแผลเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบตะกั่วในรูปประจุ 2 บวก (Pb^{2+}) ซึ่งเป็นรูปที่ดูดซึมได้ง่ายและอันตรายอย่างมาก (Luo, Ding and Luo, 2015; เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, ม.ป.ป.)



ภาพ 1 ตะกั่วที่พบในธรรมชาติ

ที่มา: www.siamchemi.com/ตะกั่ว

พิษของตะกั่วมีผลต่อระบบประสาทของมนุษย์ ทำลายเซลล์สมอง หากได้รับปริมาณ มากอย่างเฉียบพลันอาจมีอาการชัก หมดสติ และเสียชีวิตได้ นอกจากนี้ยังระคายเคืองเยื่อ ในระบบต่าง ๆ ทำให้เกิดการอักเสบ เป็นแผลได้ เมื่อได้รับผ่านระบบทางเดินหายใจ จะเข้าสู่ ปอดโดยตรง ทำให้ลำคออักเสบ มีอาการไอ แน่น ปวดแสบหน้าอก และหายใจลำบาก หากได้รับ ตะกั่วสะสมเป็นเวลานานยังทำให้เกิดความผิดปกติต่อเซลล์เม็ดเลือด ส่งผลกระทบต่อระบบ สืบพันธุ์ และการทำงานของไตอีกด้วย (Luo, Ding and Luo, 2015)

2. อีมาเมกติน เบนโซเอต

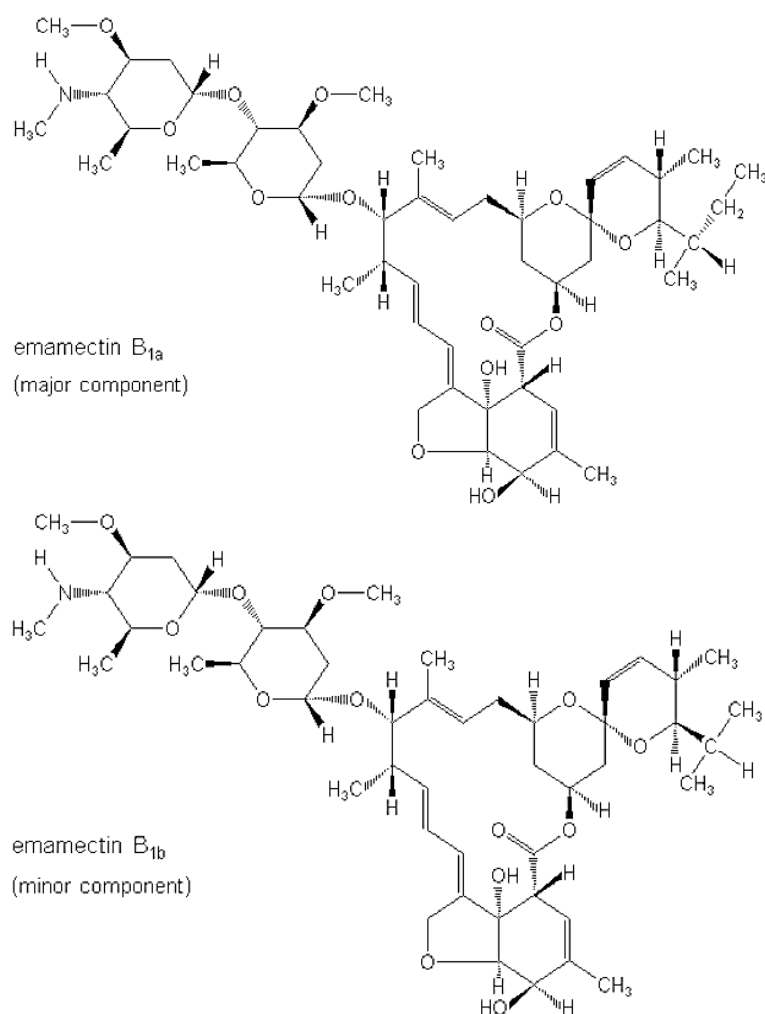
ในการปลูกฝ้ายและข้าวโพดพบว่ามักมีการระบาดของหนอนและเพลี้ยอยู่เป็น ประจำ ทำให้เกษตรกรสูญเสียผลผลิตซึ่งเป็นรายได้ส่วนหนึ่งไป ดังนั้นเกษตรกรจึงจำเป็นต้อง ใช้สารกำจัดศัตรูพืช เพื่อลดความเสียหายจากการระบาดของแมลงเหล่านี้ สารกำจัดแมลงที่ เป็นที่นิยมอย่างมาก ได้แก่ อีมาเมกติน เบนโซเอต ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงกลุ่มเอเวอร์เมกติน (Avermectin) กลุ่ม 6 มีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ราคาขายทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 95-200 บาท

ต่อ 100 กรัม ใช้ผสมน้ำได้มากที่สุดถึง 400 ลิตร สามารถใช้ป้องกันและกำจัดหนอนกระทู้ หนอนเจาะลำต้น ดอก ฝัก ผล หนอนเจาะสมอฝ้าย และเพลี้ยไฟได้โดยออกฤทธิ์แบบกินตาย ถูกตัวตาย ทำลายระบบประสาทและการทำงานของกล้ามเนื้อทำให้แมลงหยุดกินทันทีที่สัมผัส นอกจากนี้ยังสามารถดูดซึมสู่ใบพืชได้รวดเร็ว จึงมีข้อควรระวังสำหรับเกษตรกรในการเก็บเกี่ยวผลผลิต ควรเว้นระยะก่อนเก็บเกี่ยว 14 วันขึ้นไป เพื่อลดการตกค้างในผลผลิต (Zhu, et al., 2011) อย่างไรก็ตามพบว่าการตกค้างของอีมาเมกติน เบนโซเอตในใบชาจากจีน รวมถึงผักผลไม้อื่น ๆ ด้วยเช่นกัน



ภาพ 2 อีมาเมกติน เบนโซเอต ความเข้มข้น 5% โดยมวล ยี่ห้อเดอะเน็กซ์

อีมาเมกติน เบนโซเอตเป็นสารอนุพันธ์ของอะบาเมกติน (Abamectin) มีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{49}H_{75}NO_{13}$ และ $C_{48}H_{73}NO_{13}$ น้ำหนักโมเลกุล ตั้งแต่ 886.1–872.1 กรัมต่อโมล ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล (CH_3OH) อะซิโตน (CH_3COCH_3) เป็นต้น และสามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ด้วยค่าการละลายที่ pH 7 เท่ากับ 24 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะละลายน้ำได้ดีขึ้นเมื่อค่า pH ลดลงหรือมีความเป็นกรดมากขึ้น (Velde-Koerts, 2014) โครงสร้างของอีมาเมกติน เบนโซเอตมี 2 แบบ ต่างกันที่หมู่แทนที่ 1 ตำแหน่ง ดังนี้



ภาพ 3 โครงสร้างของอีมาเมกติน เบนโซเอต

ที่มา: Velde-Koerts, 2014

เนื่องจากอีมาเมกติน เบนโซเอตเป็นสารที่ใช้กำจัดกลุ่มแมลงโดยตรง จึงมีความเป็นพิษอย่างยิ่งต่อผึ้ง โดยมีค่า LD₅₀ อยู่ที่ 3.5 นาโนกรัมต่อผึ้ง 1 ตัว (Durkin, 2010) ผึ้งเป็นสัตว์สำคัญในระบบนิเวศ ทำหน้าที่ผสมเกสรและขยายพันธุ์พืช ในปัจจุบันหลาย ๆ หน่วยงานทั้งองค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล (WWF) และ Greenpeace มีความกังวลว่าผึ้งกำลังเสี่ยงที่จะสูญพันธุ์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างรุนแรงและยังส่งผลต่อการสูญพันธุ์ของพืชอีกหลายชนิด ดังนั้นการปนเปื้อนของอีมาเมกติน เบนโซเอตในสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกระดับความเป็นพิษของอีมาเมกติน เบนโซเอต ได้ด้วยวิธีการจำแนกตามความอันตรายของสารโดย GHS (GHS Hazards Classification) ซึ่งเป็นการจำแนกด้วยระบบตัวเลขที่แสดงระดับความอันตราย ซึ่งจะแตกต่างกันในสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกัน รายละเอียดดังนี้

1. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ จัดระดับความเป็นพิษอยู่ในประเภทที่ 1 เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำอย่างร้ายแรง (Toronto Research Chemicals, 2018) เป็นพิษต่อทั้งแพลงก์ตอนสัตว์ ไรแดง ปลาต่าง ๆ รวมถึงกุ้ง และหอย โดยแสดงความเป็นพิษแม้จะได้รับในปริมาณน้อยในระดับไมโครกรัมก็ตาม ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนี้เกิดจากความสามารถในการละลายของอีมาเมกติน เบนโซเอตในน้ำต่ำ ในขณะที่สามารถจับกับสารอินทรีย์ได้สูง จึงทำให้มีโอกาสที่จะสะสมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้ง่าย โดยจะส่งผลทางตรงต่อระบบประสาทไปยับยั้งสารสื่อประสาท การควบคุมการผ่านของประจุคลอไรด์ (Cl^-) ในเซลล์ทำให้สัตว์น้ำเป็นอัมพาตและตายในที่สุด และยังส่งผลต่อระบบสืบพันธุ์ ทำให้จำนวนไข่ลดลงอีกด้วย (Willis and Ling, 2003; Anderson, Doelling and Hetrick, 2009; Durkin, 2010)

2. ความเป็นพิษต่อสัตว์เลื้อยลูกด้วยน้ำนม จัดระดับความเป็นพิษอยู่ในประเภทที่ 3 ค่อนข้างมีความเป็นพิษ โดยมีทั้งพิษแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง หากได้รับแบบเฉียบพลันจะส่งผลกระทบต่อกระเพาะอาหารและปอดโดยตรง ทำให้เกิดการอักเสบ มีอาการคลื่นไส้ ปวดท้อง (Yen and Lin, 2004) ส่วนความเป็นพิษแบบเรื้อรังไม่มีข้อมูลที่บันทึกไว้อย่างชัดเจน แต่มีการศึกษาผลของอีมาเมกติน เบนโซเอตต่อระบบต่าง ๆ ในสัตว์เลื้อยลูกด้วยน้ำนม เช่น หนู สุนัข พบว่าอีมาเมกติน เบนโซเอตเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อในระบบประสาท ส่งผลให้น้ำหนักลด กล้ามเนื้อฝ่อ ยับยั้งการทำงานของเซลล์ส่งสัญญาณระบบประสาท ส่งผลต่อระบบน้ำเหลืองและเลือด รวมถึงระบบภูมิคุ้มกัน โดยจะไปเปลี่ยนลักษณะทางสัณฐานของเนื้อเยื่อในระบบ นอกจากนี้ อีมาเมกติน เบนโซเอต ยังสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของฮอร์โมนที่มาจากต่อมใต้สมองได้อีกด้วย (Niu, et al., 2019; Durkin, 2010)

ข้อมูลการจำแนกความอันตรายของสารโดย GHS (GHS Hazards Classification)

GHS (Globally Harmonized System for Classification and labeling of Chemicals) เป็นระบบการจัดกลุ่มสารเคมี การติดฉลาก และการแสดงรายละเอียดบนเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (Safety Data Sheet, SDS) เพื่อให้แต่ละประเทศสามารถเข้าใจและจำแนกความอันตรายของสารเคมีได้อย่างตรงกัน สามารถจัดเก็บสารเคมีได้อย่างถูกต้องโดยไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยระบบการจำแนกประเภทสารอันตรายต่าง ๆ

มีทั้งแบบสัญลักษณ์แสดงอันตราย (Hazard Pictogram) ซึ่งจะจำแนกตามความเสี่ยงและคุณสมบัติของสาร และแบบตัวเลข (Hazard Classes and Categories) ซึ่งแสดงถึงระดับความอันตรายจากมากไปน้อย นอกจากนี้ยังมีการบ่งบอกผลกระทบของสาร ต่อระบบร่างกายมนุษย์ เช่น สารก่อมะเร็ง (Carcinogen) สารที่เป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ (Reproductive toxicity) สารที่มีพิษแบบเฉียบพลัน (Acute toxicity) เป็นต้น (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2555; Canadian Centre for Occupational Health & Safety, 2016)

ในการบ่งบอกความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชจะใช้ระบบการจำแนกความอันตรายของสารแบบตัวเลข (Hazard Classes and Categories) ซึ่งจะแบ่งเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. ประเภท 1A ความเป็นพิษสูงมาก
2. ประเภท 1B ความเป็นพิษสูง
3. ประเภท 2 ความเป็นพิษปานกลาง
4. ประเภท 3 ค่อนข้างมีความเป็นพิษ
5. ประเภท 4 ค่อนข้างจะไม่เป็นพิษหรืออาจไม่ส่งผลกระทบใด ๆ

โดยการจำแนกในลักษณะนี้ จะใช้ค่าปริมาณของสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น (Lethal Dose fifty, LD50) เวลาที่ทำให้เกิดผลกระทบ และความรุนแรงของผลกระทบ เป็นเกณฑ์ในการจำแนก (วรวิทย์ วรภัทร์ และธณีนี วงศ์กนิษฐ, 2558)

จากข้อมูลความเป็นพิษของตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตทำให้เห็นถึงอันตรายและผลกระทบสำคัญต่อมนุษย์และระบบนิเวศ ยิ่งต้องมีการจำกัดทั้งตะกั่วและอิมามอกติน เบนโซเอตออกจากสิ่งแวดล้อมโดยเร็ว การดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กำจัดสารเหล่านี้ออกจากน้ำเสียได้ โดยปัจจุบันมีการศึกษาตัวดูดซับหลากหลายแบบ กากกาแฟเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นของเสียทางการเกษตร (Agro-Waste) ที่ราคาถูก หาได้ง่าย และยังมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นในอนาคต จากการเติบโตของธุรกิจที่มีกาแฟเป็นส่วนประกอบ

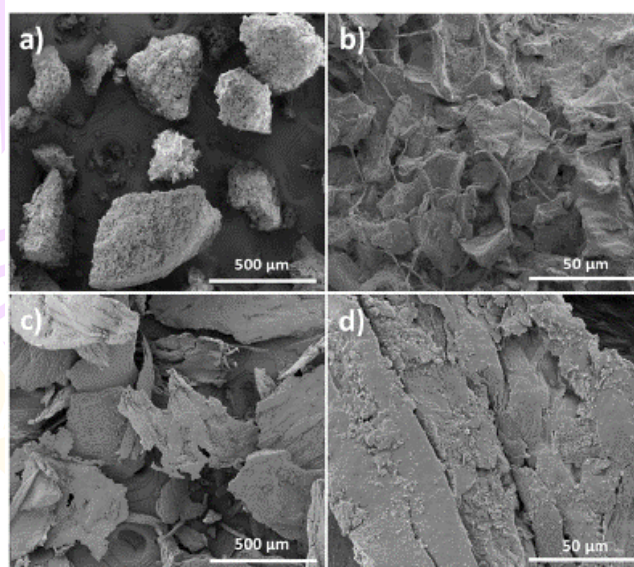
กากกาแฟ (Coffee Ground)

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่เป็นที่นิยมทั่วโลก ปัจจุบันธุรกิจร้านกาแฟมีการเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ผู้คนทั่วโลกบริโภคกาแฟเพิ่มขึ้นกว่า 2.2% ในปี 2562 คิดเป็นปริมาณกว่า 10.16 พันล้าน กิโลกรัม โดยในประเทศไทย มีการบริโภคกาแฟเพิ่มขึ้นถึง 1.8% คิดเป็นปริมาณ 85.50 ล้านกิโลกรัม (International Coffee Organization, 2020) ทำให้กากกาแฟซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการคั่วและบดเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นปริมาณมาก แม้จะมีการนำกากกาแฟไปใช้งานเป็นปุ๋ย

วัสดุปรับปรุงดิน หรือวัสดุเพื่อการขึ้นรูปต่าง ๆ แต่ด้วยปริมาณการทิ้งที่มหาศาล จึงอาจทำให้การจัดการกากกาแฟเหล่านี้ไม่เพียงพอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจการนำกากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agro-waste) มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นผิวของกากกาแฟมีลักษณะที่เป็นรูพรุน และยังมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ($C=O$) ที่มีความเป็นไปได้ในการยึดจับกับประจุบวกของสารปนเปื้อนในธรรมชาติ (McNutt and He, 2019) โดยข้อมูลลักษณะ โครงสร้าง องค์ประกอบ และคุณสมบัติของกากกาแฟ มีดังต่อไปนี้

1. ลักษณะพื้นผิวของกากกาแฟ

กากกาแฟมีลักษณะเป็นผงค่อนข้างละเอียด เนื่องจากผ่านกระบวนการทำกาแฟ มีสีน้ำตาลเข้ม สัมผัสคล้ายกับดินร่วนที่มีกากใยปนอยู่ กากกาแฟมีความชื้นสูง ดูดซับน้ำได้ดีและยังเป็นการดองอื่น ๆ จึงต้องทำให้แห้งสนิทก่อนเก็บเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา พื้นผิวของกากกาแฟมีความขรุขระและมีรูพรุน ซึ่งปริมาณของรูพรุนและขนาดของรูพรุนนี้จะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา สายพันธุ์ของกาแฟ และขั้นตอนการผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนเป็นกากกาแฟ ลักษณะภายนอกและพื้นผิวของกากกาแฟ แสดงดังภาพ 4 และ 5



ภาพ 4 ลักษณะพื้นผิวของกากกาแฟส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Ballesteros, Teixeira and Mussatto, 2014



ภาพ 5 ลักษณะภายนอกของกากกาแฟ

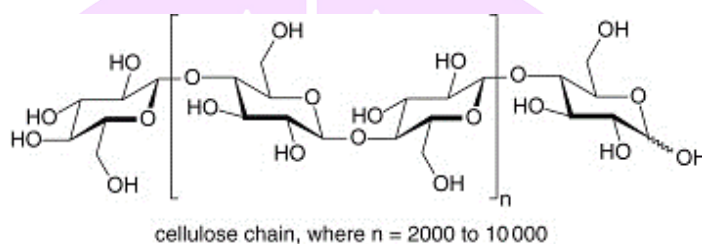
2. องค์ประกอบของกากกาแฟ

พื้นผิวของกากกาแฟมีองค์ประกอบแบบเดียวกับพืช คือมีเซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีโปรตีน ไนโตรเจนรวมอยู่ด้วย องค์ประกอบของกากกาแฟแสดงดังตาราง 1

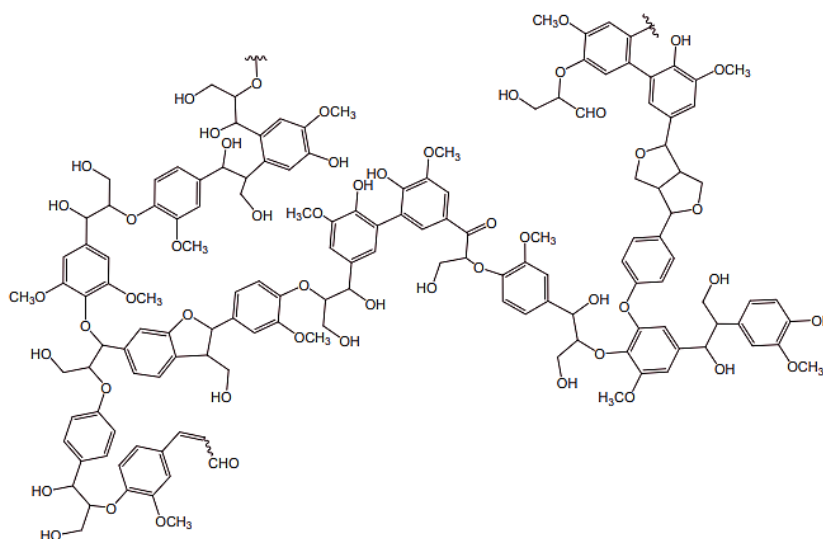
ตาราง 1 องค์ประกอบของกากกาแฟ (McNutt and He, 2019)

Component	Composition (g/100 g dry matter)
Cellulose	12.40±0.79
Hemicellulose	39.10±1.94
Arabinose	3.60±0.52
Mannose	19.07±0.85
Galactose	16.43±1.66
Lignin	23.90±1.70
Insoluble	17.59±1.56
Soluble	6.31±0.37
Ashes	1.30±0.10
Protein	17.44±0.10
Nitrogen	2.79±0.10

จากตาราง 1 เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกันคิดเป็นร้อยละ 50 ขององค์ประกอบในโครงสร้างทั้งหมด ส่วนลิกนินมีประมาณร้อยละ 23 ที่เหลือเป็นโปรตีน ไนโตรเจน และเถ้าตามลำดับ โครงสร้างของเซลลูโลสและลิกนินประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดพันธะไฮโดรเจนและสามารถแตกตัวเป็นหมู่ออกซี ($-O-$) ที่จับกับประจุบวกของโลหะหนักและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ได้ โครงสร้างของเซลลูโลสและลิกนิน แสดงดังภาพ 6 และ 7



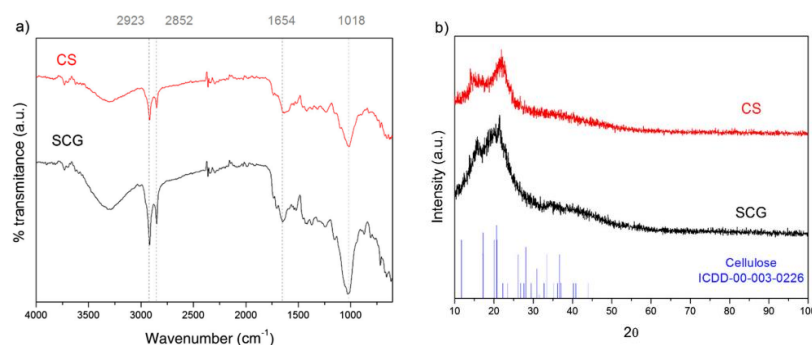
ภาพ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส (Rudnik, 2013)



ภาพ 7 โครงสร้างของลิกนิน (Adler, 1977)

โดยสามารถยืนยันโครงสร้างและองค์ประกอบของกากกาแฟได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผง (Powder X-ray Diffractometer)

และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววากกาแฟด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy : FT-IR) ซึ่งแสดงผลเป็นกราฟดังภาพ 8



ภาพ 8 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด, FT-IR (ภาพ a) และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผง, XRD (ภาพ b) ของวากกาแฟ (SCG) และเยื่อหุ้มเมล็ดกาแฟ

ที่มา: (CS) Ballesteros, L.F., et. al., 2014

3. ปัจจัยที่ทำให้กาแฟจากแต่ละที่แตกต่างกัน

กาแฟมีหลากหลายสายพันธุ์ โดยแต่ละสายพันธุ์ก็มีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่ต่างกัน ไม่เพียงเท่านั้นถึงแม้จะเป็นกาแฟสายพันธุ์เดียวกันแต่ถ้าปลูกในพื้นที่ต่างกัน ก็มีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่ต่างกันได้ (Dai, et. al., 2019)



ภาพ 9 ความแตกต่างของกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าและโรบัสต้า

ที่มา: Aroma Group, 2014

กาแฟที่คนไทยนิยมนำมาสกัดเป็นเครื่องดื่มส่วนมากมีเพียง 2 สายพันธุ์ ได้แก่ อาราบิก้า และโรบัสต้า โดยสายพันธุ์อาราบิก้าจะมีปริมาณคาเฟอีนน้อย แต่มีปริมาณน้ำตาลและความเป็นกรดสูง จะถูกทำเป็นกาแฟคั่วบดเพื่อใช้ในการสกัดด้วยเครื่องตามร้านกาแฟส่วนใหญ่ ส่วนสายพันธุ์โรบัสต้า จะถูกนำไปทำเป็นกาแฟสำเร็จรูป (3 in 1) เนื่องจากมีปริมาณคาเฟอีนที่สูง (Aroma Group, 2014)

การคั่วกาแฟเป็นขั้นตอนหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของเมล็ดกาแฟอย่างมาก โดยการคั่วมีหลายระดับตั้งแต่คั่วอ่อน คั่วกลาง และคั่วเข้ม โดยต่างกันที่อุณหภูมิที่ใช้ในการคั่ว ซึ่งจะอยู่ในช่วง 120 – 300 องศาเซลเซียส (Siam Roastery, 2021; Hillkoff H Innovation Center, 2022) การคั่วจะทำให้ น้ำและน้ำมันหอมระเหยบางส่วนระเหยออกไป ส่งผลให้ความเป็นกรดลดลง และจะเกิดแรงดันต่อผนังเซลล์ทำให้เมล็ดกาแฟขยายตัว และแตกออก จึงส่งผลต่อรูพรุนของกาแฟคั่วด้วย โดยกาแฟคั่วอ่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบน้อยที่สุด ขณะที่คั่วเข้มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

จะเห็นว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้กาแฟมีองค์ประกอบและคุณสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักของกาแฟที่ทุกสายพันธุ์และทุกพื้นที่ที่ย่อมมีเหมือนกันคือเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งองค์ประกอบนี้เป็นโครงสร้างสำคัญที่จะทำให้เกิดการดูดซับได้ โดยในการวิจัยนี้จะควบคุมความแตกต่างของกาแฟ โดยใช้กาแฟจากร้านกาแฟแห่งเดียวกันในทุก ๆ การดูดซับ

การประยุกต์ใช้กาแฟเป็นตัวดูดซับ

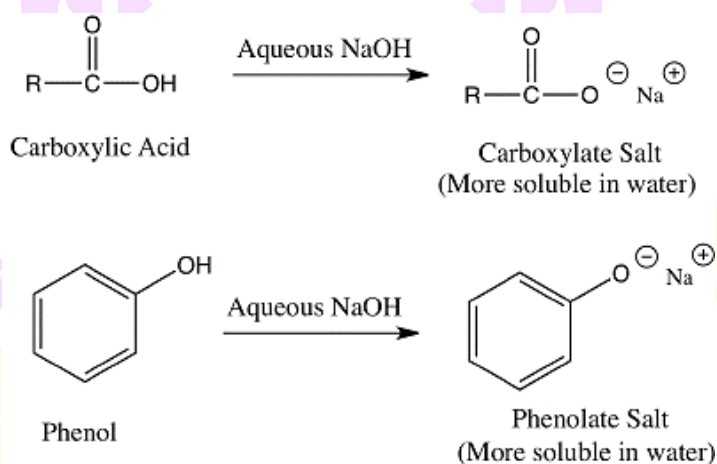
กาแฟมีพื้นผิวที่ขรุขระ มีรูพรุน และมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่พื้นผิว จึงคาดว่า จะสามารถดูดซับสารอินทรีย์หรือสารปนเปื้อนที่เป็นประจุบวกได้ โดยปัจจุบันมีการศึกษาการใช้กาแฟเป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนมากมาย ทั้งโลหะหนัก (Cherdchoo, Nithettham and Charoenpanich, 2019) ยาฆ่าแมลง (Al-Zaben and Mekhamer, 2017) และยาปฏิชีวนะ (Dai, et al., 2019) รวมถึงมีการศึกษาการทำถ่านกัมมันต์จากกาแฟเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (Kim et al., 2014; Wen et al., 2019) การใช้กาแฟเป็นตัวดูดซับ แสดงดังตาราง 2

ตาราง 2 การใช้กากกาแฟและถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเป็นตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ศึกษา	สารปนเปื้อน	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ที่มา
กากกาแฟ	เมทิลีนบลู (methylene blue)	23	Franca, Oliveira and Ferreira, 2009
กากกาแฟ	ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	117.2	Dai, Zhang and Zhang, 2016
กากกาแฟดัดแปลงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH-modified spent coffee ground)	ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	169.4	Dai, Zhang and Zhang, 2016
กากกาแฟ	4-chloro-2-methyl phenoxy acetic acid	340	Al-Zaben and Mekhamer, 2017
ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ	ไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin)	54.64	ศรัณย์ จิตตวนิช ปรึกษา, 2554
กากกาแฟ	เตตราไซคลิน (tetracycline)	64.89 และ 123.46	Dai, et al., 2019
กากกาแฟ	แคดเมียม (Cd^{2+})	15.65	Azouaou, et al., 2010
กากกาแฟตรึงเป็นเม็ด (Immobilized coffee ground beads)	เงิน (Ag^+)	39.583	Jeon, 2017
กากกาแฟ	โครเมียม (Cr^{6+})	87.72	Cherdchoo, Nithettham and Charoenpanich, 2019

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากากกาแฟสามารถดูดซับโลหะหนักและสารอินทรีย์บางชนิดได้ โดยมีหลายงานวิจัยที่ทำการดัดแปลงกากกาแฟธรรมดาให้สามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้มากขึ้น เช่น การเผากากกาแฟทำเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) การดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH-modified spent coffee ground) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟโดยดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวของกากกาแฟด้วยต่าง 2 ชนิด คือ โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต เนื่องจากวิธีนี้มีกระบวนการเตรียมที่ค่อนข้างง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เยอะ และต่างทั้ง 2 ชนิด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม มีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ง่าย

การดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวนี้อาศัยหลักการการทำให้เป็นกลางด้วยต่าง (Neutralization) เนื่องจากกากกาแฟมีสภาพเป็นกรดจากสารที่เป็นองค์ประกอบ ทั้งกรดฟีนอลิก (Phenolic acid) กรดแลคติก (Lactic acid) และกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) โดยกรดเหล่านี้จะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งจะถูกละลายด้วยต่างและแตกตัวเป็นหมู่ออกซี (-O-) ที่สามารถจับกับประจุบวกของสารปนเปื้อนได้ (Dai, Zhang and Zhang, 2016)

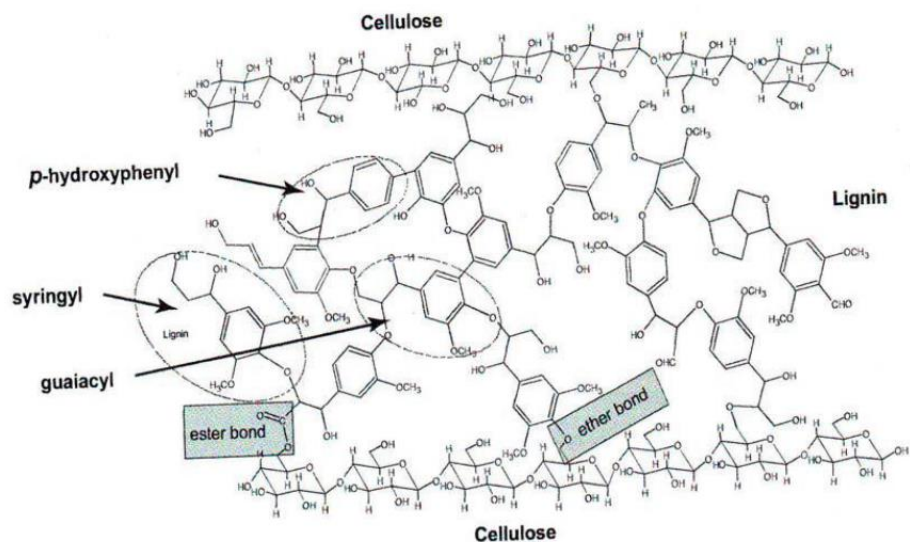


ภาพ 10 การทำให้เป็นกลางด้วยต่าง

ที่มา: www2.ups.edu/courses/organicchemlab/c250lab.10/aqsolubility.htm

การปรับสภาพให้เป็นกลางนี้เป็นการเตรียมพื้นที่ผิวของกากกาแฟให้พร้อมสำหรับจับกับสารปนเปื้อนและปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการดูดซับ นอกจากนี้ต่างที่ใช้จะไปทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน ทั้งยังช่วยกำจัดลิกนินบางส่วนที่บดบังพื้นที่การดูดซับ

จึงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของกากกาแฟให้สามารถจับกับสารปนเปื้อนได้มากขึ้นอีกด้วย (Maryana et al., 2014)

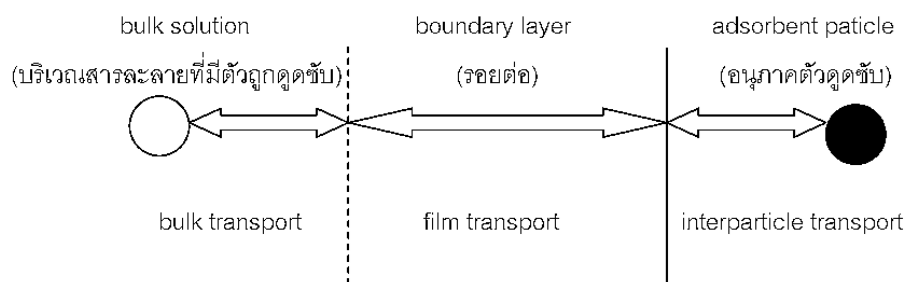


ภาพ 11 การสร้างพันธะระหว่างลิกนินและเซลลูโลส

ที่มา: Maryana et al., 2014

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

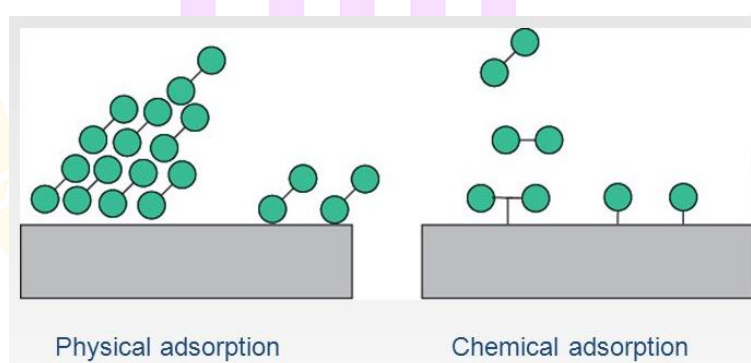
การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) ของสาร การดูดซับสามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 ชนิดในสภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดจับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) (วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, 2558)



ภาพ 12 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

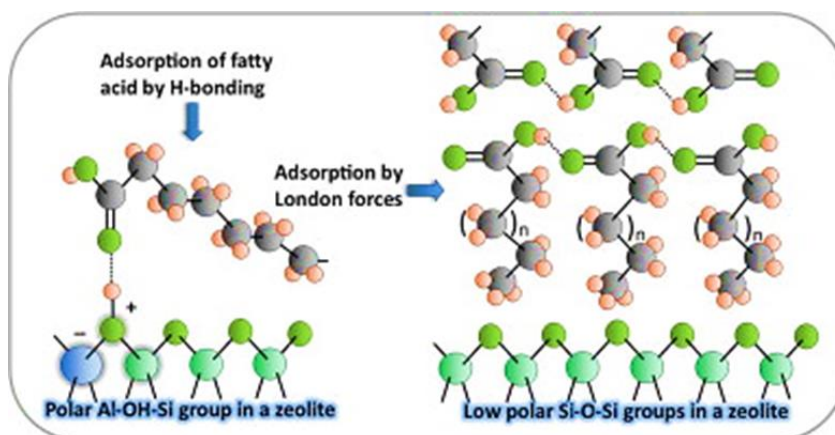
ที่มา: ไกรศรี ทองเสมียน, 2551

การยึดติดกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้นจะอาศัยแรงยึดเหนี่ยว อาจจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีก็ได้ โดยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพจะเป็นแรงอ่อน ๆ เกิดระหว่างโมเลกุลของสาร เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ส่วนแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีจะเกิดการสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุล มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความแตกต่างของแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมีแสดงดังภาพ 12, 13 และ 14



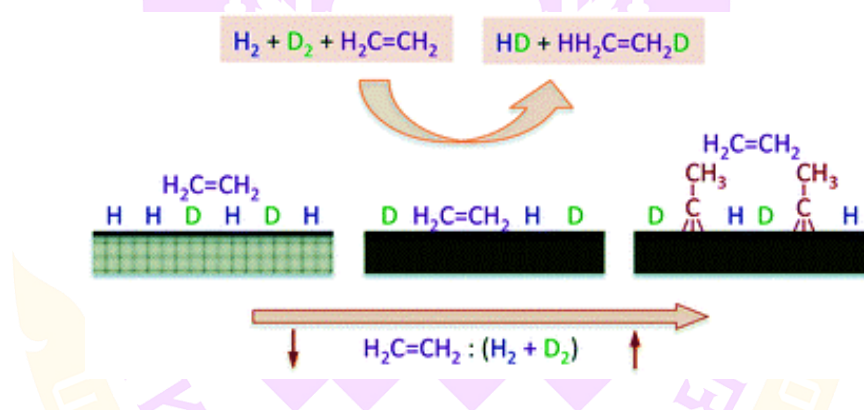
ภาพ 13 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี

ที่มา: vivadifferences.com/physical-and-chemical-adsorption



ภาพ 14 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี

ที่มา: Isernia, 2014



ภาพ 15 การดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

ที่มา: Dong and Zaera, 2017

การศึกษากระบวนการดูดซับของสารโดยส่วนมากจะศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) แบบจำลองการดูดซับ (Adsorption isotherm) และจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetics) โดยศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่าง ๆ หรือหาความเป็นไปได้ในการใช้งานตัวดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพในระบบบำบัดของเสียแต่ละแบบ สิ่งที่ต้องศึกษาในกระบวนการดูดซับ มีดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ความสามารถในการดูดซับจะบ่งบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ หากมีความสามารถในการดูดซับสูงแสดงว่าตัวดูดซับนั้นสามารถดูดซับสารได้ปริมาณมาก เมื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแล้วจะสามารถพิจารณาต่อได้ว่าจะนำตัวดูดซับนี้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างไรและเหมาะสมกับงานแบบไหน (Luo, Ding and Luo, 2015; Maranescu, Lupa and Visa, 2017)

ความสามารถในการดูดซับสามารถหาได้จากการทดลอง โดยแทนค่าความเข้มข้นของสาร ปริมาตรสารละลายและมวลของตัวดูดซับจากการทดลองในสมการต่อไปนี้

$$Q_e = \frac{C_0V - C_eV}{m} \quad (1)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

m คือ มวลของตัวดูดซับ ในหน่วยกรัม

V คือ ปริมาตรของสารละลาย ในหน่วยลิตร

2. แบบจำลองการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

แบบจำลองการดูดซับสามารถบอกลักษณะการดูดซับได้ โดยจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (วรวิทย์ จันทรสุวรรณ, 2558) แบบจำลองที่นิยมใช้ศึกษากันมาก ได้แก่ แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และแบบจำลองฟรอยด์ลิช (Freundlich Isotherm) โดยแบบจำลองแต่ละแบบจะแสดงการดูดซับที่แตกต่างกัน อธิบายได้ดังนี้

2.1 แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ถูกนำเสนอโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดและเป็นแบบจำลองแบบแรกที่ได้รับการเสนอขึ้นมาโดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎี จากการที่แบบจำลองนี้มีความเรียบง่าย จึงมักถูกใช้เป็นสมการเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยการดูดซับแบบแลงเมียร์ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับอยู่บนตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอน และจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวแบบชั้นเดียว เมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับทั้งหมดแล้วจะไม่เกิดการดูดซับขึ้นอีก

กราฟการดูดซับแบบแลงเมียร์ จะสร้างระหว่าง C_e กับ $\frac{C_e}{Q_e}$ และได้สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังนี้

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (2)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกกรัม

Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกกรัม

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ซึ่งแสดงสัมพรรคภาพระหว่างสารละลายและตัวดูดซับ ในหน่วยลิตรต่อมิลลิกรัม

2.2 แบบจำลองฟรอยด์ลิช (Freundlich Isotherm)

แบบจำลองฟรอยด์ลิช (Freundlich Isotherm) ถูกเสนอโดย Herbert Max Freundlich ในปี ค.ศ. 1909 การดูดซับแบบฟรอยด์ลิชสามารถเกิดได้หลายชั้นแบบไม่มีขีดจำกัด แต่ในความเป็นจริงนั้นสารดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับสารอื่นได้เพียงแต่ระดับหนึ่งเท่านั้น การเพิ่มความดันหรือความเข้มข้นของสารดูดซับจะไม่ทำให้ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขีดจำกัด ดังนั้นแบบจำลองของฟรอยด์ลิช จึงมีปัญหามากเมื่อพื้นผิวได้ทำการดูดซับสารเอาไว้จนใกล้จุดอิ่มตัว

กราฟการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช จะสร้างระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log Q_e$ และได้สมการการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช ดังนี้

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกกรัม

n คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความสามารถในการดูดซับ

$K_F (mg^{(1 - (1/n))} \cdot L^{(1/n)} \cdot g^{-1})$ คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความสามารถในการดูดซับ

3. จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetics)

สมการจลนพลศาสตร์ใช้อธิบายอันดับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถบอกจำนวนและปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยากันจนเกิดสภาวะสมดุล จนถึงบ่งบอกอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยในกระบวนการดูดซับมักจะใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมหรือสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการอธิบายปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ สมการอันดับเทียมนี้ต่างจากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reaction) และอันดับสอง

(Second-order reaction) เนื่องจากการเป็นสมมุติให้ความเข้มข้นของสารที่ไม่ได้สนใจคงที่ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของสารที่สนใจเท่านั้น

3.1 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order reaction)

เป็นปฏิกริยาที่อัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกริยาหนึ่งหรือสองตัว ได้แก่ ตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ โดยจะกำหนดให้ความเข้มข้นของตัวดูดซับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงถือว่าอัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพียงอย่างเดียว

กราฟปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม จะสร้างระหว่าง $\log (Q_e - Q_t)$ กับ t จะได้สมการปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังนี้

$$\log (Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 Q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม
 t คือ เวลาที่ใช้ดูดซับ

3.2 ปฏิกริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order reaction)

เป็นปฏิกริยาที่อัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกริยาสองหรือสามตัว ได้แก่ ตัวดูดซับ สารที่ถูกดูดซับ และอาจมีสารอื่นที่อยู่ในระบบ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของตัวดูดซับคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงถือว่าอัตรา-การเกิดปฏิกริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับและสารอื่นที่อยู่ในระบบ หรืออาจขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่มีอันดับปฏิกริยาของสารเท่ากับ 2

กราฟปฏิกริยาอันดับสองเทียม จะสร้างระหว่าง $\frac{1}{Q_t}$ กับ t จะได้สมการปฏิกริยาอันดับสองเทียม ดังนี้

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (5)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 Q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 k_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกริยาอันดับสองเทียม
 t คือ เวลาที่ใช้ดูดซับ

การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics)

เทอร์โมไดนามิกส์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังงาน (Energy) ความร้อน และงานของสสารต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนรูปของพลังงาน การถ่ายโอนพลังงาน และสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของสาร จึงใช้เพื่อออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ และออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันได้มากมาย เช่น เครื่องทำความเย็น ระบบรถยนต์ เครื่องบิน โรงจักรกำลัง เป็นต้น (รัชชาติ ไตรผล, ม.ป.ป.; ienergyguru, 2558) พื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์อธิบายด้วยกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ข้อ (โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ องค์การมหาชน, ม.ป.ป.) ดังนี้

1. กฎข้อที่ 0 กล่าวถึงสมดุลทางความร้อนในระบบ โดยหากมี 3 ระบบที่สามารถถ่ายเทความร้อนไปมาระหว่างกันได้ แล้วระบบ 1 กับระบบ 2 อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน และระบบ 2 กับระบบ 3 อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนเช่นกัน นั่นหมายความว่าระบบ 1 กับระบบ 3 อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนด้วยนั่นเอง

2. กฎข้อที่ 1 กฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) กล่าวว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้

3. กฎข้อที่ 2 เกี่ยวกับเอนโทรปี (Entropy, S) ซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเกิดปฏิกิริยา โดยเอนโทรปีจะเพิ่มขึ้นเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เอง และคงที่เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล

4. กฎข้อที่ 3 นิยามค่าเอนโทรปีของระบบที่ 0 เคลวิน ว่าค่าเอนโทรปีของระบบผลึกที่สมบูรณ์แบบที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีค่าเท่ากับ 0

ซึ่งในระบบการดูดซับจะใช้สมการเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่ออธิบายความร้อนและสมดุลในระบบ (Dai, Zhang and Zhang, 2016) สมการแสดงดังต่อไปนี้

$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{C_{ad,e}}{C_e} \quad (6)$$

$$\ln \frac{C_{ad,e}}{C_e} = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{R T} \quad (7)$$

เมื่อ ΔG^0 คือ พลังงานอิสระ (Gibb free energy) ในหน่วยกิโลจูลต่อโมล

ΔS^0 คือ พลังงานความร้อนแฝงเอนโทรปี ในหน่วยจูลต่อโมลเคลวิน

ΔH^0 คือ พลังงานความร้อนเอนทัลปี ในหน่วยกิโลจูลต่อโมล

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมลเคลวิน

T คือ อุณหภูมิ ในหน่วยเคลวิน

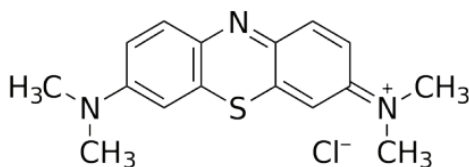
$C_{ad,e}$ คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการใช้กากกาแฟเป็นตัวดูดซับนั้นมีมาตั้งแต่ปี 2009 จนถึงปัจจุบัน ในทุกงานวิจัยที่ทำการศึกษากากกาแฟอธิบายว่ากากกาแฟเป็นวัสดุที่ราคาถูกและหาได้ง่าย และยังพบว่าพื้นผิวกากกาแฟมีรูพรุนเหมาะกับการใช้เป็นตัวดูดซับ นักวิจัยทดสอบใช้กากกาแฟดูดซับสารปนเปื้อนมากมายที่เป็นปัญหาลิ่งแวดล้อม ทั้งสารอินทรีย์และโลหะหนัก โดยเริ่มจากการดูดซับสารอินทรีย์ขนาดเล็ก จากนั้นจึงเริ่มมีการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟด้วยวิธีต่าง ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

ในปี 2009 Franca, Oliveira และ Ferreira ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) ออกจากน้ำเสียด้วยกากกาแฟ เมทิลีน บลูเป็นสีย้อมอินทรีย์มีประจุเป็นบวก ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมากมาย ทั้งการผลิตกระดาษ ยาง พลาสติก จึงถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำ เพิ่มค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical oxygen demand, COD) ในน้ำ ส่งผลให้น้ำเน่าเสีย จากการทดลองพบว่ากากกาแฟสามารถดูดซับเมทิลีน บลูได้สูงสุด 18.7 มิลลิกรัมต่อกกรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยความสามารถในการดูดซับไม่ขึ้นกับค่า pH และสามารถอธิบายรูปแบบการดูดซับได้ด้วยแบบจำลองเทมปีคิน (Temkin model) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จากผลการดูดซับพบว่ากากกาแฟสามารถดูดซับสีย้อมซึ่งเป็นสารอินทรีย์ขนาดเล็กได้

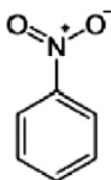


ภาพ 16 โครงสร้างของเมทิลีน บลู

ที่มา: โกวิท ปิยะมั่งคณา และคณะ, 2018

ต่อมาเมื่อมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักในดินและน้ำ โดยมีการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟด้วยวิธีการเผาเป็นถ่านกัมมันต์ก่อนนำมาใช้งาน (Kim, et al., 2014) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากกากกาแฟสามารถดูดซับโลหะหนักบางชนิดได้มากกว่ากากกาแฟ นอกจากนี้ยังปรับสภาพความเป็นกรด ทำให้ค่า pH สูงขึ้น เหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่น้ำเสียเป็นกรด อย่างไรก็ตามการใช้กากกาแฟในการบำบัดดินที่ถูกปนเปื้อนอาจเป็นพิษต่อพืชที่ปลูกในดินนั้น ทำให้การเจริญเติบโตช้าลงได้

หลังจากนั้นในปี 2016 Dai, Zhang และ Zhang ได้ศึกษาวิธีการดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวของกากกาแฟด้วยต่าง โดยทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของกากกาแฟด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH-SCG) สำหรับดูดซับไนโตรเบนซีนจากน้ำเสีย จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของ NaOH-SCG เปรียบเทียบกับกากกาแฟที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใด ๆ (SCG) พบว่า NaOH-SCG ดูดซับไนโตรเบนซีนได้มากกว่า SCG ความสามารถในการดูดซับของ NaOH-SCG และ SCG เท่ากับ 169.4 และ 117.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ตัวดูดซับทั้งสองสามารถดูดซับไนโตรเบนซีนได้อย่างรวดเร็วในเวลา 30 นาที และอธิบายรูปแบบการดูดซับได้ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์

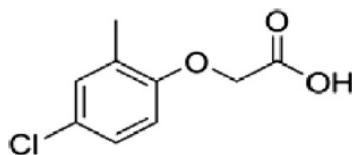


ภาพ 17 โครงสร้างของไนโตรเบนซีน

ที่มา: Dai, Zhang and Zhang, 2016

ต่อมาในปี 2017 Al-Zaben และ Mekhamer ได้นำกากกาแฟไปกำจัด 4-คลอโร-2-เมทิล ฟีนอกซี แอซิดิก แอซิด (MCPA) ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืช อยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอกซี (Phenoxy compounds) จัดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ โดย Al-Zaben และ Mekhamer ได้ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของ MCPA ต่อการดูดซับ และผลของค่า pH ต่อการดูดซับ พบว่าการดูดซับไม่ขึ้นอยู่กับค่า pH และกากกาแฟสามารถดูดซับ MCPA ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ได้ในปริมาณเท่า ๆ กัน อีกทั้งยังดูดซับได้รวดเร็วในเวลาไม่กี่นาที แล้วเข้าสู่สมดุลภายใน 5 นาที โดยรูปแบบการดูดซับ

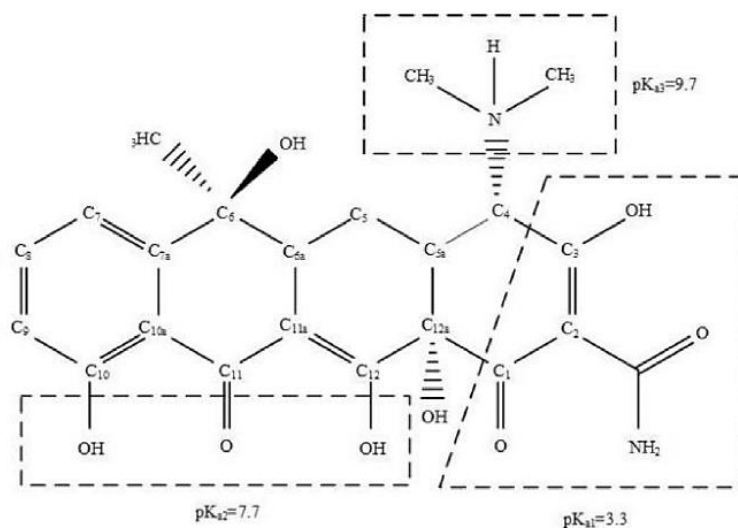
เป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ อธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับสอง เทียม ทั้งนี้สามารถยืนยันได้ว่ากากกาแฟสามารถดูดซับ MCPA ได้ดี



ภาพ 18 โครงสร้างของ 4-คลอโร-2-เมทิล ฟีนอกซี แอซิติก แอซิด (MCPA)

ที่มา: Al-Zaben and Mekhamer, 2017

ล่าสุดในปี 2019 Dai และคณะ ได้เปรียบเทียบการใช้งานกากกาแฟพันธุ์อาราบิก้า จากสตาร์บัค 2 แห่ง ได้แก่ มณฑลไห่หนาน (SCG-1) และมณฑลยูนนาน (SCG-2) ประเทศจีน โดยจะใช้กากกาแฟเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดเตตระไซคลิน (Tetracycline) ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะ ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ออกจากแหล่งน้ำ ผลการดูดซับพบว่า SCG-1 สามารถดูดซับ เตตระไซคลินได้ 64.89 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ SCG-2 ดูดซับได้ถึง 123.46 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า SCG-1 เกือบ 2 เท่า การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาที่ใช้ ในการดูดซับ ค่า pH เริ่มต้น ปริมาณของตัวดูดซับ พบว่าการดูดซับเกิดได้เร็วและเข้าสู่สมดุล ที่เวลาประมาณ 20 นาที ดูดซับได้ดีที่ค่า pH เป็นกลาง ปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม อยู่ที่ประมาณ 0.6 กรัมต่อลิตร รูปแบบการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ เกิดการดูดซับ ด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรง $\pi-\pi$ ซึ่งมีความแข็งแรง ผลการวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ว่ากาก กาแฟที่มาจากแหล่งที่ต่างกันนั้นสามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้ในปริมาณต่างกัน แม้ว่าจะเป็นสายพันธุ์เดียวกันก็ตาม



ภาพ 19 โครงสร้างของเตตระไซคลิน (Tetracycline)

ที่มา: Dai, et al., 2019

ในปีเดียวกัน Cherdchoo, Nithettham และ Charoenpanich (2019) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับบนกากกาแฟและกากชา โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ ค่า pH เริ่มต้น อุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ และศึกษารูปแบบการดูดซับ พบว่ากากกาแฟและกากชาสามารถดูดซับโครเมียมได้ดี สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมตั้งแต่ 10–30 มิลลิกรัมต่อลิตร ดูดซับที่ pH เท่ากับ 2 เป็นเวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร รูปแบบการดูดซับบน ตัวดูดซับทั้งสองเป็นไปตามแบบจำลองฟรอยด์ลิช เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพบว่ากากชาดูดซับโครเมียมได้ 94.34 มิลลิกรัมต่อกรัม สูงกว่ากากกาแฟซึ่งดูดซับโครเมียม ได้ 87.72 มิลลิกรัมต่อกรัม

ในการศึกษากระบวนการดูดซับสารปนเปื้อนด้วยกากกาแฟ โดยทั่วไปจะศึกษาความสามารถในการดูดซับ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อน เวลาที่ใช้ในการดูดซับ และรูปแบบการดูดซับตามแบบจำลองแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองอ้างอิงตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ การทดลองการดูดซับอย่างง่าย รวมถึงวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของ ตัวดูดซับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Lead AAS standard solution 1000 mg/L Pb in diluted HNO_3 traceable to NIST)
2. อีมาเมกติน เบนโซเอต แบบผง ความเข้มข้น 5% โดยมวล (The next, Emamectin-benzoate 5%WG)
3. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
4. กรดไนตริก (65% Nitric acid, HNO_3)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
6. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3)
7. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3)
8. กากกาแฟจากร้านไนน์คอฟฟี่ (Spent coffee ground)

อุปกรณ์

1. กระดาษชั่งสาร (Weighing papers)
2. ช้อนตักสาร (Spatula)
3. ขวดใส่สารและฝาปิด ขนาด 10 และ 15 มิลลิลิตร (Vial)
4. กระบอกตวง ขนาด 10 มิลลิลิตร (Cylinder)
5. บีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250 มิลลิลิตร (Beaker)
6. ไมโครปิเปต ขนาด 100–1000 ไมโครลิตร และทิป (Micropipette and Tip)
7. หลอดหยดสาร (Dropper)
8. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)

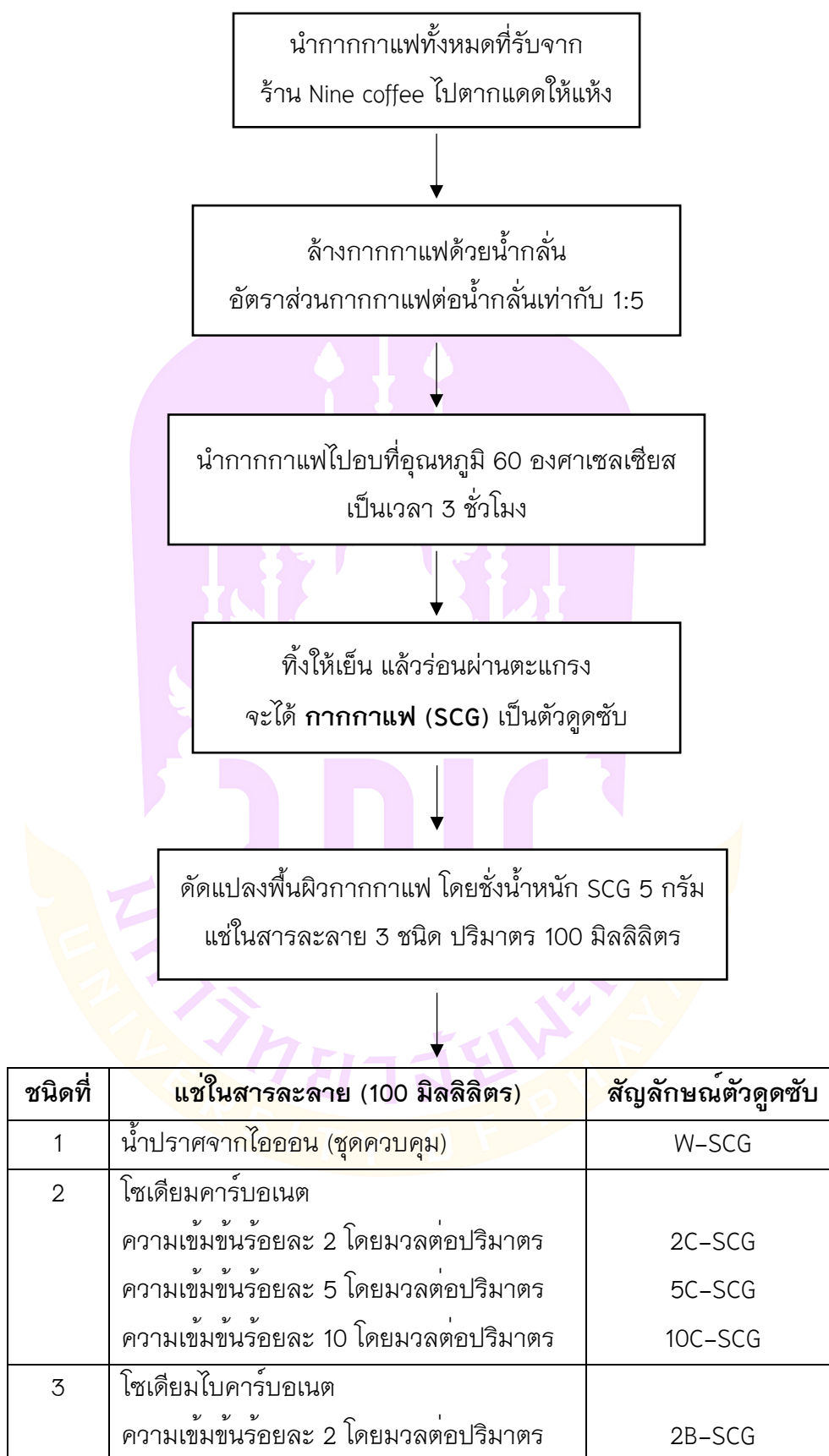
9. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร (Volumetric flask)
10. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร (Erlenmeyer flask)
11. ขวดโพลีเอทิลีน ขนาด 60 มิลลิลิตร (Polyethylene bottle)
12. กระดาษกรอง เบอร์ 42 (Filter paper no.42)
13. ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration)
14. กรวยกรอง (Funnel)
15. กระดาษฟอยล์ (Foil)
16. พาราฟิล์ม (Parafilm)
17. ตะแกรงร่อนสาร (Wire mesh)

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องเขย่าขวดสาร (Shaker)
3. ตู้อบ (Oven)
4. เครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Powder X-Ray Diffractometer : PXRD, Rikagu, MiniFlex600, $2\theta = 5-60^\circ$)
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR, Thermo Scientific Nicolet, iD5 ATR, $4000-400\text{ cm}^{-1}$)
6. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะด้วยการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectroscopy : AAS)
7. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Ultraviolet-Visible Spectroscopy : UV-VIS)

การเตรียมตัวดูดซับ (Dai, Zhang and Zhang, 2016)

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด ได้แก่ กากกาแฟ กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไฮดรอกซิล กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมโบรไมด์ โดยกากกาแฟที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดรับมาจากร้าน Nine coffee หน้าศูนย์บรรณาสาร มหาวิทยาลัยพะเยา โดยสามารถสรุปขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ ได้ดังแผนภาพต่อไปนี้



ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร	5B-SCG
ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร	10B-SCG

↓

เขย่าทุกตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

↓

กรองกากกาแฟออกจากสารละลาย

↓

นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

↓

ทิ้งให้เย็น แล้วร่อนผ่านตะแกรง
จะได้ตัวดูดซับ แสดงดังตาราง 3

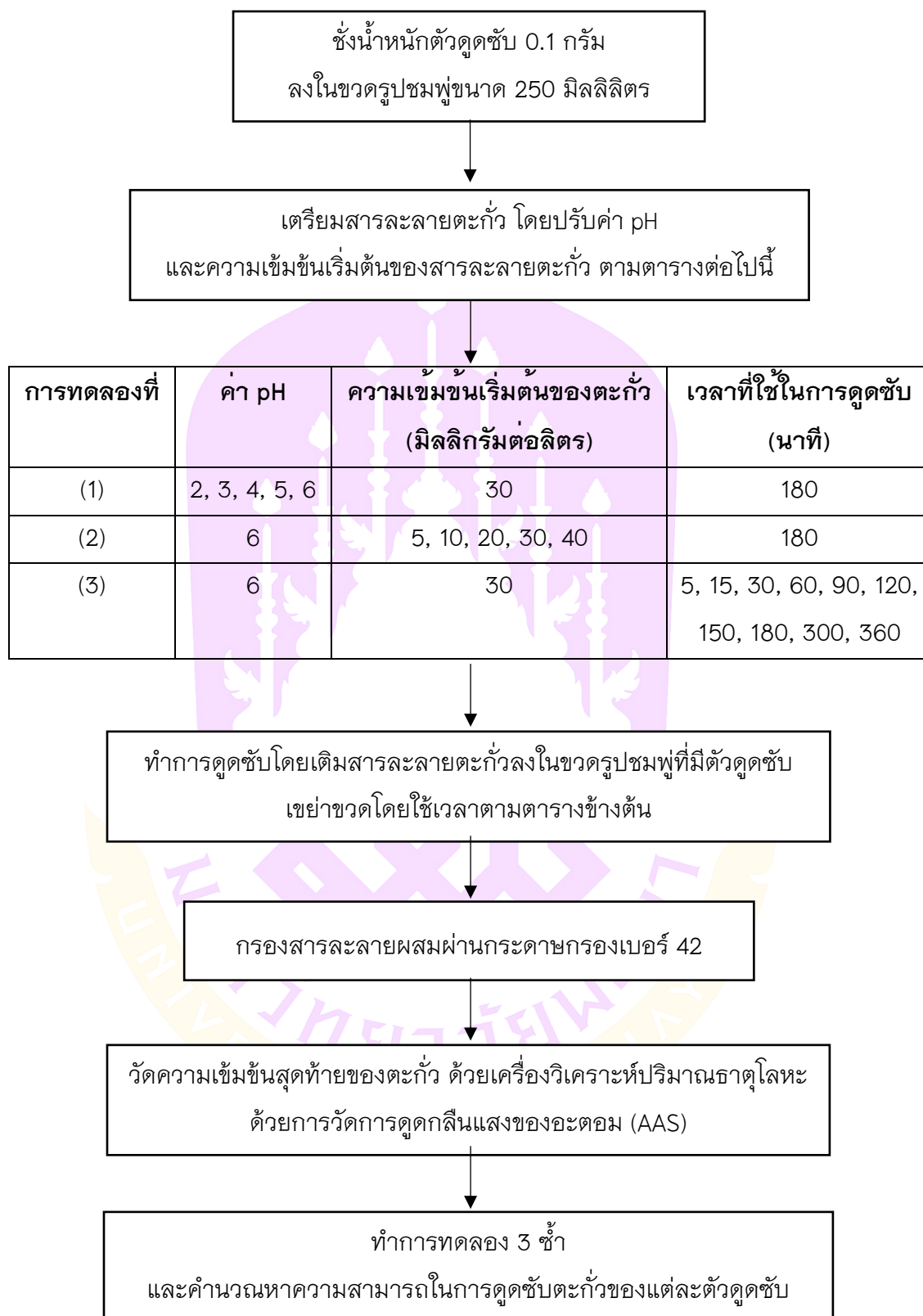
ภาพ 20 สรุปขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ

ตาราง 3 สรุปตัวดูดซับทั้งหมดในการทดลอง

ลำดับ	ตัวดูดซับ	สัญลักษณ์ตัวดูดซับ
1	กากกาแฟ	SCG
2	กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (ชุดควบคุม)	W-SCG
3	กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต	
	ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร	2C-SCG
	ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร	5C-SCG
	ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร	10C-SCG
4	กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต	
	ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร	2B-SCG
	ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร	5B-SCG
	ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร	10B-SCG

การทดลองดูดซับตะกั่ว (Cherdchoo, Nithettham and Charoenpanich, 2019)

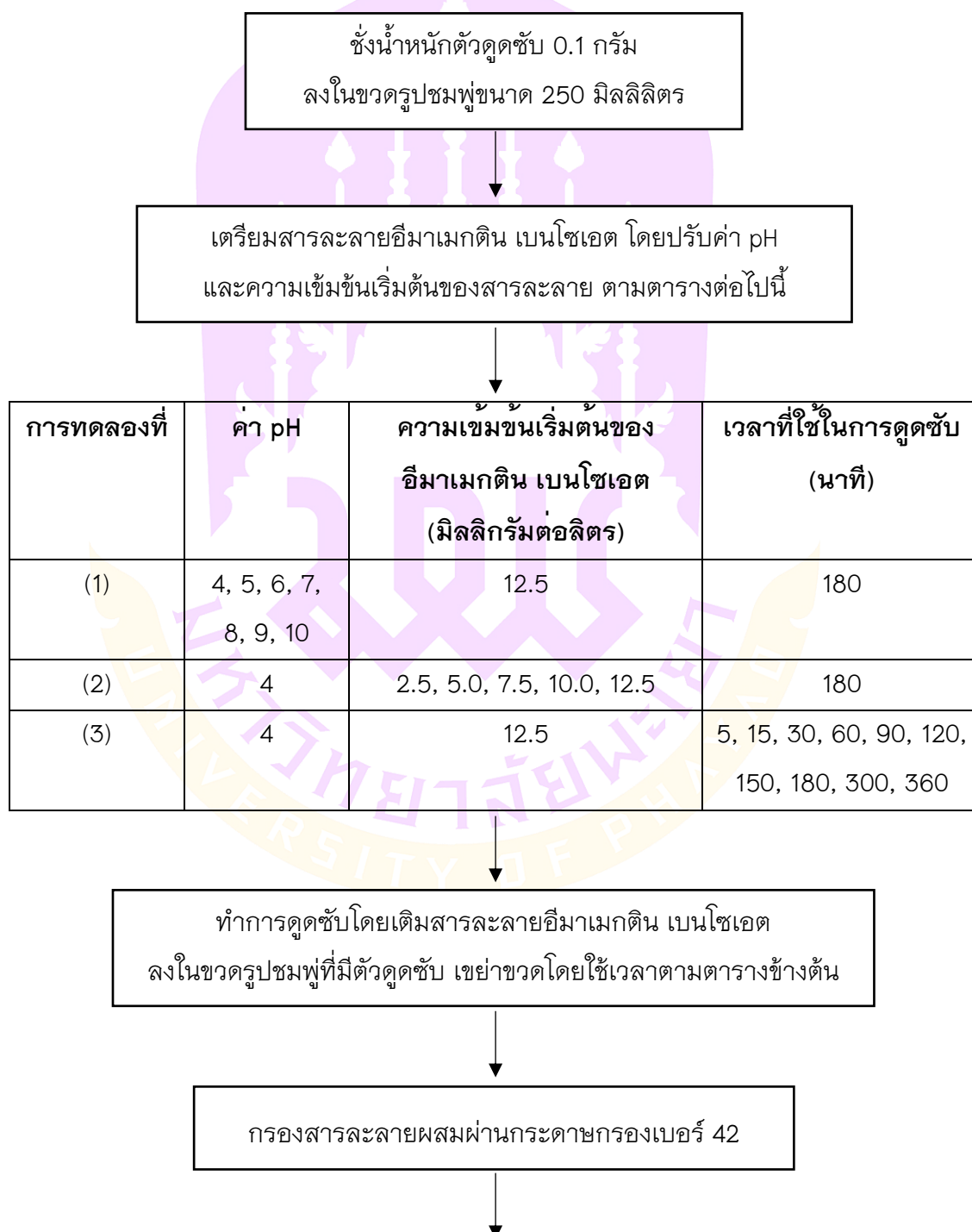
การดูดซับตะกั่วจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ซึ่งแต่ละการทดลองจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับต่าง ๆ ได้แก่ (1) ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ (2) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว และ (3) เวลาที่ใช้ในการดูดซับ สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังแผนภาพต่อไปนี้

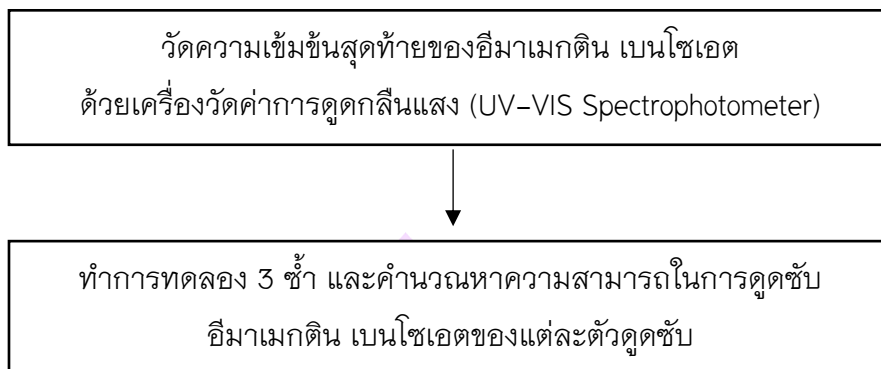


ภาพ 21 สรุปขั้นตอนการทดลองดูดซับตะกั่ว

การทดลองดูดซับสารอีมาเมกดิน เบนโซเอต (Dai, et al., 2019)

การดูดซับสารอีมาเมกดิน เบนโซเอตจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลองเช่นเดียวกับการดูดซับตะกั่ว โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับต่าง ๆ ได้แก่ (1) ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ (2) ความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกดิน เบนโซเอต และ (3) เวลาที่ใช้ในการดูดซับ สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังแผนภาพต่อไปนี้





ภาพ 22 สรุปขั้นตอนการทดลองดูดซับสารอีมาเมกติน เบนโซเอต

การศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ

วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของแต่ละตัวดูดซับ โดยมีเทคนิคและวิธีการเตรียมการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผง (Powder X-ray Diffractometer : XRD) มีขั้นตอนการเตรียมสารเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง ดังนี้

1.1 บดสารตัวอย่างให้เป็นผงละเอียดด้วยโกร่งบดสาร

1.2 นำสารตัวอย่างใส่ในช่องใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) แล้วใช้แผ่นสไลด์ (Glass slide) กดอัดให้แน่น

1.3 วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผง โดยใช้ช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 5–60 องศา

2. เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy : FT-IR) จะวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยมีเทคนิคและวิธีการเตรียมการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

2.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึก (Crystal plate) และหัวโพรบ (Probe) ด้วยเอทานอล

2.2 เปิดโปรแกรม Ormnic ทำการวัด Background โดยใช้แผ่นผลึกเปล่า

2.3 วางสารตัวอย่างบนแผ่นผลึก จากนั้นหมุนหัวโพรบให้ทับสารตัวอย่างบนแผ่นผลึก

2.4 วัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) iD5 ATR จำนวนลูกคลื่นต่อเซนติเมตร $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ วัดซ้ำ 32 รอบ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

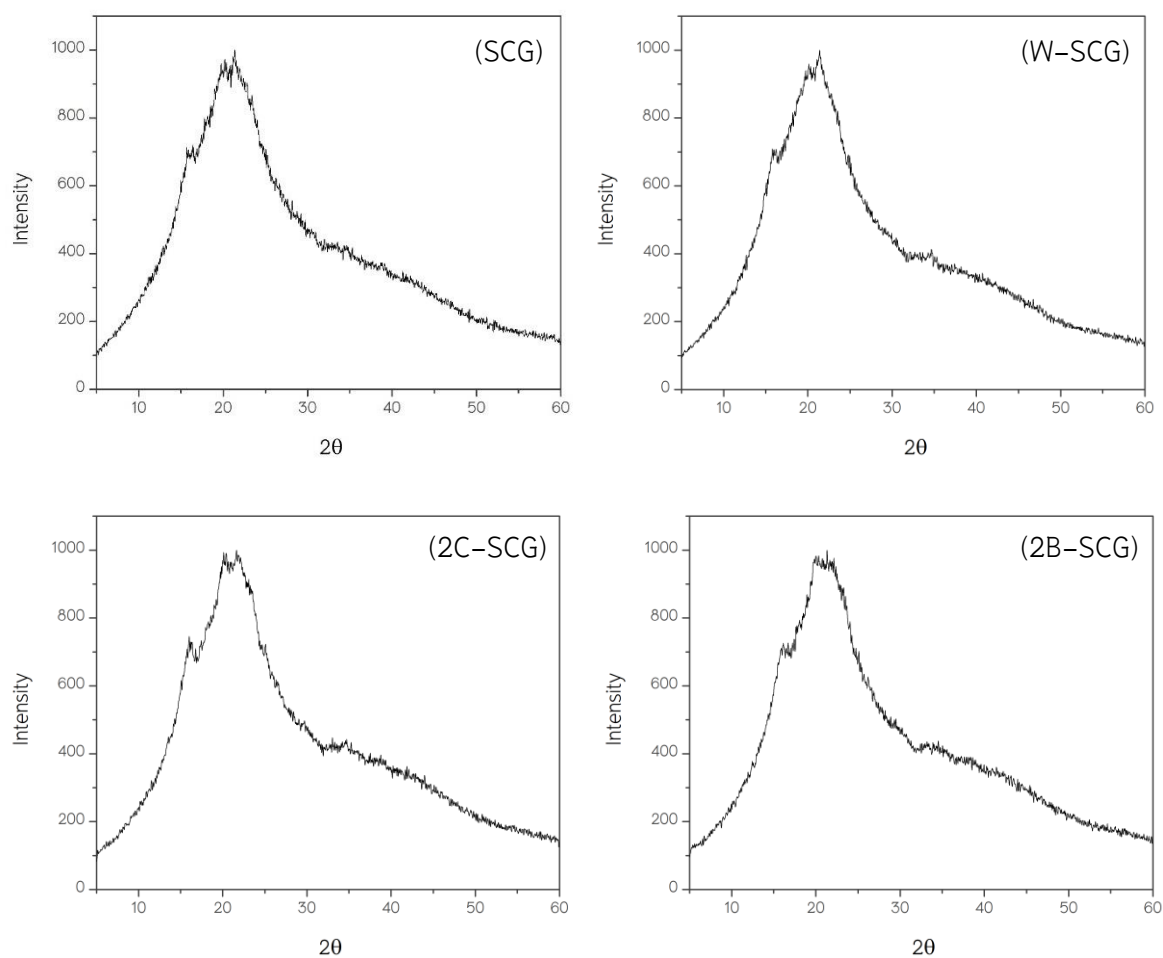
ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับรูปแบบต่าง ๆ ผลการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว และผลการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชอีมาเมกติน เบนโซเอต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ กากกาแฟและกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ

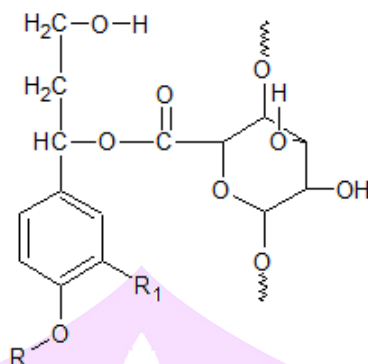
1. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบผง (Powder X-ray Diffractometer)

การวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของตัวดูดซับ สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลึกหรืออสสารได้ โดยเทียบกับฐานข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก International Centre for Diffraction Data (ICDD) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบรูปแบบ XRD ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไฮดรอกซิล (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (B-SCG)

รูปแบบ XRD ของทุกตัวดูดซับ แสดงถึงความเข้มสูงที่มุม 2θ ประมาณ 20 องศา ซึ่งตรงกับฐานข้อมูลรูปแบบ XRD ของเซลลูโลส (ICDD 00-003-0226) และลักษณะพีกมีฐานที่กว้าง (Broad Peak) แสดงถึงโครงสร้างอสัณฐานขององค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (ภาพ 20) โดยกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงทั้ง 2C-SCG และ 2B-SCG มีรูปแบบ XRD ที่ไม่แตกต่างจาก SCG และ W-SCG จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างหลักของกากกาแฟคือเซลลูโลส โดยมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบ และการดัดแปลงกากกาแฟด้วยด่างไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ อย่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนินสลายไป (ภาพ 23)

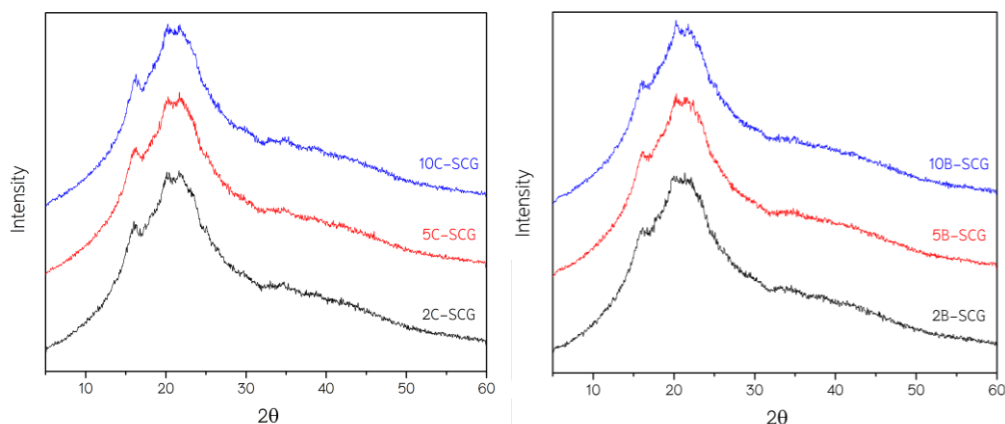


ภาพ 23 การเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของ กากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)



ภาพ 24 โครงสร้างของลิกนินและเซลลูโลสบนพื้นผิวกากกาแฟ

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ใช้ดัดแปลงกากกาแฟ โดยใช้โซเดียม-คาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยมวลต่อปริมาตร และโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่าแม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ใช้ดัดแปลงกากกาแฟจะมากขึ้น แต่ก็ไม่ได้ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสหายไป โดยรูปแบบ XRD แสดงพีกที่มีความเข้มสูงของเซลลูโลสที่มุม 2θ ประมาณ 20 องศา เช่นเดียวกับ SCG และ W-SCG อีกทั้งยังไม่พบพีกที่แสดงการก่อตัวเป็นผลึกของโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียม-ไบคาร์บอเนต แสดงดังภาพ 24



ภาพ 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG), 5%w/v (5C-SCG) และ 10%w/v (10C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG), 5%w/v (5B-SCG) และ 10%w/v (10B-SCG)

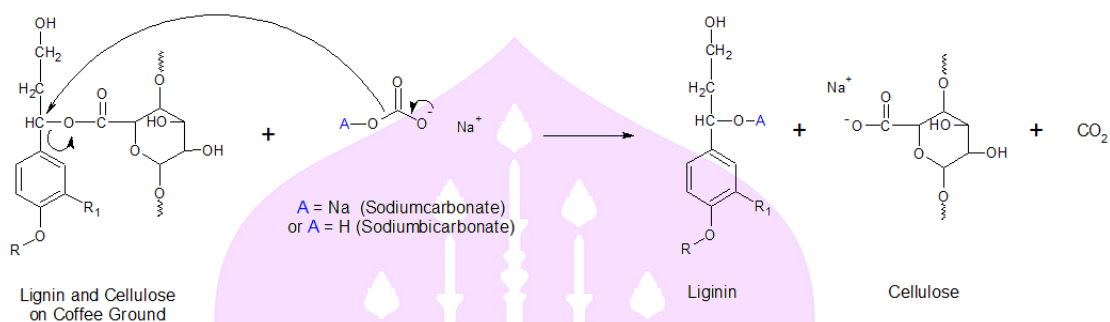
ในขั้นตอนต่อไป จะทำการวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของทุกตัวดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR)

2. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy : FT-IR)

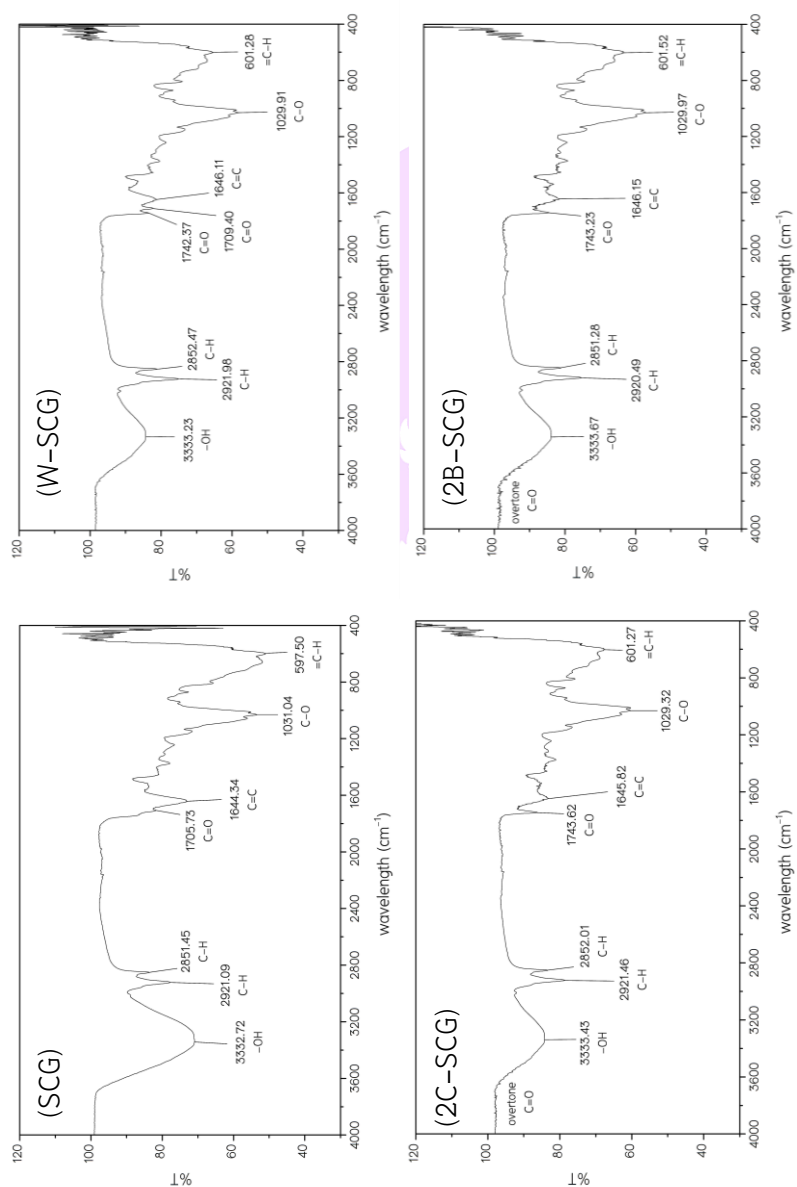
การวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโครงสร้างของตัวดูดซับ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความถี่หรือความเข้มของพีคบนสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสามารถบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบสเปกตรัม FT-IR ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (B-SCG)

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ากากกาแฟทั้ง 4 แบบ มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ไม่ได้ทำให้องค์ประกอบเหล่านั้นสลายไป

อย่างไรก็ตามพบว่ากรดคาร์บอนิกสามารถเปลี่ยนกรดคาร์บอนิกและโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้พันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนินถูกทำลาย และยังทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของเซลลูโลสและลิกนินหลุดออก

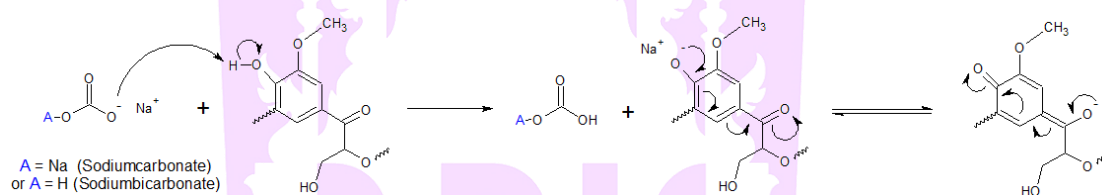


ภาพ 26 กลไกการทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนินด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต



ภาพ 27 การเปรียบเทียบสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไฮคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

โดยสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) แสดงให้เห็นว่าการดัดแปลงกากกาแฟด้วยด่างทำให้ฟังก์ชันของหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ที่เลขคลื่นประมาณ 3,333 ต่อ เซนติเมตร มีความเข้มลดลง และยังพบว่าฟังก์ชันของหมู่แอลคีน ($C=C$) เกิดการขยับ (Shift) จากเลขคลื่นประมาณ 1,644 ต่อเซนติเมตร ไปที่เลขคลื่นประมาณ 1,646 ต่อเซนติเมตร เช่นเดียวกับฟังก์ชันของหมู่เมทิลบนแอลคีนแบบงอนอกกระนาบ ($=C-H$) ขยับจากเลขคลื่นประมาณ 597 ต่อเซนติเมตร ไปที่เลขคลื่นประมาณ 601 ต่อเซนติเมตร โดยสามารถอธิบายได้ว่าโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตไปจับกับอะตอมของไฮโดรเจนบนหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้อะตอมของไฮโดรเจนหลุดออก และทำให้พันธะคู่ของหมู่แอลคีนสามารถเกิดการสลับพันธะ (Resonance) กับอะตอมของออกซิเจนได้ (ภาพ 22) ซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ($C=O$) ที่มีความชัดมากขึ้น โดยขยับจากเลขคลื่นประมาณ 1,705 ต่อเซนติเมตร ไปที่เลขคลื่นประมาณ 1,743 ต่อเซนติเมตร พร้อมกับการเกิดช่วงความถี่เกิน (Overtone) ของหมู่คาร์บอนิลที่เลขคลื่นมากกว่า 3,600 ต่อเซนติเมตร



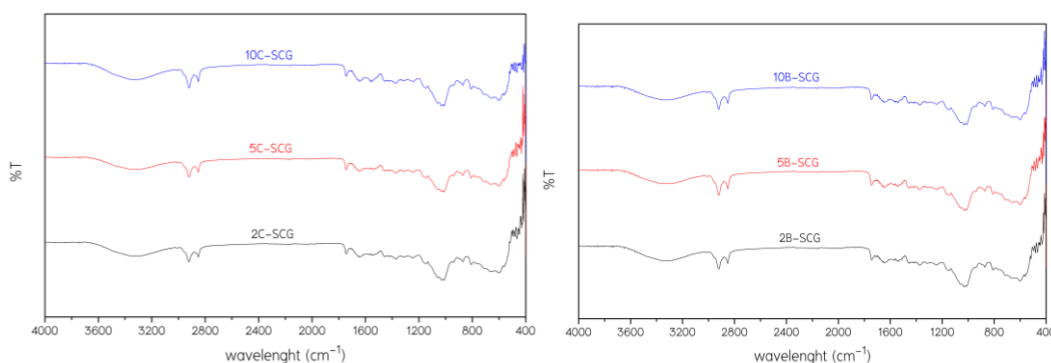
ภาพ 28 การเกิดเรโซแนนซ์หลังการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต

ทั้งนี้ สามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันที่พบบนสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของแต่ละตัวดูดซับ ได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบบนสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

หมู่ฟังก์ชันที่พบ	เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
แถบความถี่เกิน				
หมู่คาร์บอนิล (C=O)	–	–	>3,600	>3,600
หมู่ไฮดรอกซิล (-OH)	3,332.72	3,333.23	3,333.34	3,333.67
หมู่เมทิลแบบยืด (-CH)	2,921.09 และ 2,851.45	2,921.98 และ 2,852.47	2,921.46 และ 2,852.01	2,920.49 และ 2,851.28
หมู่คาร์บอนิล (C=O)	1,705.73	1,709.40 และ 1,742.37	1,743.62	1,743.23
หมู่แอลคีน (C=C)	1,644.34	1,646.11	1,645.82	1,646.15
หมู่อีเทอร์แบบยืด (C-O)	1,031.04	1,029.91	1,029.32	1,029.97
หมู่เมทิลบนแอลคีน แบบงอนอกระนาบ (=C-H)	597.50	601.28	601.27	601.52

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ใช้ในการดัดแปลงกากกาแฟโดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยมวลต่อปริมาตร และโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่าความถี่และความเข้มของพีคบนสเปกตรัม FT-IR ของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยต่างความเข้มข้นสูง ไม่แตกต่างจากกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยต่างความเข้มข้นน้อย (ภาพ 30) จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร ก็เพียงพอต่อการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกากกาแฟให้สามารถจับกับสารปนเปื้อนได้



ภาพ 29 การเปรียบเทียบสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG), 5%w/v (5C-SCG) และ 10%w/v (10C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG), 5%w/v (5B-SCG) และ 10%w/v (10B-SCG)

ผลการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว

การใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ ในการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แบ่งตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แสดงผลได้ดังต่อไปนี้

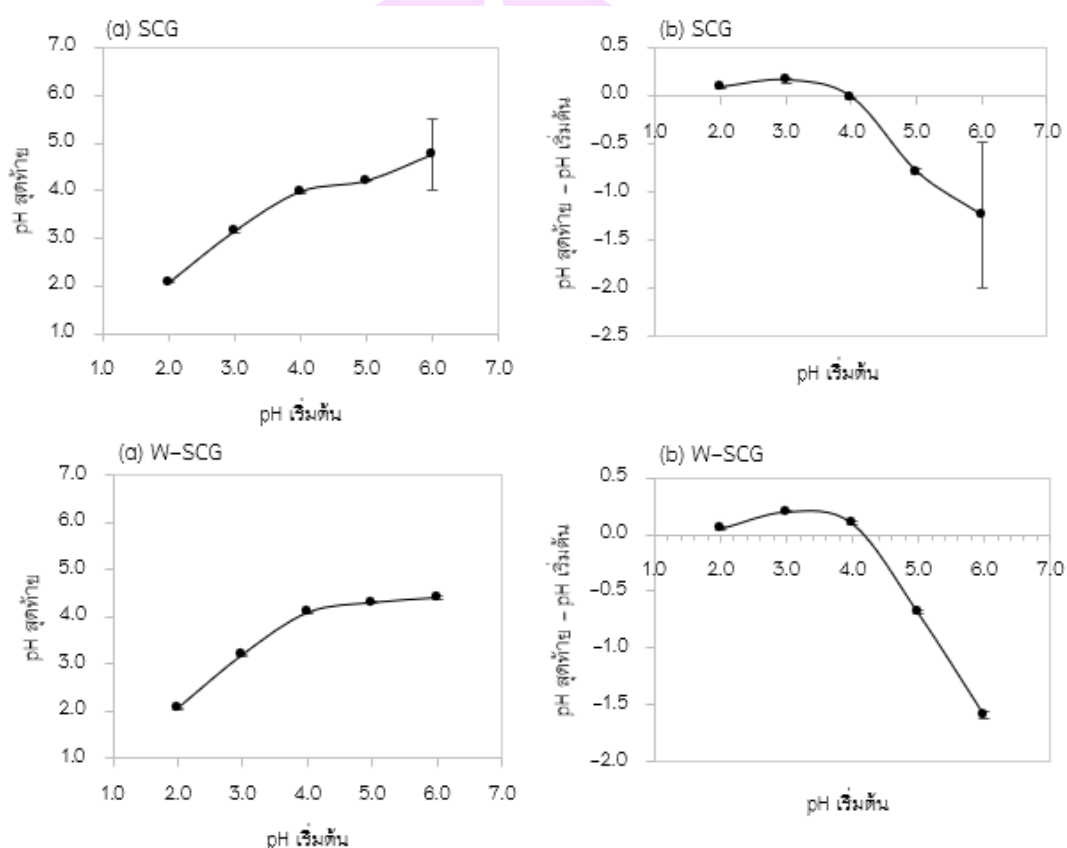
1. ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว

ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงกรดตั้งแต่ 2 – 6 เนื่องจากตะกั่วจะตกตะกอนเมื่ออยู่ในสภาวะต่าง และทำการดูดซับเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังการดูดซับวัดค่า pH ของสารละลายหลังการดูดซับและความเข้มข้นสุดท้ายของตะกั่วเพื่อคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ โดยสามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังต่อไปนี้

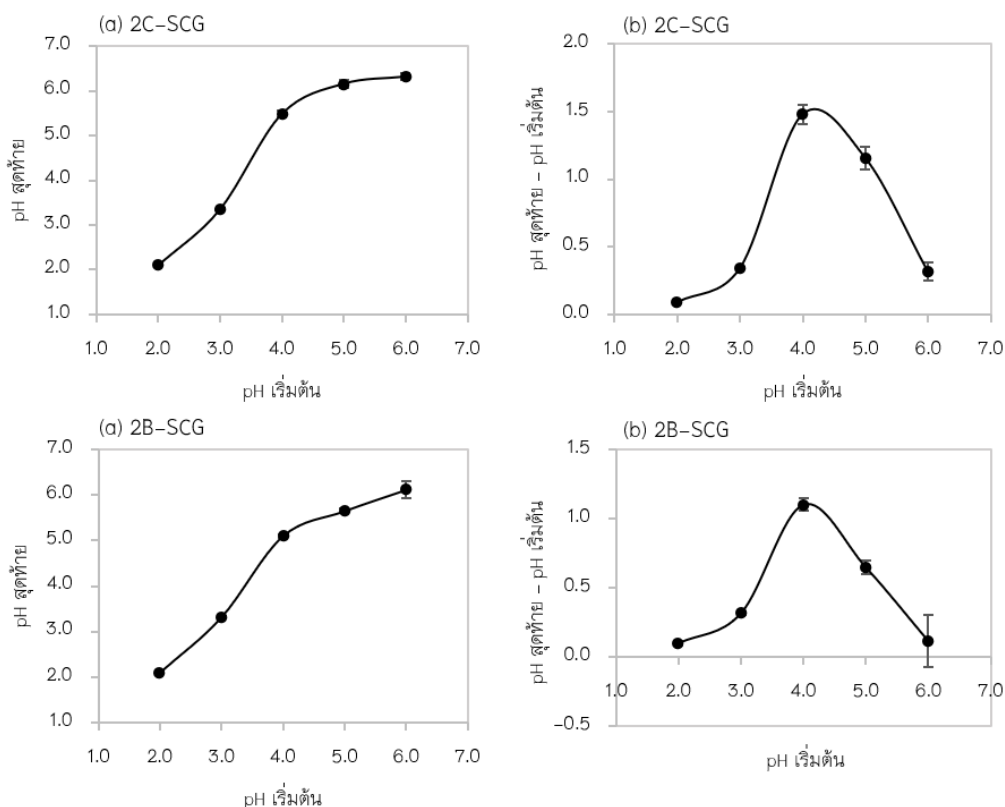
1.1 ค่า pH หลังการดูดซับและ pH ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (Point of zero charge : PZC)

หลังจากดูดซับพบว่าค่า pH ของสารละลายมีแนวโน้มปรับเข้าสู่ pH ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (PZC) โดยเมื่อ pH ของสารละลายต่ำกว่าค่า PZC พื้นผิวของตัวดูดซับจะมี

ประจุเป็นบวก ขณะที่เมื่อ pH ของสารละลายสูงกว่าค่า PZC พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุเป็นลบ (Sertoli et. al., 2019) โดยผลการดูดซับพบว่าค่า PZC ของ SCG และ W-SCG มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 4 และ 4.2 ตามลำดับ ขณะที่หลังจากดัดแปลงกากกาแฟด้วยต่าง ทำให้ค่า PZC ปรับเข้าสู่ความเป็นกลางมากยิ่งขึ้น โดย 2C-SCG และ 2B-SCG มีค่า PZC อยู่ในช่วง 6-7



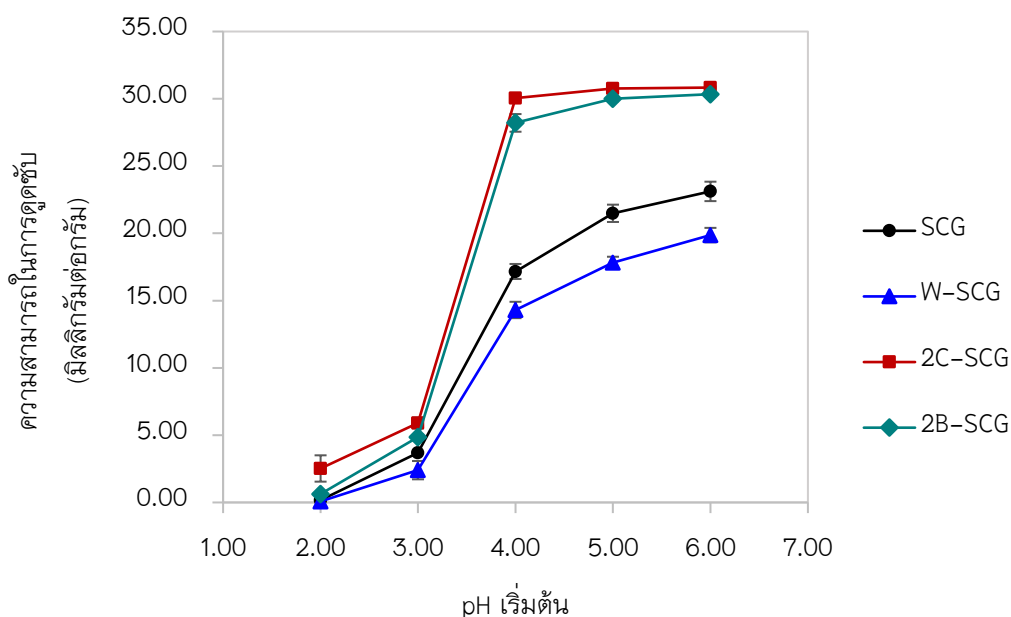
ภาพ 30 ค่า pH หลังการดูดซับ (a) และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (b) ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วย โซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูก ดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG) เมื่อดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพ 30 (ต่อ)

1.2 ความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ที่ pH 2-6

ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 2 – 6 พบว่าทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีเมื่อค่า pH สูงขึ้น เนื่องจากตะกั่วสามารถละลายได้ดีในน้ำที่มีค่า pH ต่ำหรือเป็นกรดมาก จึงทำให้เกิดการดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้น้อย โดยทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อ pH เท่ากับ 6 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 23.12, 19.87, 30.83 และ 30.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพ 31 ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 2 – 6 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบ พบว่า 2C-SCG และ 2B-SCG สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า SCG และ W-SCG โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง pH 4 – 6 เนื่องจากการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้มีหมู่ฟังก์ชันที่จับกับไอออนตะกั่วได้มากขึ้น โดยจะอธิบายต่อไปในส่วนของการจำลองการดูดซับ นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของ 2C-SCG และ 2B-SCG ในช่วง pH 4-6 นั้นยังใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงได้หลากหลายกว่าอีกด้วย

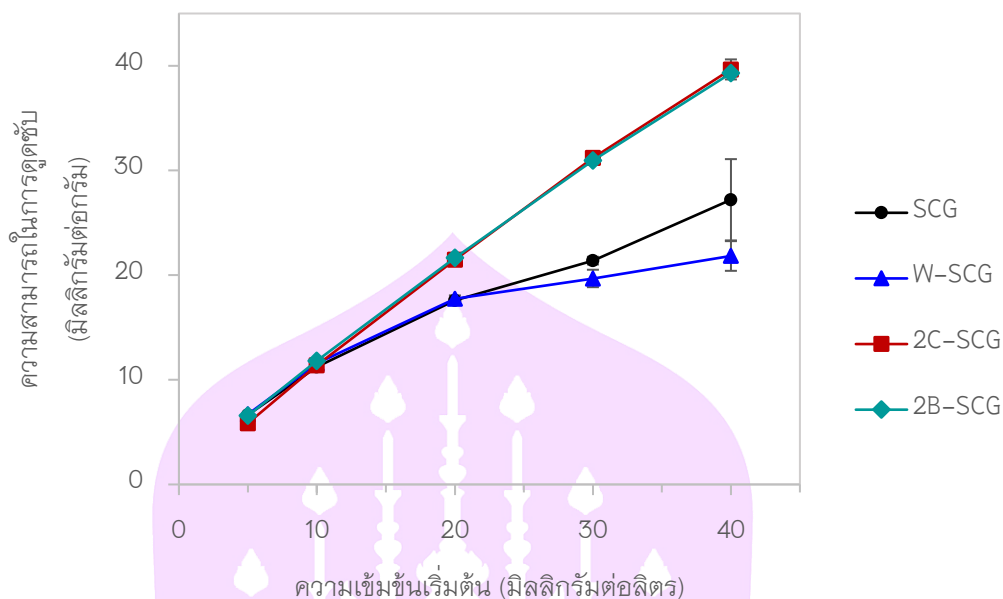
ตาราง 5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 2 – 6 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

pH เริ่มต้น	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
2.00	0.1697	0.0800	2.5248	0.6285
3.00	3.6924	2.3986	5.9040	4.8571
4.00	17.1664	14.3057	30.0415	28.2089
5.00	21.4886	17.8118	30.7602	30.0025
6.00	23.1177	19.8698	30.8331	30.3414

2. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว

ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ค่า pH เท่ากับ 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังนี้

ผลการดูดซับตะกั่วของทุกตัวดูดซับเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือความสามารถในการดูดซับตะกั่วจะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้น ทำให้ไอออนตะกั่วในสารละลายเพิ่มขึ้น โอกาสเกิดการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับจึงสูงขึ้น โดยทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 27.20, 21.83, 39.66 และ 39.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นว่า 2C-SCG และ 2B-SCG สามารถดูดซับตะกั่วได้ใกล้เคียงกันมากในทุกความเข้มข้น สอดคล้องกับผลการดูดซับตะกั่วในช่วง pH 2 – 6



ภาพ 32 ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 ด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตาราง 6 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
5.00	6.6422	6.7047	5.8462	6.5659
10.00	11.2177	11.5709	11.3680	11.7966
20.00	17.5971	17.7391	21.4882	21.6651

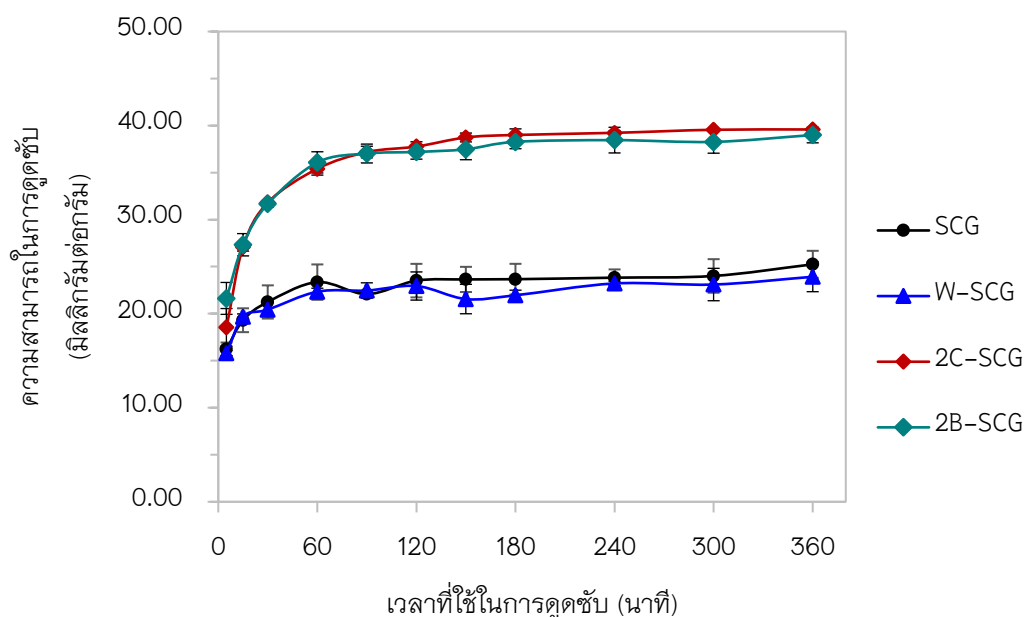
ตาราง 6 (ต่อ)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
30.00	21.3867	19.6828	31.1953	30.9709
40.00	27.2024	21.8318	39.6577	39.2969

3. เวลาที่ใช้ในการดูดซับตะกั่ว

ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ค่า pH เท่ากับ 6 โดยใช้ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที สามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังนี้

ทุกตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการดูดซับมากขึ้น โดยการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก จากนั้นปฏิกิริยาการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่ สมดุล และเกิดการดูดซับสูงสุดที่เวลา 360 นาที ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 25.24, 23.92, 39.58 และ 38.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแนวโน้มการดูดซับตะกั่วของ 2C-SCG และ 2B-SCG มีความ ชัดเจนและเสถียรกว่า SCG และ W-SCG และยังมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าอย่าง ชัดเจนอีกด้วย



ภาพ 33 ความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบรคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตาราง 7 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 5 – 360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบรคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
5	16.2261	15.7908	18.5467	21.6232
15	19.3039	19.6842	27.0906	27.3266
30	21.2458	20.4312	31.8209	31.6843
60	23.3567	22.3367	35.4079	36.0852
90	22.0807	22.4617	37.1816	37.0257

ตาราง 7 (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทีก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
120	23.5154	22.9425	37.7677	37.1964
150	23.6401	21.5540	38.7352	37.4792
180	23.6670	21.9553	39.0005	38.2694
240	23.8273	23.2128	39.2263	38.4520
300	24.0110	23.0982	39.5524	38.2658
360	25.2445	23.9206	39.5848	38.9936

4. แบบจำลองการดูดซับสารละลายตะกั่ว

สามารถศึกษาแบบจำลองการดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบได้จากการสร้างกราฟและคำนวณตามสมการของแบบจำลองแลงเมียร์ (L) และสมการแบบจำลองฟรอยด์ลิช (F)

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (L) \quad (8)$$

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (F) \quad (9)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

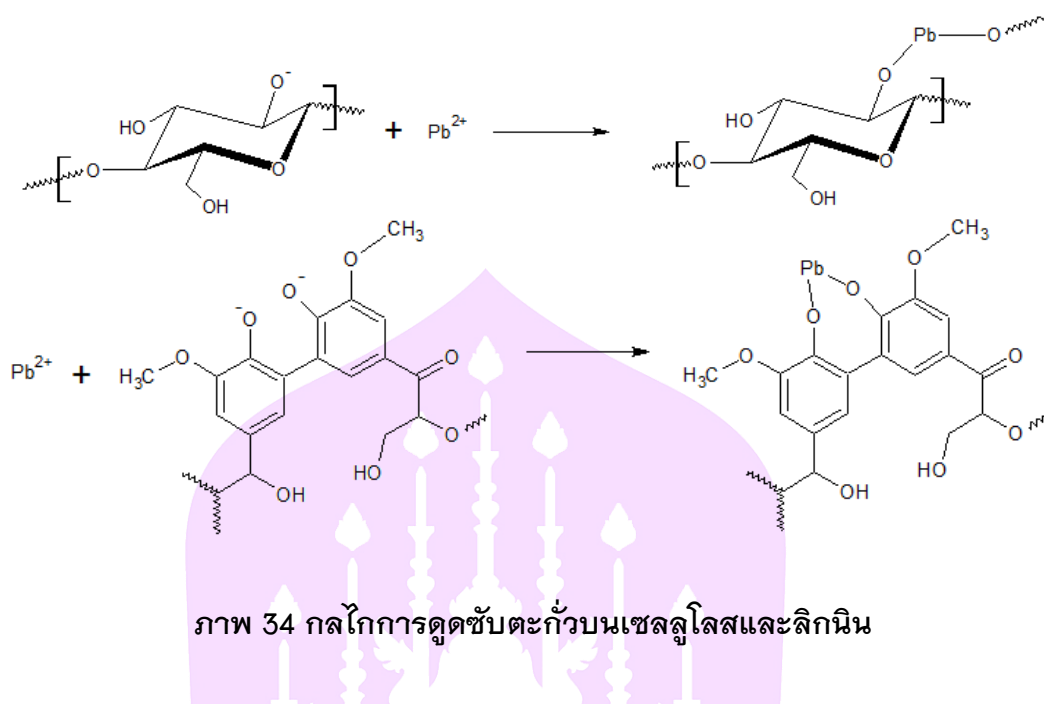
Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ ในหน่วยลิตรต่อกรัม

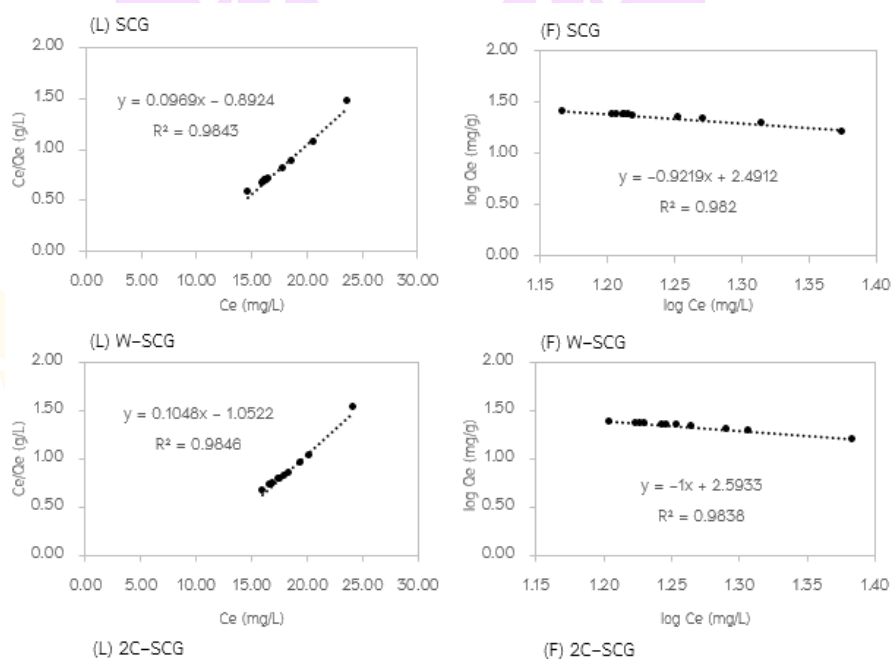
n คือ ค่าคงที่ของสมการการดูดซับฟรอยด์ลิช

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรอยด์ลิช

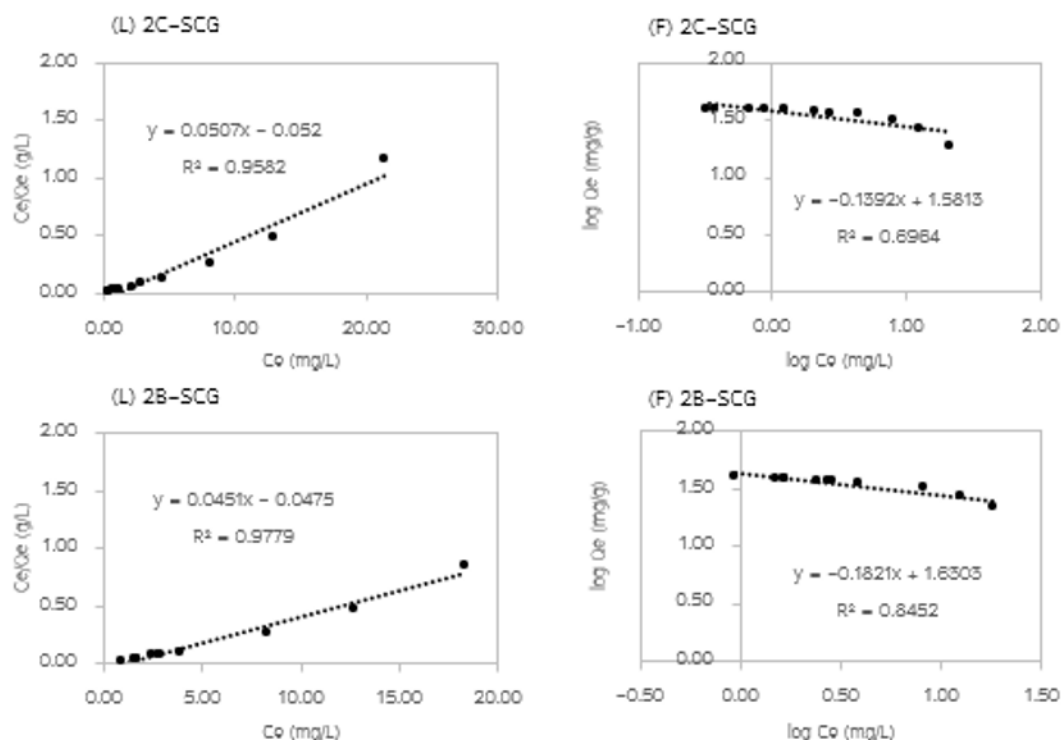
การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวตัวดูดซับกากกาแฟทั้ง 4 แบบ เป็นการดูดซับทางเคมีแบบขั้นเดียวตรงตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองแลงเมียร์กับแบบจำลองฟรอยด์ลิช พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองแลงเมียร์ของทุกตัวดูดซับมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองฟรอยด์ลิช สามารถเขียนกลไกการดูดซับตะกั่วบนโครงสร้างเซลล์และลิกนินของตัวดูดซับกากกาแฟได้ดังภาพ 34



ภาพ 34 กลไกการดูดซับตะกั่วบนเซลลูโลสและลิกนิน

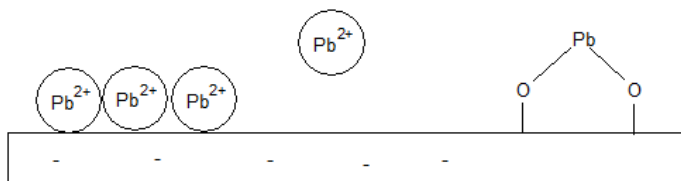


ภาพ 35 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (L) และแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช (F) ของการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)



ภาพ 35 (ต่อ)

เมื่อคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (Q_m) ของแต่ละตัวดูดซับตามสมการแบบจำลองแลงเมียร์ก็พบว่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณแตกต่างกับค่าจากการทดลองอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง SCG และ W-SCG ซึ่งคำนวณค่า Q_m ได้เท่ากับ 10.32 และ 9.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่ความสามารถในการดูดซับจากการทดลองเท่ากับ 25.24 และ 23.92 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อีกทั้งค่า R^2 ของแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชยังค่อนข้างใกล้เคียงกันอย่างมาก จึงสรุปได้ว่า นอกจากการดูดซับทางเคมีแบบชั้นเดียวแล้ว ยังสามารถเกิดการดูดซับทางกายภาพแบบหลายชั้นตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิชได้ โดยการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีประจุเป็นลบ ยืนยันได้จากค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่อ pH อยู่ในช่วง 4-6 ซึ่งเป็นช่วงที่พื้นผิวกากกาแฟมีประจุเป็นลบ ตามผลการทดลอง 2.1 ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว



ภาพ 36 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิวกากกาแฟ

ตาราง 8 ค่าคงที่ตามแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชของการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตัวดูดซับ	การดูดซับแบบแลงเมียร์			การดูดซับแบบฟรอยด์ลิช		
	Q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	n	K_F	R^2
SCG	10.32	-0.11	0.984	-1.08	309.88	0.982
W-SCG	9.54	-0.10	0.985	-1.00	392.01	0.984
2C-SCG	19.72	-0.98	0.958	-7.18	38.13	0.696
2B-SCG	22.17	-0.95	0.978	-5.49	42.69	0.845

เมื่อ Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารละลายและตัวดูดซับในหน่วยลิตรต่อกรัม

n คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความเข้มข้นของการดูดซับ

K_F คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

5. จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายตะกั่ว

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบ ได้จากการสร้างกราฟและคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (10) และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (11)

$$\log (Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (10)$$

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (11)$$

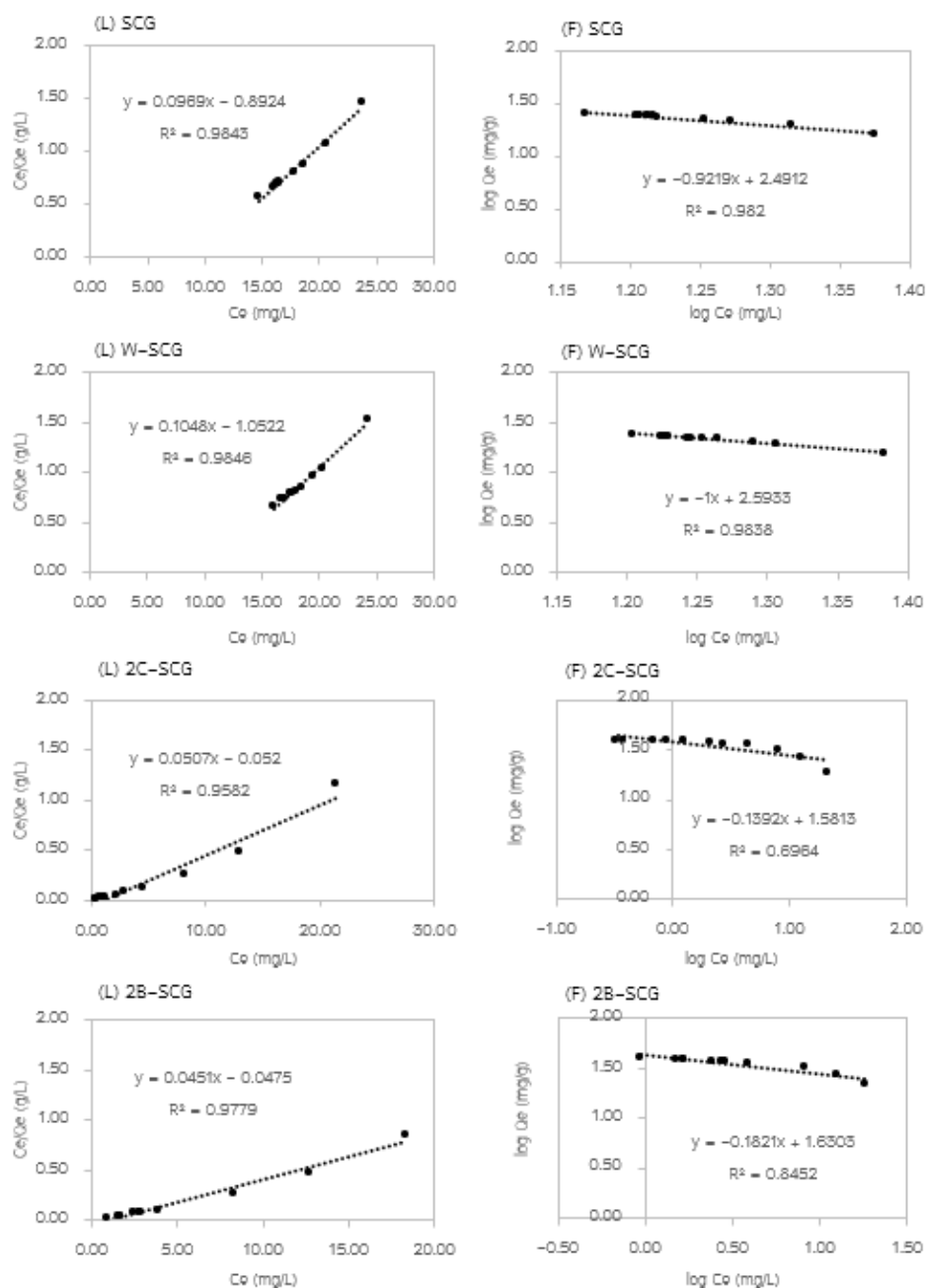
เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

Q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

K_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในหน่วยต่อนาที

K_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมนาที

เมื่อกำหนดให้ปริมาณตัวดูดซับคงที่ พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วของทุกตัวดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และค่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของทุกตัวดูดซับใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วจะยิ่งทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มขึ้น



ภาพ 37 จลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (1)

และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (2) ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตาราง 9 ค่าคงที่ตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตัวดูดซับ	Q_{exp} (mg/g)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		Q_e (mg/g)	K_1 (min^{-1})	R^2	Q_e (mg/g)	K_2 (mg/g.min)	R^2
SCG	25.24	4.68	0.0022	0.7291	24.94	0.0061	0.9983
W-SCG	23.92	3.64	0.0021	0.5875	23.75	0.0073	0.9981
2C-SCG	39.58	9.87	0.0056	0.6870	40.49	0.0033	0.9999
2B-SCG	38.99	7.17	0.0036	0.7048	39.37	0.0041	0.9998

หมายเหตุ: เมื่อ Q_{exp} คือ ความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

K_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในหน่วยต่อนาที

K_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมนาที

ผลการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชอีมาเมกติน เบนโซเอต

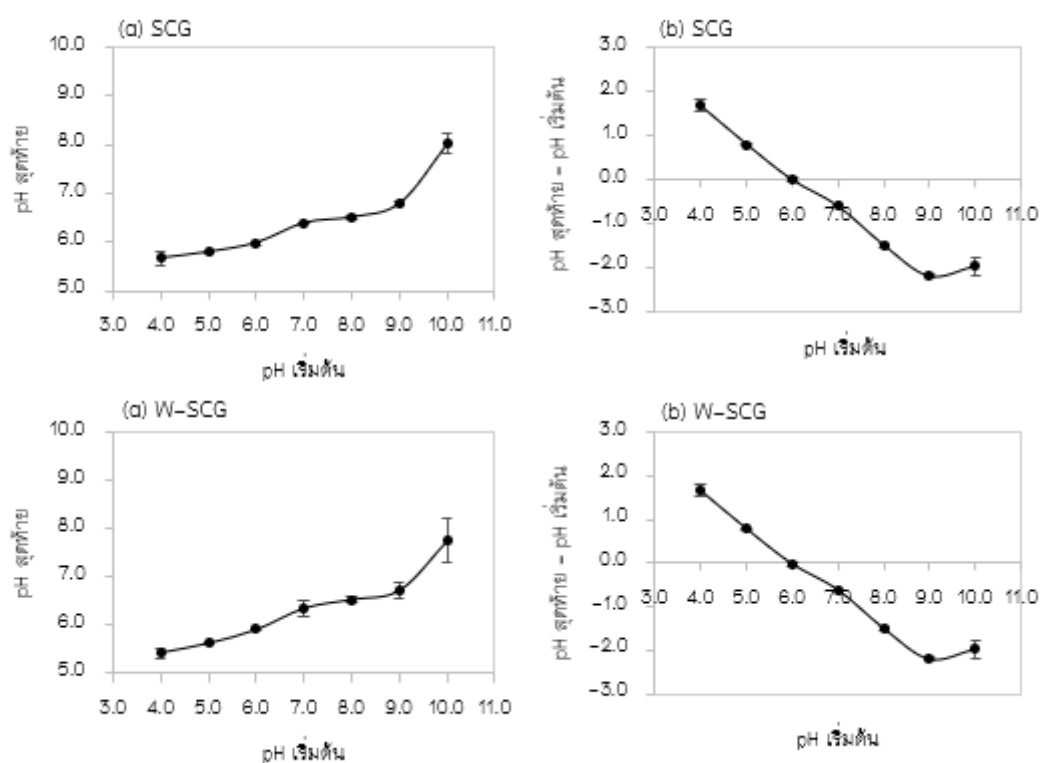
การใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ ในการดูดซับสารกำจัดศัตรูพืชอีมาเมกติน เบนโซเอต แบ่งตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกติน เบนโซเอต และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แสดงผลได้ดังต่อไปนี้

1. ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต

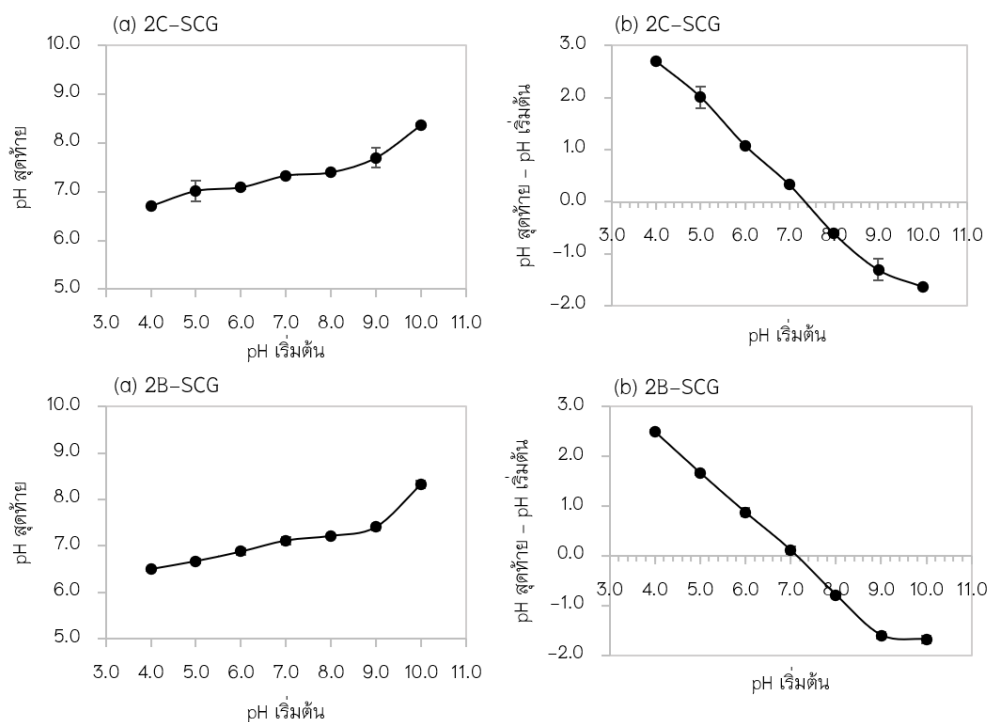
ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต ความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับค่า pH ตั้งแต่ 4 – 10 ซึ่งเป็นค่า pH ที่สามารถตรวจพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทำการดูดซับเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวัดความเข้มข้นสุดท้ายของอีมาเมกติน เบนโซเอตและค่า pH หลังการดูดซับ โดยสามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังต่อไปนี้

1.1 ค่า pH หลังการดูดซับและ pH ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (Point of zero charge : PZC)

หลังจากดูดซับพบว่าค่า pH ของสารละลายมีแนวโน้มปรับเข้าสู่ pH ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ (PZC) เช่นเดียวกับการดูดซับตะกั่ว โดยเมื่อ pH ของสารละลายต่ำกว่าค่า PZC พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุเป็นบวก ขณะที่เมื่อ pH ของสารละลายสูงกว่าค่า PZC พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุเป็นลบ โดยผลการดูดซับพบว่า ค่า PZC ของ SCG และ W-SCG มีค่าเท่ากันคือ 6 ขณะที่หลังจากดัดแปลงกากกาแฟด้วยต่างทำให้ค่า PZC ปรับเข้าสู่ความเป็นกลางมากยิ่งขึ้น โดย 2C-SCG และ 2B-SCG มีค่า PZC ใกล้เคียงกันเท่ากับ 7.4 และ 7.2 ตามลำดับ



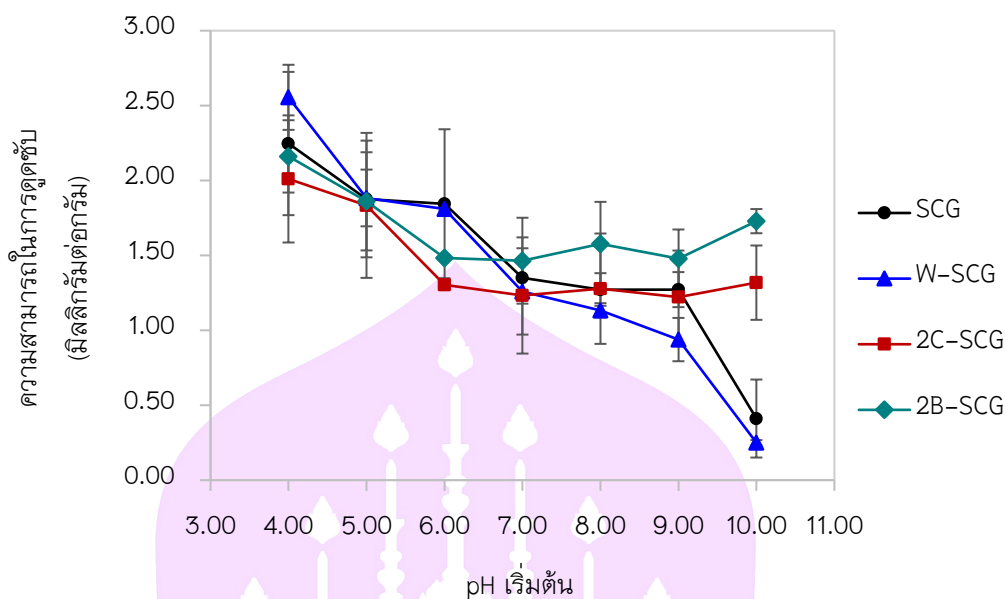
ภาพ 38 ค่า pH หลังการดูดซับ (a) และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (b) ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG) เมื่อดูดซับสารละลายอีมาเมกดิน เบนโซเอต ความเข้มข้น 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพ 38 (ต่อ)

1.2 ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต

ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง pH ตั้งแต่ 4 – 10 พบว่าทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตได้ดีที่สุดที่ pH เท่ากับ 4 และดูดซับได้ลดลงเมื่อค่า pH สูงขึ้น เนื่องจากอีมาเมกติน เบนโซเอตจะถูกดูดซับได้ดีเมื่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับเป็นบวกหรือในช่วง pH 4 – 6 ซึ่งจะอธิบายต่อไปในส่วนของการจำลองการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 2.25, 2.56, 2.01 และ 2.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพ 39 ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.5 มิลลิกรัม ต่อลิตรที่ pH ตั้งแต่ 4 – 10 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจาก ไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียม ไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

เมื่อเปรียบเทียบผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบ พบว่า 2C-SCG และ 2B-SCG สามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตได้น้อยกว่า SCG และ W-SCG ในช่วง pH 4 – 6 แต่สามารถดูดซับได้ดีกว่าในช่วง pH มากกว่า 6 และความสามารถในการดูดซับยังค่อนข้างคงที่แม้ pH จะสูงขึ้น เกิดจากการดัดแปลงกากกาแฟทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ใช้จับกับอีมาเมกติน เบนโซเอตเพิ่มมากขึ้น โดยจะอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของแบบจำลองการดูดซับ เพราะฉะนั้นจะสามารถใช้กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตในสภาพแวดล้อมที่เป็นต่างได้

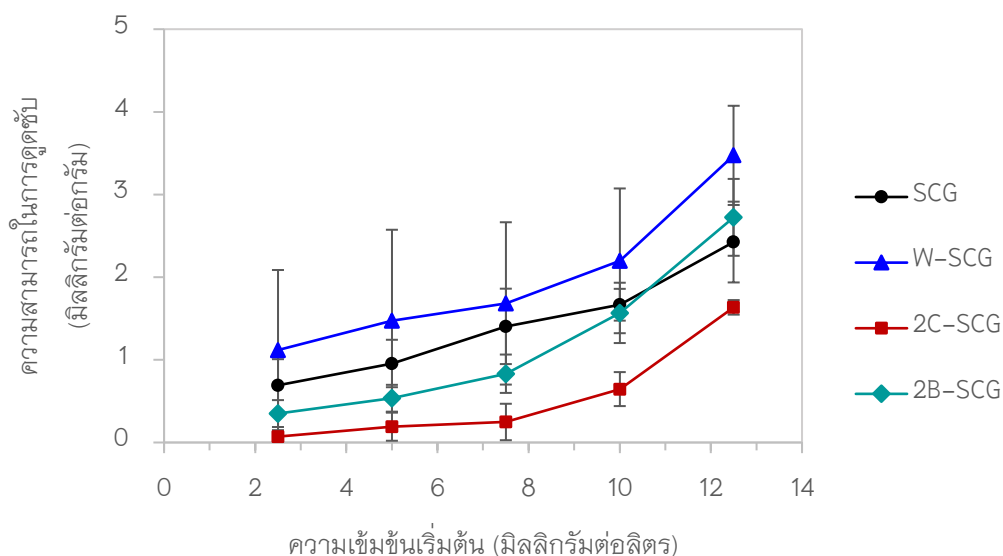
ตาราง 10 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 4 – 10 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

pH เริ่มต้น	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
4.00	2.2468	2.5552	2.0106	2.1610
5.00	1.8768	1.8835	1.8341	1.8609
6.00	1.8452	1.8105	1.3030	1.4833
7.00	1.3500	1.2597	1.2327	1.4648
8.00	1.2726	1.1334	1.2780	1.5772
9.00	1.2718	0.9384	1.2217	1.4795
10.00	0.4114	0.2504	1.3182	1.7287

2. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกติน เบนโซเอต

ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ pH เท่ากับ 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังนี้

ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตของทุกตัวดูดซับมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกติน เบนโซเอตเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะยิ่งมากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้น ทำให้อนุภาคของอีมาเมกติน เบนโซเอตในสารละลายเพิ่มขึ้น โอกาสที่จะเกิดการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับย่อมสูงขึ้นด้วย โดยทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตได้สูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 2.42, 3.47, 1.63 และ 2.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพ 40 ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

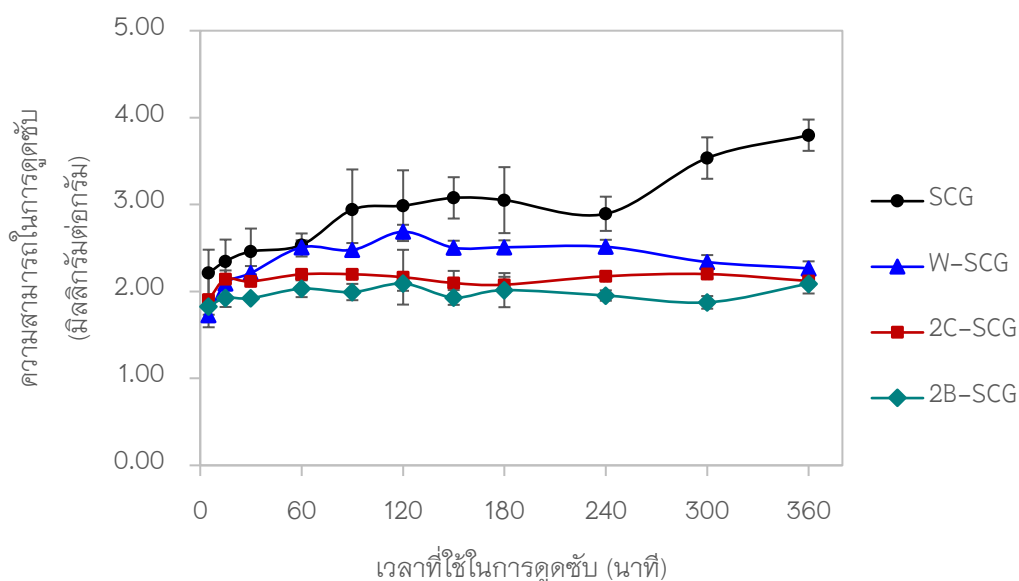
ตาราง 11 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ อีมาเมกติน เบนโซเอต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
2.50	0.6921	1.1181	0.0715	0.3503
5.00	0.9557	1.4726	0.1912	0.5344
7.50	1.4049	1.6824	0.2483	0.8320
10.00	1.6664	2.1976	0.6461	1.5679
12.50	2.4249	3.4734	1.6349	2.7238

3. เวลาที่ใช้ในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอต

ใช้ตัวดูดซับกากกาแฟ 4 แบบ น้ำหนัก 0.1 กรัมเท่ากัน ดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอต ความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ pH เท่ากับ 4 โดยใช้ เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที สามารถสรุปผลการดูดซับได้ดังนี้

ในช่วงแรกของการดูดซับ ทุกตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะ SCG และ W-SCG ที่สามารถดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตได้อย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก จากนั้นปฏิกิริยาการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุลและเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป มากกว่า 240 นาที ขณะที่ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตของ 2C-SCG และ 2B-SCG นั้นค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะใช้เวลาในการดูดซับมากขึ้น แสดงว่ากากกาแฟที่ถูกดัดแปลง จะมีความเสถียรมากกว่าเมื่อนำไปใช้งานในสถานการณ์จริง โดยความสามารถในการดูดซับ สูงสุดของ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG เท่ากับ 3.80, 2.69, 2.20 และ 2.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ภาพ 41 ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับ 5-360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบรไมด์ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตาราง 12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4 เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 5 – 360 นาที ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

เวลาที่ใช้ในการ ดูดซับ(นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)			
	SCG	W-SCG	2C-SCG	2B-SCG
5	2.2121	1.7279	1.9067	1.8268
15	2.3477	2.0933	2.1422	1.9271
30	2.4604	2.2124	2.1159	1.9229
60	2.5352	2.5086	2.1978	2.0316
90	2.9421	2.4771	2.1982	1.9937
120	2.9872	2.6873	2.1645	2.0904
150	3.0769	2.5038	2.0976	1.9314
180	3.0509	2.5083	2.0784	2.0155
240	2.8937	2.5144	2.1751	1.9536
300	3.5349	2.3387	2.2005	1.8748
360	3.7978	2.2665	2.1206	2.0894

4. แบบจำลองการดูดซับสารละลายอีมาเมกติน เบนโซเอต

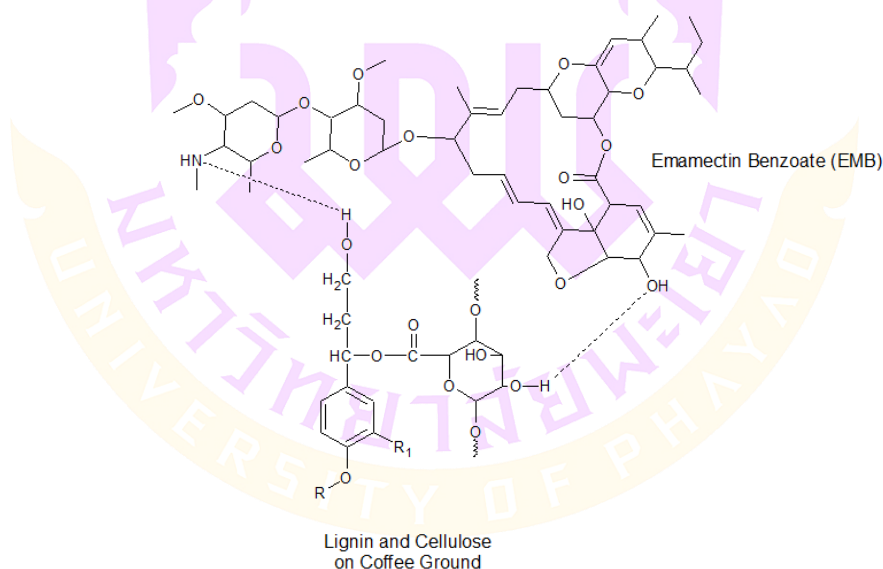
ศึกษารูปแบบการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตบนพื้นผิวของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบ ได้จากการสร้างกราฟและคำนวณตามสมการของแบบจำลองแลงเมียร์ (L) และสมการแบบจำลองฟรอยด์ลิช (F)

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (L) \quad (12)$$

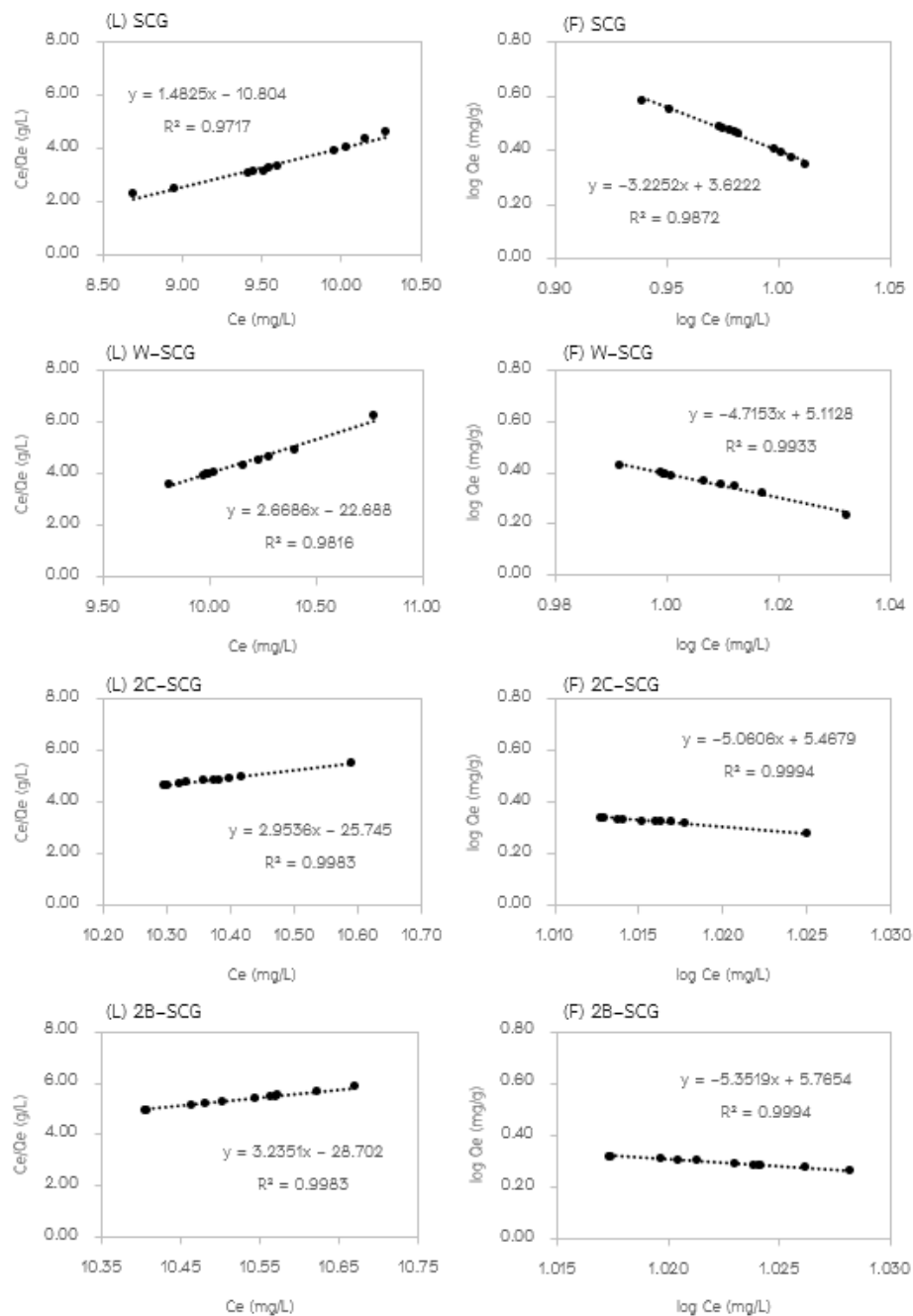
$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (F) \quad (13)$$

- เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
 Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ ในหน่วยลิตรต่อกรัม
 n คือ ค่าคงที่ของสมการการดูดซับฟรอยด์ลิช
 K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรอยด์ลิช

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช กับแบบจำลองแลงเมียร์ พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองฟรอยด์ลิชของทุกตัวดูดซับมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตบนตัวดูดซับกากกาแฟ ทั้ง 4 แบบเป็นการดูดซับทางกายภาพที่สามารถดูดซับได้หลายชั้นตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช โดยเกิดการดูดซับได้ดีในช่วง pH 4 – 6 ซึ่งเป็น pH ที่ทำให้พื้นผิวกากกาแฟมีประจุเป็นบวก การดูดซับเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมไฮโดรเจนที่เกาะกับออกซิเจนบนพื้นผิวกากกาแฟกับอะตอมไนโตรเจนและออกซิเจนบนโครงสร้างของอีมาเมกติน เบนโซเอต สามารถเขียนโครงสร้างการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟได้ดังภาพ 42

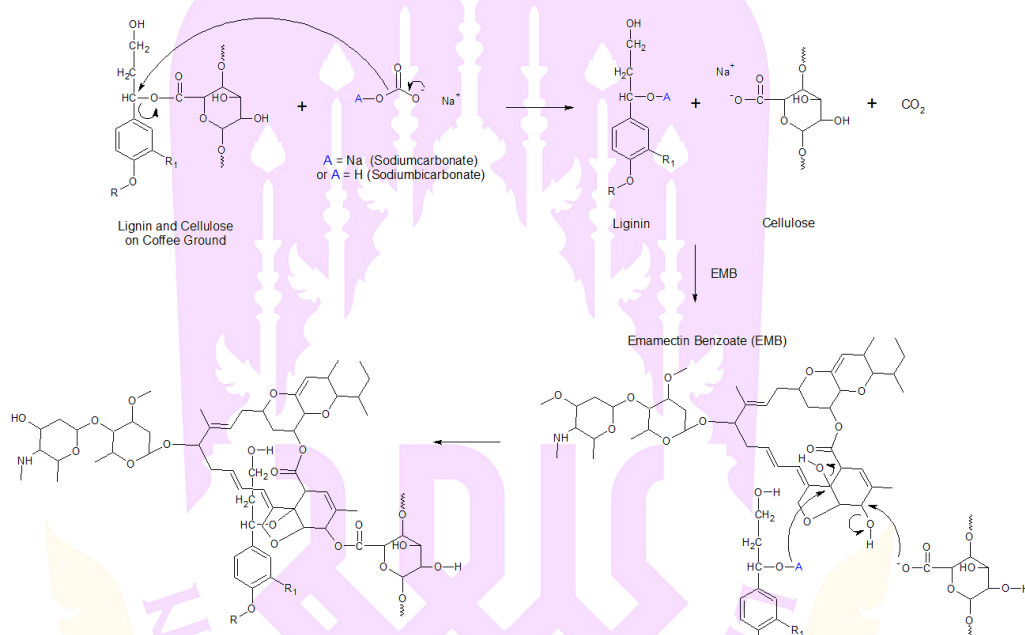


ภาพ 42 โครงสร้างการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟ



ภาพ 43 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (L) และแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช (F) ของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

จะเห็นว่าค่า R^2 ของแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชของกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงมีความใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้การทดลอง 3.1 ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต ยังแสดงให้เห็นว่า 2C-SCG และ 2B-SCG สามารถดูดซับอีมาเมกติน-เบนโซเอตได้อย่างคงที่ในช่วง pH มากกว่า 6 ต่างจาก SCG และ W-SCG แสดงว่าบริเวณที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของกากกาแฟถูกดัดแปลงนั้นสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีแบบชั้นเดียวตามแบบจำลองแลงเมียร์ได้ จึงทำให้เสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH และเวลาในการดูดซับ โดยสามารถเขียนกลไกการดูดซับทางเคมีของอีมาเมกติน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟได้ดังภาพ 44



ภาพ 44 กลไกการดูดซับทางเคมีของอีมาเมกติน เบนโซเอตบนพื้นผิวกากกาแฟ

ตาราง 13 ค่าคงที่ตามแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอยด์ลิชของการดูดซับ อีมาเมกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจาก ไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตัวดูดซับ	การดูดซับแบบแลงเมียร์			การดูดซับแบบฟรอยด์ลิช		
	Q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	n	K_F	R^2
SCG	0.67	-0.14	0.972	-0.31	4,189.86	0.987
W-SCG	0.37	-0.12	0.982	-0.21	129,658.20	0.993
2C-SCG	0.34	-0.11	0.998	-0.20	293,697.33	0.999
2B-SCG	0.31	-0.11	0.998	-0.10	582,639.60	0.999

หมายเหตุ: เมื่อ Q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว ในหน่วยมิลลิกรัม ต่อกรัม

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารละลายและตัวดูดซับ ใน หน่วยลิตรต่อกรัม

n คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความเข้มข้นของการดูดซับ

K_F คือ ค่าคงที่ฟรอยด์ลิชแสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

5. จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอีมาเมกติน เบนโซเอต

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตของตัวดูดซับทั้ง 4 แบบ ได้จากการสร้างกราฟและคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (1) และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (2)

$$\log (Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (13)$$

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (14)$$

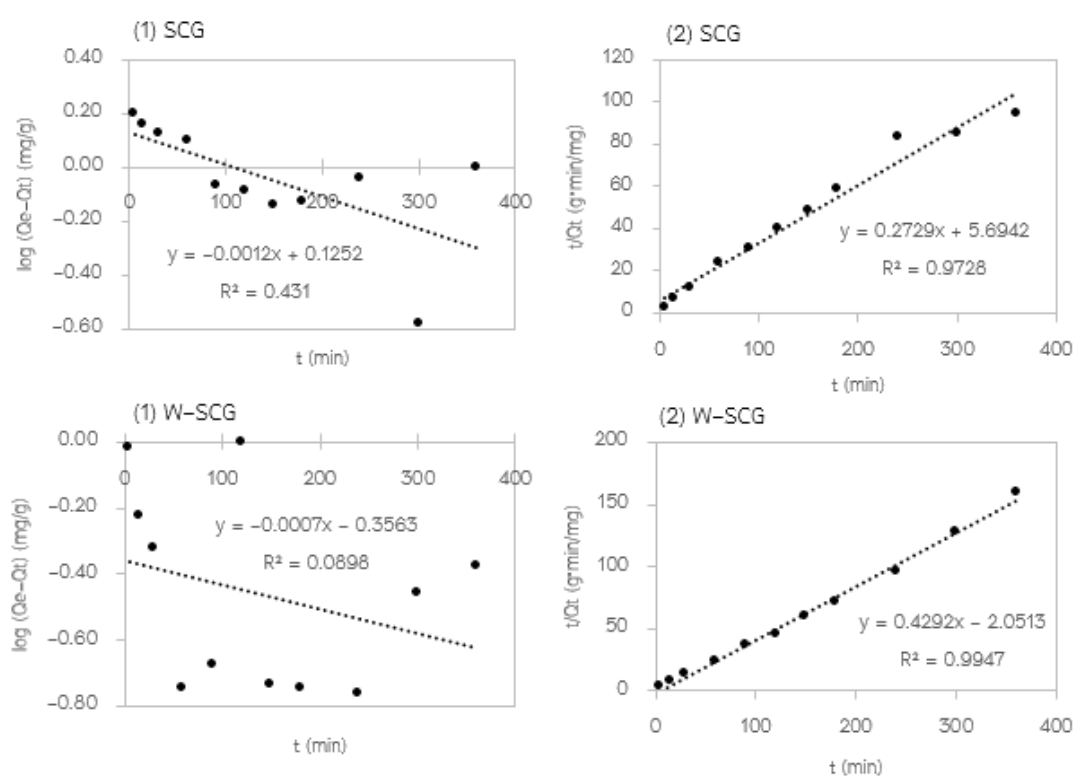
เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

Q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

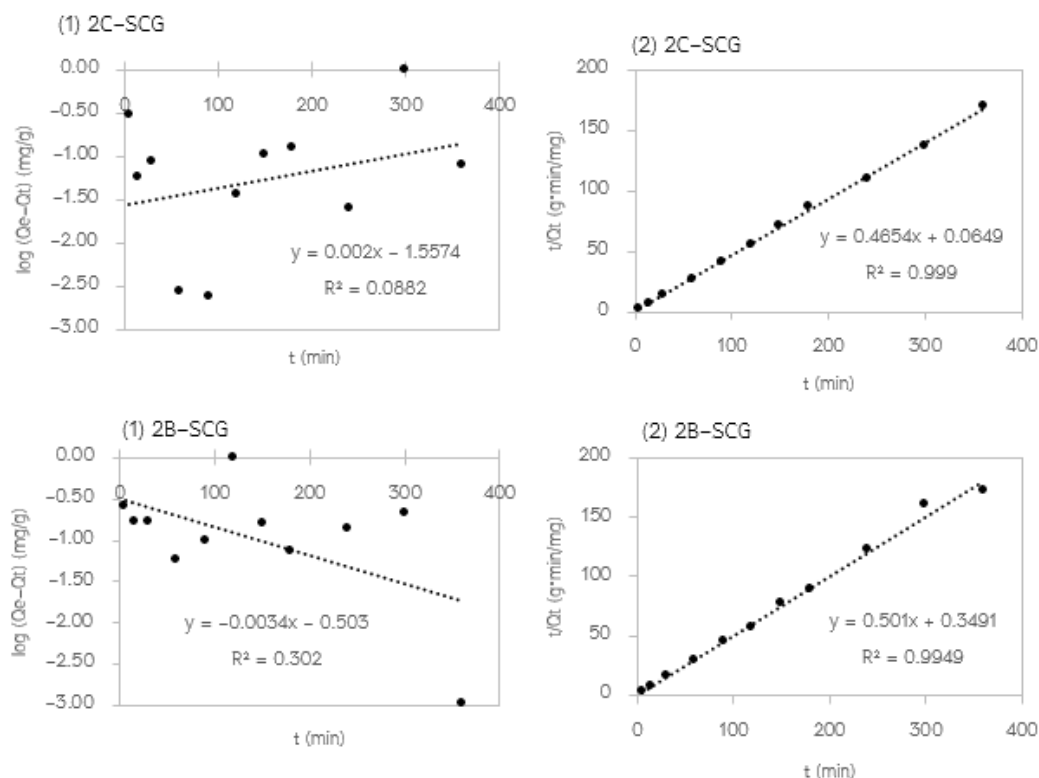
K_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในหน่วยต่ออนาที

K_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมนาที

เมื่อกำหนดให้ปริมาณตัวดูดซับคงที่ พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต ของทุกตัวดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของทุกตัวดูดซับใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกติน- เบนโซเอตจะยิ่งทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มขึ้น



ภาพ 45 จลนพลศาสตร์การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (1) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (2) ของกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)



ภาพ 45 (ต่อ)

ตาราง 14 ค่าคงที่ตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตัวดูดซับ	Q_{exp} (mg/g)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		Q_e	K_1	R^2	Q_e	K_2	R^2
		(mg/g)	(min^{-1})		(mg/g)	(mg/g.min)	
SCG	3.80	1.33	0.0012	0.431	3.66	0.0131	0.973
W-SCG	2.69	2.27	0.0007	0.090	2.33	-0.0898	0.995
2C-SCG	2.20	0.03	-0.0020	0.088	2.15	3.3374	0.999
2B-SCG	2.09	0.31	0.0034	0.302	2.00	0.7190	0.995

หมายเหตุ: เมื่อ Q_{exp} คือ ความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
 Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

K_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในหน่วยต่อนาที

K_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมนาที

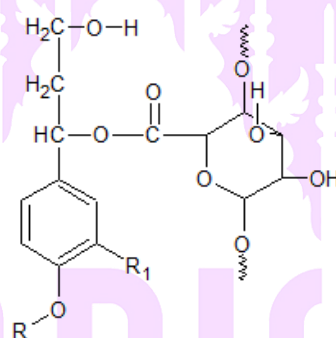


บทที่ 5

บทสรุป

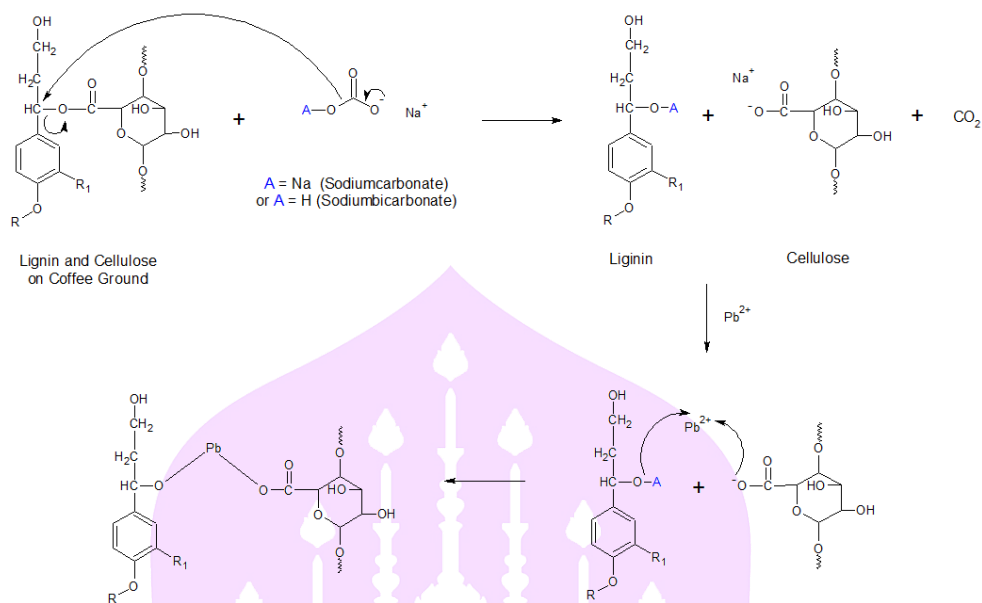
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับกากกาแฟและกากกาแฟที่ ถูกดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า กากกาแฟมีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส อ้างอิงตาม ฐานข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซลลูโลส (ICDD 00-003-0226) และมี โครงสร้างอสังฐานของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบ

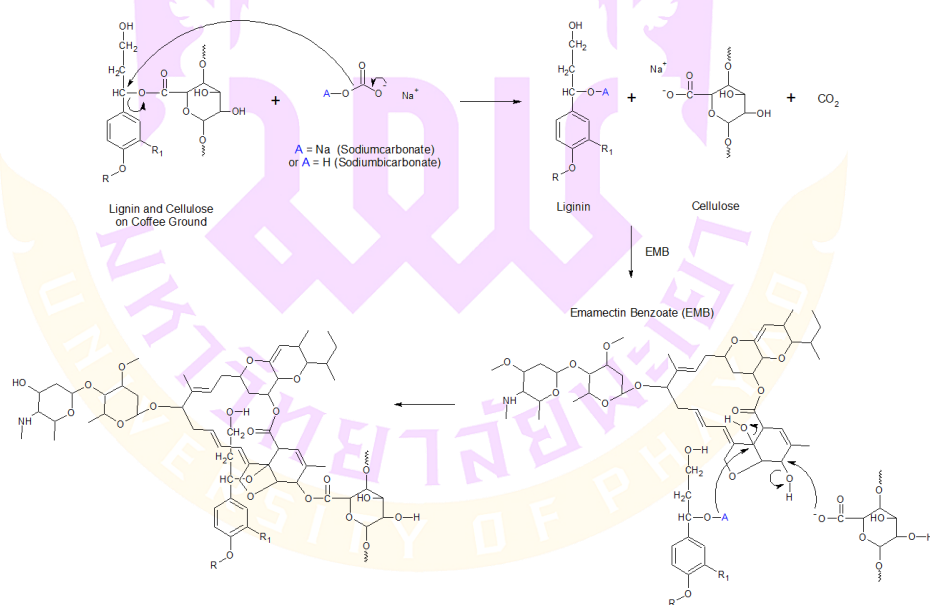


ภาพ 46 โครงสร้างลิกนินที่เกาะกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบนพื้นผิวกากกาแฟ

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ยังแสดงให้เห็นว่า โซเดียมคาร์บอเนตและ โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการดัดแปลงพื้นผิวกากกาแฟไม่ได้เข้ามาเกาะบนโครงสร้างผลึก ของเซลลูโลส แต่เข้ามาทำลายพันธะระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน แสดงดังภาพ 47 และ 48 โดยสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ($C=O$) ที่ชัดเจน ขณะที่พันธะคู่ของแอลคีน ($C=C$) ลดลง เกิดจากการการสลับตำแหน่งของ พันธะในโครงสร้างลิกนิน (Resonance) เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับประจุบวกของสาร ปนเปื้อนได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ($-OH$) ก็ลดลงเช่นกัน จากการถูกทำให้ เป็นกลางด้วยด่าง (Neutralization) สอดคล้องกับผลของ pH ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ที่แสดงให้เห็น ว่าการดัดแปลงกากกาแฟด้วยด่าง ทำให้สภาพประจุบนพื้นผิวกากกาแฟเป็นกลางมากขึ้น



ภาพ 47 กลไกการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต



ภาพ 48 กลไกการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต

การดูดซับตะกั่วและอิมามกดิน เบนโซเอตด้วยตัวดูดซับกากกาแฟ กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนต และกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนต มีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ของสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยสามารถสรุปผลปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้ดังตาราง 15 และ 16

ตาราง 15 สรุปผลปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้น 2%w/v (2B-SCG)

ตัวดูดซับ	ปัจจัยที่เหมาะสม					
	pH	C_i (mg/L)	t (min)	$Q_{m,exp}$ (mg/g)	แบบจำลอง การดูดซับ	จลนพลศาสตร์ การดูดซับ
SCG	6	40	360	27.2024	แลงเมียร์ > ฟรอยด์ลิช	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
W-SCG	6	40	360	23.9206	แลงเมียร์ > ฟรอยด์ลิช	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
2C-SCG	6	40	360	39.6577	แลงเมียร์	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
2B-SCG	6	40	360	39.2969	แลงเมียร์	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

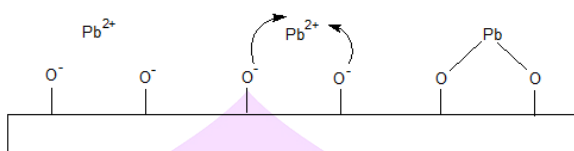
หมายเหตุ: เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที

$Q_{m,exp}$ คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

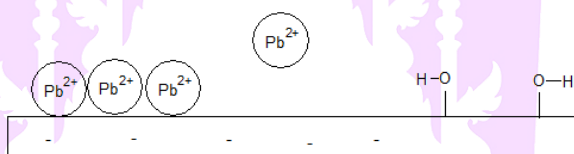
ผลการดูดซับแสดงให้เห็นว่าทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับตะกั่วได้ค่อนข้างดี เนื่องจากไอออนตะกั่วมีขนาดเล็ก จึงสามารถเข้าเกาะบนพื้นผิวกากกาแฟได้ง่าย แต่จะเห็นว่ากากกาแฟที่ถูกดัดแปลงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่ากากกาแฟและกากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่พร้อมจับกับสารปนเปื้อนมากกว่า โดยเมื่อกำหนดให้ปริมาณตัวดูดซับคงที่พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับตะกั่วของทุกตัวดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วจะยิ่งทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มขึ้น

และทุกตัวดูดซับเกิดการดูดซับทางเคมีแบบขั้นเดียวตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์
ในลักษณะการเกิดคีเลต (Chelation) ระหว่างออกซิเจนกับไอออนตะกั่ว ดังภาพ 49



ภาพ 49 การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์

อย่างไรก็ตาม พบว่าโครงสร้างอินทรีย์บนพื้นผิวของกากกาแฟและกากกาแฟที่แช่ใน
น้ำปราศจากไอออนที่ยังไม่ถูกดัดแปลงพื้นผิวนั้นสามารถเกิดการดูดซับทางกายภาพได้
ในบางส่วน โดยเกิดการดูดซับตามแบบจำลองฟรอยด์ลิซบนพื้นผิวที่มีประจุเป็นลบ ดังภาพ 50



ภาพ 50 การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิซ

ตาราง 16 สรุปผลปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วยกากกาแฟ (SCG), กากกาแฟที่แช่น้ำปราศจากไอออน (W-SCG), กากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2% w/v (2C-SCG) และกากกาแฟที่ถูกดัดแปลงด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 2% w/v (2B-SCG)

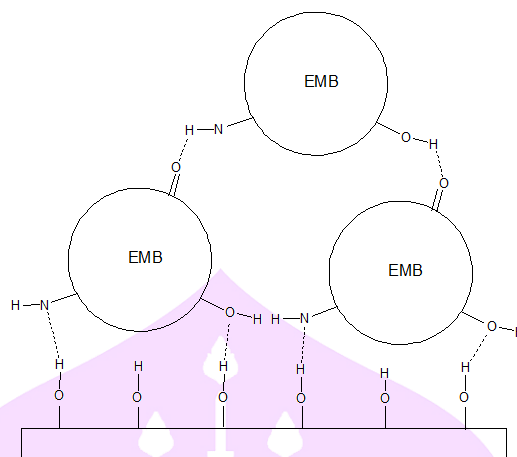
ตัวดูดซับ	ปัจจัยที่เหมาะสม					
	pH	C_i (mg/L)	t (min)	$Q_{m,exp}$ (mg/g)	แบบจำลอง การดูดซับ	จลนพลศาสตร์ การดูดซับ
SCG	4	2.50	360	3.7978	ฟรอยด์ลิช	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
W-SCG	4	2.50	120	3.4734	ฟรอยด์ลิช	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
2C-SCG	4	2.50	300	2.2005	ฟรอยด์ลิช > แลงเมียร์	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
2B-SCG	4	2.50	120	2.7238	ฟรอยด์ลิช > แลงเมียร์	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

หมายเหตุ: เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที

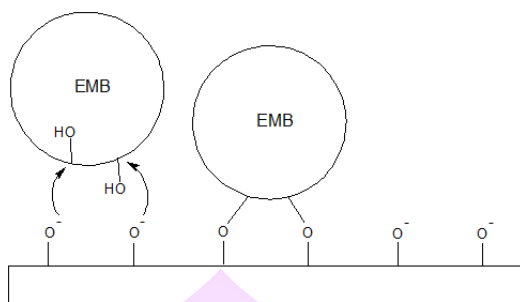
$Q_{m,exp}$ คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต แสดงให้เห็นว่าทุกตัวดูดซับสามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตได้ดีที่สุดในช่วง pH 4 – 6 ซึ่งเป็น pH ที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นบวก โดยอีมาเมกติน เบนโซเอตจะถูกดูดซับบนกากกาแฟด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมไฮโดรเจนที่เกาะอยู่กับออกซิเจนในโครงสร้างเซลล์ลูลิสและลิแกนด์กับอะตอมออกซิเจนและไนโตรเจนในโครงสร้างของอีมาเมกติน เบนโซเอต (ภาพ 48) จึงเกิดเป็นการดูดซับทางกายภาพได้หลายชั้นตรงตามแบบจำลองการดูดซับฟรอยด์ลิช และเมื่อกำหนดให้ปริมาณตัวดูดซับคงที่ พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตของทุกตัวดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของอีมาเมกติน เบนโซเอตจะยิ่งทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับเพิ่มขึ้น



**ภาพ 51 การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต บนพื้นผิวกากกาแฟตามแบบจำลอง
การดูดซับฟรอยด์ลิซ**

กากกาแฟและกากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออนสามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอต ได้ดีกว่ากากกาแฟที่ถูกดัดแปลง เนื่องจากการดัดแปลงกากกาแฟด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต จะทำให้อะตอมไฮโดรเจนที่เกาะกับออกซิเจนบนพื้นผิวกากกาแฟหลุดออก เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะจับกับโมเลกุลของอีมาเมกติน เบนโซเอตได้ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวตามแบบจำลองแลงเมียร์ ขณะที่บริเวณที่ไม่ถูกดัดแปลงจะเกิดการดูดซับทางกายภาพแบบหลายชั้น ประกอบกับโมเลกุลของอีมาเมกติน เบนโซเอตมีขนาดใหญ่ เมื่อถูกดูดซับได้แค่ชั้นเดียว จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตลดลง อย่างไรก็ตาม การใช้กากกาแฟและกากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออนในการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตไม่ค่อยมีความเสถียร หากระหว่างการดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ซึ่งทำให้ประจุที่พื้นผิวกากกาแฟเปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้อีมาเมกติน เบนโซเอตที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวหลุดออกได้ ทั้งนี้จะเห็นว่ากากกาแฟที่ถูกดัดแปลงมีความเสถียรต่อปัจจัยภายนอกมากกว่า โดยสามารถดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตในสถานะที่มีค่า pH สูงได้ดีกว่า



ภาพ 52 การดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอต บนพื้นผิวกากกาแฟที่ดัดแปลง
ตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์

ประโยชน์จากงานวิจัย

กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยไฮดรอกซีคาร์บอนและไฮดรอกซีโบรคาร์บอนสามารถนำไปใช้ในการดูดซับตะกั่วและอีมาเมกดิน เบนโซเอตในพื้นที่การเกษตรได้ โดยสามารถใช้ได้ในช่วง pH ตั้งแต่ 4 – 10 ซึ่งเป็นค่า pH ที่พบเจอได้ในธรรมชาติ และยังมีความเสถียร ดูดซับได้อย่างคงที่ หากนำไปใช้ดูดซับตะกั่วในพื้นที่เกษตรจะทำให้ลดการตกค้างของตะกั่วในผักและผลไม้ที่มนุษย์กิน หรือหากนำไปใช้ผสมดินจะสามารถสกัดกั้นการปนเปื้อนตะกั่วสู่แหล่งน้ำหรือพื้นที่อื่น ๆ ได้ หากนำไปใช้ดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอต ซึ่งเป็นสารที่อันตรายอย่างรุนแรงต่อสัตว์สำคัญทางระบบนิเวศอย่างผึ้งที่ทำหน้าที่ผสมเกสรและขยายพันธุ์พืช แพลงก์ตอนสัตว์และไรแดงที่เป็นรากฐานของห่วงโซ่อาหารโดยเฉพาะในระบบนิเวศแหล่งน้ำ จะช่วยลดอัตราการตายของสัตว์เหล่านี้ ทำให้ระบบนิเวศไม่ถูกทำลายและคงสมดุลไว้ได้

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

ตัวดูดซับกากกาแฟทั้ง 4 แบบ เหมาะจะนำไปใช้ดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยเฉพาะกากกาแฟและกากกาแฟที่แช่ในน้ำปราศจากไอออน สามารถประยุกต์ใช้ในแนวกันแม่น้ำหรือเป็นวัสดุดูดซับในฝายกั้นน้ำบนภูเขาได้ เนื่องจากแหล่งน้ำธรรมชาติมักมีค่า pH เป็นกรดอ่อน ๆ ตรงกับสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 4 และตัวดูดซับเป็นวัสดุธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

กากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยไฮดรอกซีคาร์บอนและกากกาแฟที่ดัดแปลงด้วยไฮดรอกซีโบรคาร์บอน เหมาะจะนำไปใช้กับการดูดซับตะกั่วในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความสามารถ

ในการดูดซับสูง และมีความเสถียร นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์เป็นกระถางต้นไม้หรือ
แนวกันพื้นที่เกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในปุ๋ยเคมี เป็นต้น

หลังการใช้งานดูดซับ สามารถชะล้างสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวกากกาแฟ
ได้ (Desorption) โดยใช้สารละลายประเภทกรดแก่ ต่างแก่ หรือเกลือเข้มข้นในการชะล้าง การเลือก
สารชะล้าง (Desorption agent) เลือกจากสารละลายที่สารปนเปื้อนละลายได้ดี เช่น ตะกั่ว
สามารถละลายได้ดีในกรด จึงเลือกกรดแก่ในการชะล้าง อีมาเมกดิน เบนโซเอตถูกดูดซับบน
พื้นผิวด้วยแรงทางกายภาพ จึงเลือกใช้สารละลายเกลือเข้มข้นในการชะล้าง เป็นต้น ทั้งนี้การชะ
ล้างเป็นการทำให้สารปนเปื้อนละลายออกจากพื้นผิวดูดซับแล้วแลกเปลี่ยนประจุบวกจาก
สารละลายเข้าไปแทนที่ ดังนั้น ตัวดูดซับที่ถูกชะล้างจึงสามารถนำกลับไปใช้ดูดซับได้ใหม่
(Regeneration)

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. นอกจากปัจจัยจากค่า pH ของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ และ
เวลาที่ใช้ในการดูดซับจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแล้ว อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่
อาจส่งผลต่อการดูดซับ จึงควรต้องมีการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์เพิ่มเติม
2. การวิเคราะห์พื้นผิวของตัวดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscopy, SEM) จะทำให้เห็นภาพพื้นผิวจริงของกากกาแฟควบคู่กับ
การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากกาแฟทั้งก่อนและหลังดูดซับ
3. ควรทำการดูดซับตะกั่วและอีมาเมกดิน เบนโซเอตจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงใน
อุตสาหกรรมหรือพื้นที่การเกษตร เพื่อให้ได้สภาวะที่ตรงกับการใช้งานจริง และทำการทดลอง
หาสารชะล้างที่เหมาะสมเพื่อนำกากกาแฟมาใช้ดูดซับซ้ำได้

บรรณานุกรม

- ไกรศรี ทองเสมียน. (2551). **ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- दारुंग संग्खทอง และวิทยาภรณ์ คงอยู่. (2559). รูปฟอร์มทางเคมีของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์. **Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University**, 3(6), 295–309.
- ตุลญา มะสีพันธ์ และศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์ (ผู้บรรยาย). (28 มีนาคม 2557). การประเมินการปนเปื้อนของทองแดง และตะกั่ว ผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในพื้นที่เกษตรกรรมตำบลหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี โดยใช้แบบจำลอง Hydrus-5D. ในการประชุม **วิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 15**. (หน้า 385–391). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. (2547). **การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสีย โดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วรวิทย์ วรภัทร์ และธณีนี วงศ์กนิษฐ. (2558). LD50. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2565. จาก http://ohs.sci.dusit.ac.th/wp/?page_id=1274
- วรวิทย์ จันท์สุวรรณ. (2558). **ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ**. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ.
- ศรัณย์ จิตตวนิชประภา. (2554). **การดูดซับยาปฏิชีวนะ Ciprofloxacin ด้วยถ่านที่เตรียมจากกากกาแฟ**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. (2555). **GHS-SDS**. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2565. จาก www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=10&ID=5
- หญิง อามาน, มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์ และโกวิทย์ ปิยะมงคล. (2561). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน: สมดุลและการประยุกต์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, 28(4), 825–835.
- Adler, E. (1977). Lignin chemistry—past, present and future. **Wood Science and Technology**,

1(3), 169–218.

Al-Zaben, M. I. and Mekhamer, W. K. (2017). Removal of 4-chloro-2-methyl phenoxy acetic acid pesticide using coffee wastes from aqueous solution. **Arabian Journal of Chemistry**, 10, S1523–S1529.

Anderson, B., Doelling, P. and Hetrick A. J. (2009). **Ecological risk assessment for emamectin benzoate use as a tree injection insecticide to control arthropod pests**. Washington, D.C.: U.S. environmental protection agency.

Azouaou, N., Sadaoui, Z., Djaafri, A. and Mokaddem, H. (2010). Adsorption of cadmium from aqueous solution onto untreated coffee grounds: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. **Journal of Hazardous Materials**, 184(1), 126–134.

Ballesteros, L., Teixeira, J. and Mussatto, S. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. **Food and Bioprocess Technology**, 7(6), 3493–3503.

Canadian Centre for Occupational Health & Safety. (2016). **WHMIS 2015 – Hazard Classes and Categories**. Retrieved July 15, 2022, from www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/whmis_ghs/hazard_classes.html

Cherdchoo, W., Nithettham, S. and Charoenpanich, J. (2019). Removal of Cr(VI) from synthetic wastewater by adsorption onto coffee ground and mixed waste tea. **Chemosphere**, 221, 758–767.

Dai, Y., Zhang, D. and Zhang, K. (2016). Nitrobenzene-adsorption capacity of NaOH-modified spent coffee ground from aqueous solution. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 68, 232–238.

Dai, Y., Zhang, K., Meng, X., Li, J., Guan, X., Sun, Q., et al., (2019). New use for spent coffee ground as an adsorbent for tetracycline removal in water. **Chemosphere**, 215, 163–172.

Dong, Y., and Zaera, F. (2017). Kinetics of hydrogen adsorption during catalytic reactions on transition metal surfaces. **Catalysis Science & Technology**, 7(22), 5354–5364.

Durkin, P. R. (2010). **Emamectin benzoate human health and ecological risk assessment (final report)**. New York: Syracuse Environmental Research Associates, Inc.

Franca, A. S., Oliveira, L. S., and Ferreira, M. E. (2009). Kinetics and equilibrium studies of methylene

- blue adsorption by spent coffee grounds. **Desalination**, 249(1), 267–272.
- Huang, B. B., Liu, D. X., Liu, D. K., and Wu, G. (2019). Application of Solid Dispersion Technique to Improve Solubility and Sustain Release of Emamectin Benzoate. **Molecules (Basel, Switzerland)**, 24(23), 4315.
- International Coffee Organization. (2020). **Monthly Coffee Market Report (2019/20)**. Retrieved July 15, 2022, from London: www.ico.org/trade_statistics.asp.
- Isernia, L. F. (2014). Study of the influence of physical–chemical properties of steamed H–MOR zeolites in the mechanism of adsorption of fatty acids and their esterification. **Microporous and Mesoporous Materials**, 200, 19–26.
- Jeon, C. (2017). Adsorption and recovery of immobilized coffee ground beads for silver ions from industrial wastewater. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 53, 261–267.
- Kim, M.–S., Min, H.–G., Koo, N., Park, J., Lee, S.–H., Bak, G.–I. and Kim, J.–G. (2014). The effectiveness of spent coffee grounds and its biochar on the amelioration of heavy metals–contaminated water and soil using chemical and biological assessments. **Journal of Environmental Management**, 146, 124–130.
- Luo, X., Ding, L. and Luo, J. (2015). Adsorptive Removal of Pb(II) Ions from Aqueous Samples with Amino–Functionalization of Metal–Organic Frameworks MIL–101(Cr). **Journal of Chemical & Engineering Data**, 60(6), 1732–1743.
- Maranescu, B., Lupa, L., and Visa, A. (2017). Heavy metal removal from waste waters by phosphonate metal organic frameworks. **Pure and Applied Chemistry**, 90(1). 35–47.
- Maryana, R., Ma’rifatun, D., Wheni, A. I., Wahono, S., and Rizal, W. (2014). Alkaline Pretreatment on Sugarcane Bagasse for Bioethanol Production. **Energy Procedia**, 47, 250–254.
- McNutt, J. and He, Q. (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 71, 78–88.
- Mueanmas, C., Nikhom, R., Petchkaew, A., Iewkittayakorn, J. and Prasertsit, K. (2019). Extraction and esterification of waste coffee grounds oil as non–edible feedstock for biodiesel production. **Renewable Energy**, 133, 1414–1425.
- Niu, C., Wang, C., Wu, G., Yang, J., Wen, Y., Meng, S., Lin, X., Pang, X., and An, L. (2019).

- Toxic effects of the Emamectin Benzoate exposure on cultured human bronchial epithelial (16HBE) cells. **Environmental Pollution**, 257, 113618.
- Rudnik, E. (2013). 10–Compostable Polymer Materials: Definitions, Structures, and Methods of Preparation. In S. Ebnesajjad (Ed.), **Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics** (pp. 189–211). Boston: William Andrew Publishing.
- Sertoli, L., Carnier, R., Abreu, C., Coscione, A., Melo, L. (2019). Coffee waste biochar: characterization and zinc adsorption from aqueous solution. **Coffee Science**, 14, 518.
- Toronto Research Chemicals. (2018). **Safety Data Sheet of Emamectin benzoate**. Retrieved April 6, 2020, from [www.trc-canada.com/prod-img/MSDS/E520500 MSDS.pdf](http://www.trc-canada.com/prod-img/MSDS/E520500%20MSDS.pdf)
- Velde-Koerts, T. V. D. (2014). **EMAMECTIN BENZOATE (247)**. Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment.
- Viva. (2020). **What Is The Difference Between Physical and Chemical Adsorption**. Retrieved 6 April 2020 from vivadifferences.com/physical-and-chemical-adsorption.
- Wen, X., Liu, H., Zhang, L., Zhang, J., Fu, C., Shi, X., et al., (2019). Large-scale converting waste coffee grounds into functional carbon materials as high-efficient adsorbent for organic dyes. **Bioresource Technology**, 272, 92–98.
- Willis, K., and Ling, N. (2003). The toxicity of emamectin benzoate, an aquaculture pesticide, to planktonic marine copepods. **Aquaculture**, 221, 289–297.
- Yen, T. H., and Lin, J. L. (2004). Acute Poisoning with Emamectin Benzoate. **Journal of Toxicology: Clinical Toxicology**, 42(5), 657–661.
- Zhou, L., Luo, F., Zhang, X., Jiang, Y., Lou, Z., and Chen, Z. (2016). Dissipation, transfer and safety evaluation of emamectin benzoate in tea. **Food Chemistry**, 202, 199–204.
- Zhu, J., He, Y., Gao, M., Zhou, W., Hu, J., Shen, J., and Zhu, Y. C. (2011). Photodegradation of emamectin benzoate and its influence on efficacy against the rice stem borer, *Chilo suppressalis*. **Crop Protection**, 30(10), 1356–1365.



ภาคผนวก ก ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ pH ตั้งแต่ 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG
และ 2B-SCG

ตาราง 17 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย
SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
2.00	2.09	30.00	29.83	0.1697
3.00	3.16	30.00	26.31	3.6924
4.00	3.99	30.00	12.82	17.1664
5.00	4.21	30.00	8.51	21.4886
6.00	4.76	30.00	6.86	23.1177

ตาราง 18 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย
W-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
2.00	2.05	30.00	30.10	0.0800
3.00	3.20	30.00	27.59	2.3986
4.00	4.10	30.00	15.66	14.3057
5.00	4.31	30.00	12.11	17.8118
6.00	4.42	30.00	10.08	19.8698

ตาราง 19 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย
2C-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
2.00	2.09	30.00	27.47	2.5248
3.00	3.34	30.00	24.08	5.9040
4.00	5.48	30.00	-0.11	30.0415
5.00	6.16	30.00	-0.84	30.7602
6.00	6.32	30.00	-0.95	30.8331

ตาราง 20 ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย
2B-SCG ที่ค่า pH 2 – 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
2.00	2.10	30.00	29.37	0.6285
3.00	3.31	30.00	25.13	4.8571
4.00	5.10	30.00	1.75	28.2089
5.00	5.65	30.00	-0.04	30.0025
6.00	6.12	30.00	-0.40	30.3414

ภาคผนวก ข ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 21 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
6.00	5.21	5.00	-1.65	6.6422
6.00	4.97	10.00	-1.23	11.2177
6.00	4.43	20.00	2.39	17.5971
6.00	4.30	30.00	8.61	21.3867
6.00	4.35	40.00	12.79	27.2024

ตาราง 22 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย W-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
6.00	5.53	5.00	-1.73	6.7047
6.00	4.98	10.00	-1.60	11.5709
6.00	4.56	20.00	2.22	17.7391
6.00	4.48	30.00	10.26	19.6828
6.00	4.47	40.00	18.13	21.8318

ตาราง 23 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
6.00	7.26	5.00	-0.86	5.8462
6.00	7.03	10.00	-1.40	11.3680
6.00	6.73	20.00	-1.53	21.4882
6.00	6.45	30.00	-1.25	31.1953
6.00	6.05	40.00	0.24	39.6577

ตาราง 24 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 5 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ pH 6 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
6.00	6.88	5.00	-1.58	6.5659
6.00	6.61	10.00	-1.82	11.7966
6.00	6.19	20.00	-1.71	21.6651
6.00	5.94	30.00	-1.03	30.9709
6.00	5.90	40.00	0.56	39.2969

ภาคผนวก ค ผลการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 25 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	4.82	23.71	16.2261
15	4.69	20.66	19.3039
30	4.66	18.71	21.2458
60	4.60	16.59	23.3567
90	4.56	17.90	22.0807
120	4.57	16.45	23.5154
150	4.57	16.34	23.6401
180	4.53	16.32	23.6670
240	4.52	16.12	23.8273
300	4.53	15.99	24.0110
360	4.56	14.69	25.2445

ตาราง 26 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	4.73	24.19	15.7908
15	4.69	20.30	19.6842
30	4.56	19.53	20.4312
60	4.57	17.64	22.3367
90	4.53	17.52	22.4617
120	4.54	17.01	22.9425
150	4.44	18.43	21.5540
180	4.48	17.97	21.9553

ตาราง 26 (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
240	4.54	16.76	23.2128
300	4.54	16.87	23.0982
360	4.53	16.02	23.9206

ตาราง 27 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
ด้วย 2C-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที

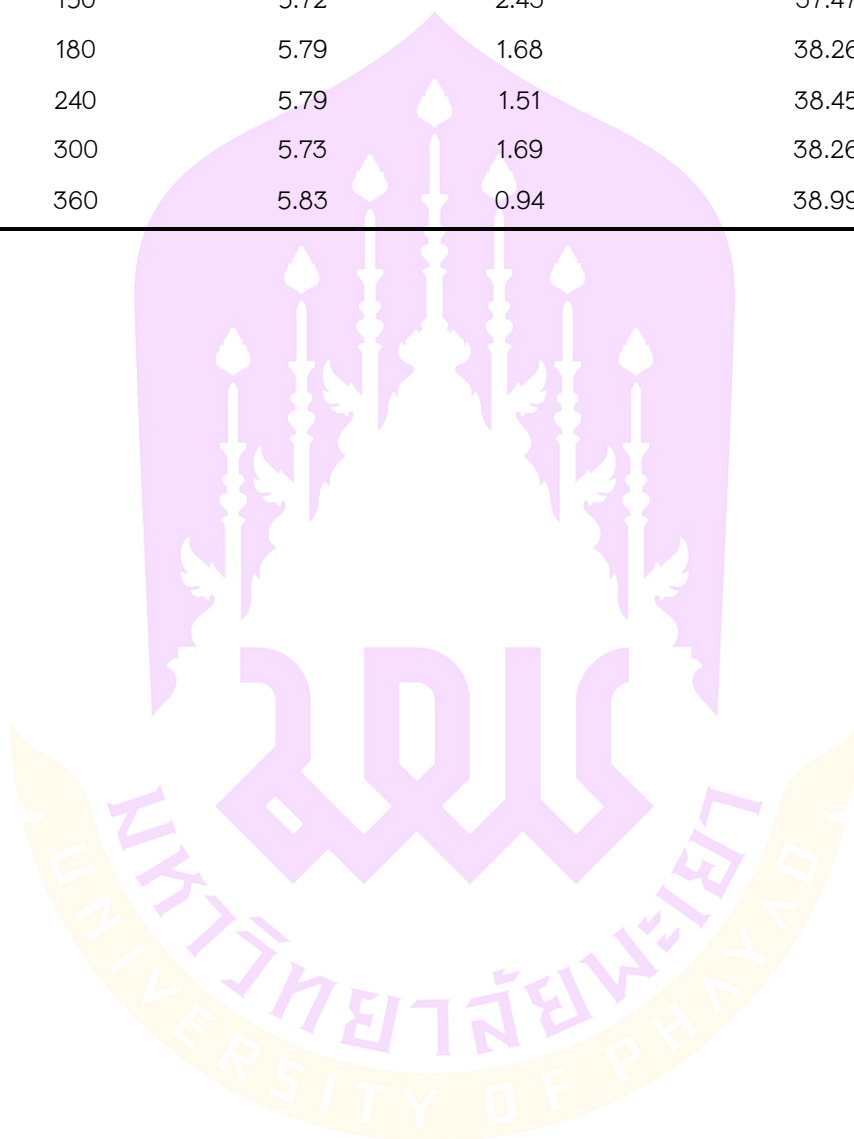
เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ ซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	6.14	21.42	18.5467
15	6.33	12.86	27.0906
30	6.35	8.13	31.8209
60	6.41	4.53	35.4079
90	6.48	2.78	37.1816
120	6.54	2.12	37.7677
150	6.55	1.26	38.7352
180	6.55	0.90	39.0005
240	6.61	0.70	39.2263
300	6.59	0.38	39.5524
360	6.68	0.34	39.5848

ตาราง 28 ผลของการดูดซับสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
ด้วย 2B-SCG ที่ pH 6 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5 – 360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	5.76	18.37	21.6232
15	5.78	12.65	27.3266
30	5.70	8.22	31.6843
60	5.77	3.89	36.0852
90	5.79	2.89	37.0257

ตาราง 28 (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
120	5.74	2.74	37.1964
150	5.72	2.43	37.4792
180	5.79	1.68	38.2694
240	5.79	1.51	38.4520
300	5.73	1.69	38.2658
360	5.83	0.94	38.9936



ภาคผนวก ง พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช
ของการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 29 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ
การดูดซับตะกั่วด้วย SCG

t	C _e	Q _e	C _e /Q _e	log Q _e	log C _e
(min)	(mg/L)	(mg/g)	(g/L)	(mg/g)	(mg/L)
5	23.71	16.2261	1.46	1.21	1.37
15	20.66	19.3039	1.07	1.29	1.32
30	18.71	21.2458	0.88	1.33	1.27
60	16.59	23.3567	0.71	1.37	1.22
90	17.90	22.0807	0.81	1.34	1.25
120	16.45	23.5154	0.70	1.37	1.22
150	16.34	23.6401	0.69	1.37	1.21
180	16.32	23.6670	0.69	1.37	1.21
240	16.12	23.8273	0.68	1.38	1.21
300	15.99	24.0110	0.67	1.38	1.20
360	14.69	25.2445	0.58	1.40	1.17

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 30 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช
ของการดูดซับตะกั่วด้วย W-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	24.19	15.7908	1.53	1.20	1.38
15	20.30	19.6842	1.03	1.29	1.31
30	19.53	20.4312	0.96	1.31	1.29
60	17.64	22.3367	0.79	1.35	1.25
90	17.52	22.4617	0.78	1.35	1.24
120	17.01	22.9425	0.74	1.36	1.23
150	18.43	21.5540	0.85	1.33	1.27
180	17.97	21.9553	0.82	1.34	1.25
240	16.76	23.2128	0.72	1.37	1.22
300	16.87	23.0982	0.73	1.36	1.23
360	16.02	23.9206	0.67	1.38	1.20

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 31 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช
ของการดูดซับตะกั่วด้วย 2C-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	21.42	18.5467	1.16	1.27	1.33
15	12.86	27.0906	0.47	1.43	1.11
30	8.13	31.8209	0.26	1.50	0.91
60	4.53	35.4079	0.13	1.55	0.66
90	2.78	37.1816	0.07	1.57	0.44
120	2.12	37.7677	0.06	1.58	0.33
150	1.26	38.7352	0.03	1.59	0.10
180	0.90	39.0005	0.02	1.59	-0.05
240	0.70	39.2263	0.02	1.59	-0.16
300	0.38	39.5524	0.01	1.60	-0.42
360	0.34	39.5848	0.01	1.60	-0.47

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 32 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช
ของการดูดซับตะกั่วด้วย 2B-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	18.37	21.6232	0.85	1.33	1.26
15	12.65	27.3266	0.46	1.44	1.10
30	8.22	31.6843	0.26	1.50	0.91
60	3.89	36.0852	0.11	1.56	0.59
90	2.89	37.0257	0.08	1.57	0.46
120	2.74	37.1964	0.07	1.57	0.44
150	2.43	37.4792	0.06	1.57	0.39
180	1.68	38.2694	0.04	1.58	0.23
240	1.51	38.4520	0.04	1.58	0.18
300	1.69	38.2658	0.04	1.58	0.23
360	0.94	38.9936	0.02	1.59	-0.03

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ภาคผนวก จ ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ตั้งแต่ 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยตัวดูดซับ SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 33 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	5.67	12.50	10.24	2.2468
5.00	5.79	12.50	10.62	1.8768
6.00	5.98	12.50	10.65	1.8452
7.00	6.39	12.50	11.14	1.3500
8.00	6.51	12.50	11.22	1.2726
9.00	6.79	12.50	11.22	1.2718
10.00	8.02	12.50	12.09	0.4114

ตาราง 34 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	5.43	12.50	9.94	2.5552
5.00	5.63	12.50	10.74	1.8835
6.00	5.91	12.50	10.66	1.8105
7.00	6.35	12.50	11.24	1.2597
8.00	6.53	12.50	11.37	1.1334
9.00	6.73	12.50	11.56	0.9384
10.00	7.76	12.50	12.36	0.2504

ตาราง 35 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	6.70	12.50	10.48	2.0106
5.00	7.01	12.50	10.66	1.8341
6.00	7.08	12.50	10.63	1.3030
7.00	7.33	12.50	11.26	1.2327
8.00	7.39	12.50	11.22	1.2780
9.00	7.70	12.50	11.28	1.2217
10.00	8.37	12.50	11.18	1.3182

ตาราง 36 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 – 10 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	6.50	12.50	10.34	2.1610
5.00	6.68	12.50	10.64	1.8609
6.00	6.88	12.50	10.46	1.4833
7.00	7.12	12.50	11.03	1.4648
8.00	7.22	12.50	10.92	1.5772
9.00	7.41	12.50	11.02	1.4795
10.00	8.33	12.50	10.77	1.7287

ภาคผนวก จ ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH เท่ากับ 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วย SCG, W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 37 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกกรัม)
4.00	4.96	2.50	1.80	0.6921
4.00	5.03	5.00	4.04	0.9557
4.00	5.14	7.50	6.09	1.4049
4.00	5.25	10.00	8.33	1.6664
4.00	5.36	12.50	10.07	2.4249

ตาราง 38 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกกรัม)
4.00	5.15	2.50	1.52	1.1181
4.00	5.17	5.00	3.53	1.4726
4.00	5.28	7.50	5.82	1.6824
4.00	5.36	10.00	7.80	2.1976
4.00	5.42	12.50	9.02	3.4734

ตาราง 39 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	7.00	2.50	2.49	0.0715
4.00	6.86	5.00	4.81	0.1912
4.00	6.79	7.50	7.25	0.2483
4.00	6.78	10.00	9.35	0.6461
4.00	6.77	12.50	10.86	1.6349

ตาราง 40 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 2.50 – 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
4.00	6.73	2.50	2.15	0.3503
4.00	6.62	5.00	4.46	0.5344
4.00	6.58	7.50	6.67	0.8320
4.00	6.55	10.00	8.43	1.5679
4.00	6.56	12.50	9.77	2.7238

ภาคผนวก ข ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัม
ต่อลิตร ที่ pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที ด้วย SCG,
W-SCG, 2C-SCG และ 2B-SCG

ตาราง 41 ผลการดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อ
ลิตรด้วย SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	5.26	10.28	2.2121
15	5.38	10.15	2.3477
30	5.39	10.03	2.4604
60	5.44	9.96	2.5352
90	5.39	9.55	2.9421
120	5.31	9.51	2.9872
150	5.41	9.42	3.0769
180	5.38	9.45	3.0509
240	5.38	9.60	2.8937
300	5.43	8.95	3.5349
360	5.35	8.69	3.7978

ตาราง 42 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย W-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	5.26	10.77	1.7279
15	5.33	10.40	2.0933
30	5.32	10.28	2.2124
60	5.39	9.99	2.5086
90	5.34	10.02	2.4771
120	5.26	9.81	2.6873
150	5.28	9.99	2.5038
180	5.36	9.99	2.5083
240	5.37	9.98	2.5144
300	5.40	10.16	2.3387
360	5.42	10.23	2.2665

ตาราง 43 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2C-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	6.43	10.59	1.9067
15	6.52	10.36	2.1422
30	6.59	10.38	2.1159
60	6.58	10.30	2.1978
90	6.55	10.30	2.1982
120	6.69	10.33	2.1645
150	6.74	10.40	2.0976
180	6.66	10.42	2.0784
240	6.65	10.32	2.1751
300	6.60	10.30	2.2005
360	6.65	10.38	2.1206

ตาราง 44 ผลการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตความเข้มข้นเริ่มต้น 12.50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย 2B-SCG ที่ค่า pH 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 5-360 นาที

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	pH สุดท้าย	ความเข้มข้นสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	6.12	10.67	1.8268
15	6.34	10.57	1.9271
30	6.39	10.57	1.9229
60	6.44	10.46	2.0316
90	6.36	10.50	1.9937
120	6.37	10.41	2.0904
150	6.33	10.56	1.9314
180	6.40	10.48	2.0155
240	6.38	10.55	1.9536
300	6.38	10.62	1.8748
360	6.32	10.41	2.0894

ภาคผนวก ช พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช
ของการดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย SCG, W-SCG, 2C-SCG และ
2B-SCG

ตาราง 45 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ
การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตด้วย SCG

t	C _e	Q _e	C _e /Q _e	log Q _e	log C _e
(min)	(mg/L)	(mg/g)	(g/L)	(mg/g)	(mg/L)
5	10.28	2.2121	4.65	0.34	1.01
15	10.15	2.3477	4.32	0.37	1.01
30	10.03	2.4604	4.08	0.39	1.00
60	9.96	2.5352	3.93	0.40	1.00
90	9.55	2.9421	3.25	0.47	0.98
120	9.51	2.9872	3.18	0.48	0.98
150	9.42	3.0769	3.06	0.49	0.97
180	9.45	3.0509	3.10	0.48	0.98
240	9.60	2.8937	3.32	0.46	0.98
300	8.95	3.5349	2.53	0.55	0.95
360	8.69	3.7978	2.29	0.58	0.94

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 46 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ
การดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วย W-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	10.77	1.7279	6.23	0.24	1.03
15	10.40	2.0933	4.97	0.32	1.02
30	10.28	2.2124	4.65	0.34	1.01
60	9.99	2.5086	3.98	0.40	1.00
90	10.02	2.4771	4.05	0.39	1.00
120	9.81	2.6873	3.65	0.43	0.99
150	9.99	2.5038	3.99	0.40	1.00
180	9.99	2.5083	3.98	0.40	1.00
240	9.98	2.5144	3.97	0.40	1.00
300	10.16	2.3387	4.34	0.37	1.01
360	10.23	2.2665	4.51	0.36	1.01

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 47 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ
การดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วย 2C-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	10.59	1.9067	5.56	0.28	1.02
15	10.36	2.1422	4.83	0.33	1.02
30	10.38	2.1159	4.91	0.33	1.02
60	10.30	2.1978	4.69	0.34	1.01
90	10.30	2.1982	4.69	0.34	1.01
120	10.33	2.1645	4.77	0.34	1.01
150	10.40	2.0976	4.96	0.32	1.02
180	10.42	2.0784	5.01	0.32	1.02
240	10.32	2.1751	4.75	0.34	1.01
300	10.30	2.2005	4.68	0.34	1.01
360	10.38	2.1206	4.89	0.33	1.02

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ตาราง 48 พารามิเตอร์สำหรับสร้างกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรอยด์ลิชของ
การดูดซับอีมาเมกดิน เบนโซเอตด้วย 2B-SCG

t (min)	C _e (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e /Q _e (g/L)	log Q _e (mg/g)	log C _e (mg/L)
5	10.67	1.8268	5.84	0.26	1.03
15	10.57	1.9271	5.48	0.28	1.02
30	10.57	1.9229	5.50	0.28	1.02
60	10.46	2.0316	5.15	0.31	1.02
90	10.50	1.9937	5.27	0.30	1.02
120	10.41	2.0904	4.98	0.32	1.02
150	10.56	1.9314	5.47	0.29	1.02
180	10.48	2.0155	5.20	0.30	1.02
240	10.55	1.9536	5.40	0.29	1.02
300	10.62	1.8748	5.67	0.27	1.03
360	10.41	2.0894	4.98	0.32	1.02

หมายเหตุ: เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ในหน่วยนาที่

C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	รัตนภรณ์ รัตนกรไพบูลย์
วัน เดือน ปี เกิด	11 ธันวาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2561 วท.บ. (เคมี), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	601/13 ถ.น้ำทอง ม.9 ต.นาจักร อ.เมือง จ.แพร่ 54000
ผลงานตีพิมพ์	รัตนภรณ์ รัตนกรไพบูลย์ (ผู้บรรยาย). (28 มกราคม 2564). การดูดซับอีมาเมกติน เบนโซเอตในน้ำเสียด้วยกากกาแฟ ในการประชุมวิชาการระดับชาติพะเยาวิจัย ครั้งที่ 10. (หน้า 2899–2909). พะเยา: มหาวิทยาลัยพะเยา.
รางวัลที่ได้รับ	–

