

การใช้ประโยชน์จากกากไถอะตอมไมต์และสไลด์จากอุตสาหกรรมเครื่องตี้มเพื่อการดูดซับฟีนอล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Utilization of diatomite waste and sewage sludge from beverage industry for phenol
adsorption



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ประโยชน์จากกากไถอะตอมไมต์และสไลด์จาก อุตสาหกรรมเครื่องตีเพื่อการดูดซับฟีนอล
โดย	นายสิรภพ โตเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ดวงเดือน อางองค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ดวงเดือน อางองค์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศุภวรรณ วิชพันธุ์)

สิริภพ โตเจริญ : การใช้ประโยชน์จากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์จากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มเพื่อการดูดซับฟีนอล. (Utilization of diatomite waste and sewage sludge from beverage industry for phenol adsorption) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ดวงเดือน อางองค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำสลัดจ์และกากไดอะตอมไมต์ จากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับฟีนอล ด้วยการผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับและนำไปขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุผสมชนิดเม็ดเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ โดยผ่านการศึกษสมบัติทางกายภาพและเคมี การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล อุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ และความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม จากการศึกษาพบว่ากากไดอะตอมไมต์มีองค์ประกอบหลักของซิลิกาที่สูงทำให้มีโครงสร้างผลึกประกอบด้วยคริสโตบาไลต์และควอตซ์ มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและซิลีนอลเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักบนพื้นผิว แต่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ส่งผลให้ไม่เกิดการดูดซับฟีนอล การกระตุ้นกากไดอะตอมไมต์ด้วยสารเคมีและความร้อนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล ในขณะที่ตัวดูดซับสลัดจ์มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน กระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนพบว่าได้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์มีพื้นที่ผิวและรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ตัวดูดซับที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (ASC_KOH_3:1) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 2,565 ตารางเมตรต่อกรัม มีโครงสร้างผลึกเป็นคาร์บอนอสัณฐาน โดยมีจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน ไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองฟรุนดลิชโดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล 56.07 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สมดุล 90 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับถ่านสลัดจ์เกิดได้ดีที่พีเอชระหว่าง 3 ถึง 7 การขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมด้วยวิธีอัดรีดทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นตัวดูดซับสลัดจ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เส้นทางเลือกในการดูดซับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970338921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Sewage sludge, Composite material, Phenol, Adsorbent, Diatomite waste

Siraphop Tocharoen : Utilization of diatomite waste and sewage sludge from beverage industry for phenol adsorption . Advisor: Assoc. Prof. Viboon Sricharoenchaikul, Ph.D. Co-advisor: Duangduen Atong, Ph.D.

This research investigated the feasibility of using sewage sludge and diatomite waste produced by beverage industry for removal of phenol in aqueous solution. Diatomite waste and sewage sludge were treated by chemical and thermal activation for improving adsorption efficiency and subsequently pelletized by extrusion. These adsorbents were characterized for physical and chemical properties using several analytical techniques. Efficiency, kinetics, and isotherms of phenol adsorption were investigated to evaluate effects of activation. Compressive strength of composite adsorbents was studied. The results show that the inorganic component of diatomite waste, silica, led to presence of crystalline cristobalite and quartz. The main functional groups on diatomite waste were siloxane and silanol. Diatomite waste and activated diatomite waste could not adsorb phenol as the result of low surface area. The sewage sludge mainly contains organic carbon with low specific surface area. After the carbonization process with chemical and thermal activations, significant enhancement of porosity and surface area of sludge char was achieved. The adsorbent, which activated by KOH at 800°C under nitrogen (ASC_KOH_3:1), increased specific surface area to 2,565 m²/g and presented amorphous carbon phase. The adsorption kinetic model followed pseudo second order whereas the adsorption equilibrium was presented by Freundlich isotherm model. The adsorption capacity was 56.07 mg/g at phenol equilibrium concentration 90 mg/L. The adsorption reaction was exothermic process. The optimum pH for highest adsorption capacity was between 3 to 7. Moreover, the composite material from extrusion method is easy to handle. Thus, the adsorbents from this research work can be used as good candidate for phenol removal in aqueous solution.

Field of Study:	Environmental Engineering	Student's Signature
Academic Year:	2018	Advisor's Signature
		Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอพระคุณต่อผู้ที่มีรายนามดังต่อไปนี้ อันดับแรกขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.ดวงเดือน อางองค์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับหลักวิชาการและองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ในการออกแบบงานวิจัย รวมถึงการให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนระหว่างดำเนินงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิบูลย์ ลักษณะพึงรัสมิ์ และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย รศ.ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล และ อ.ดร.เจนยุกต์ โล่ห์วัชรินทร์ ดร.ศุภวรรณ วิชพันธ์ ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ สำหรับการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ ดร.จุฬารัตน์ นิตามณีเนตร และ ดร.ปรารค์ทิพย์ แก้วเพ็ญกรอ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียนตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาได้ตามที่ตั้งใจ

สิริภาพ โตเจริญ

สารบัญ

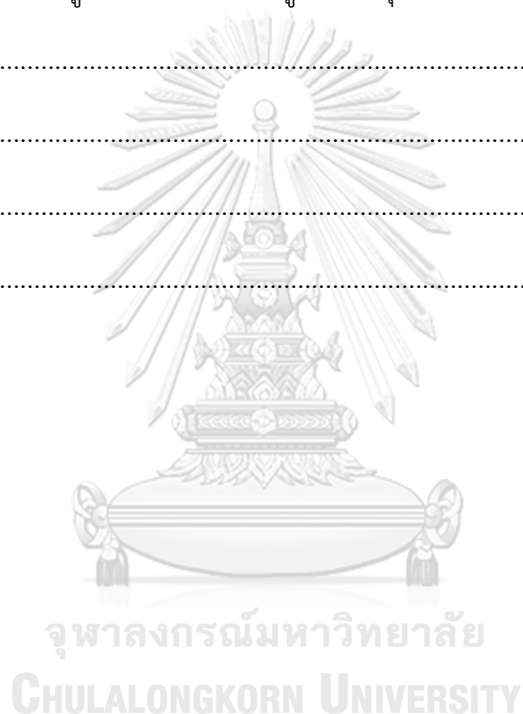
	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ไดอะตอมไมต์ (Diatomite).....	5
2.1.1 การกระจายตัวของไดอะตอมไมต์ในประเทศไทย.....	6
2.1.2 คุณลักษณะของไดอะตอมไมต์.....	8
2.1.3 การใช้ประโยชน์จากไดอะตอมไมต์.....	8
2.1.4 การประยุกต์ใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับ	9
2.2 สลัดจ์ (Sludge).....	9
2.2.1 ประเภทของสลัดจ์.....	10
2.2.2 การจัดการและการกำจัดสลัดจ์	10
2.2.3 การประยุกต์ใช้สลัดจ์เป็นตัวดูดซับ.....	11

2.3 ฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound).....	12
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล	13
2.3.2 กระบวนการกำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิก	14
2.3.3 วัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดฟีนอลในน้ำ.....	15
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	18
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ.....	19
2.4.2 กลไกการดูดซับ (Adsorption mechanism)	22
2.4.3 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm).....	23
2.4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	25
2.4.5 ปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับในวัฏภาคน้ำ	26
2.4.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของตัวดูดซับ	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	40
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	41
3.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์.....	41
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์.....	41
3.1.3 วัสดุและสารเคมี.....	42
3.2 การเตรียมตัวดูดซับ	42
3.2.1 การปรับปรุงกากไดอะตอมไมต์.....	43
3.2.2 การปรับปรุงสไลต์จี้.....	44
3.2.2.1 กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี	45
3.2.2.2 กระตุ้นด้วยความร้อน.....	45
3.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ.....	46
3.3.1 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ ปริมาณธาตุ และโครงสร้างผลึก.....	46

3.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน	47
3.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	47
3.3.4 การหาค่าพีเอชที่ให้ค่าประจรรวมบนพื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์.....	47
3.3.5 การศึกษาลักษณะรูปร่าง.....	47
3.3.6 การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของรูพรุน.....	48
3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์.....	48
3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอล	48
3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล	48
3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล	49
3.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล	50
3.8 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล	51
3.9 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	53
3.10 การศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสม	53
3.10.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion).....	53
3.10.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแห้ง (Dry pressing)	54
3.10.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (Compression test)	54
3.11 ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	55
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	56
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	56
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	56
4.1.1.1 กากไดอะตอมไมต์ (Raw Diatomite Waste)	56
4.1.1.2 สลัดจ์ (Raw Sludge).....	56
4.1.2 โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ	59
4.1.2.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste).....	59

4.1.2.2	ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge).....	61
4.1.3	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ.....	62
4.1.3.1	ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste).....	62
4.1.3.2	ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge).....	65
4.1.4	ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ.....	70
4.1.4.1	ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste).....	70
4.1.4.2	ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge).....	70
4.1.5	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ.....	73
4.1.5.1	ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste).....	73
4.1.5.2	ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge).....	75
4.1.6	ค่าพีเอชที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์ (pH_{pzc}).....	78
4.2	การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์.....	80
4.2.1	ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล.....	80
4.2.1.1	ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste).....	80
4.2.1.1	ตัวดูดซับจากกากสลัดจ์ (Sludge).....	82
4.2.2	จลนศาสตร์การดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากสลัดจ์.....	84
4.2.3	ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล.....	88
4.2.4	การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล.....	92
4.2.5	การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	93
4.3	การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม.....	94
4.3.1	การขึ้นรูปตัวดูดซับด้วย.....	94
4.3.3	ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม.....	99
4.3.4	ความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม.....	102
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ	104
5.1.1.1 กากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste)	104
5.1.1.2 สลัดจ์ (Sludge).....	104
5.1.2 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste) และสลัดจ์ (Sludge).....	105
5.1.3 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม	105
5.2 ข้อเสนอแนะ	106
ภาคผนวก.....	107
บรรณานุกรม.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	138



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งของแหล่งที่พบไดอะตอมไมต์ในจังหวัดลำปาง	6
ตารางที่ 2.2 ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์หลักเป็นร้อยละของไดอะตอมไมต์จากแหล่งต่าง ๆ ในโลก...	8
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟินอล.....	13
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบฟินอลิก.....	14
ตารางที่ 2.5 พลังงานพันธะของแรงดึงดูดทางกายภาพแต่ละประเภท.....	22
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์.....	28
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ (Raw Sludge) และกากไดอะตอมไมต์ (Raw Diatomite Waste)	58
ตารางที่ 4.2 ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ	73
ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวของตัวซับแต่ละชนิดมีค่าเท่ากับศูนย์ (pH_{pzc}).....	79
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน และอันดับสองเหมือน.	86
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ..	90
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับฟินอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1.....	93
ตารางที่ 4.7 กระบวนการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมด้วยวิธีอัดรีดและอัดแห้ง	96
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน และอันดับสองเหมือน.	98
ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช	101

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ตำแหน่งและการแพร่กระจายของไดอะตอมไมต์ที่มีการสำรวจพบแล้ว	7
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับแต่ละชนิด	17
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพาราคลอโรฟีนอล.....	18
รูปที่ 2.4 กระบวนการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับเข้าสู่ตัวดูดซับ	23
รูปที่ 2.5 การศึกษาคุณสมบัติลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิคพื้นฐานต่าง ๆ.....	29
รูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันที่พบในตัวกลางดูดซับที่มาจากสไลด์จ์ (a) และถ่านกัมมันต์ที่มาจากสไลด์จ์ (b)	32
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	40
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ	43
รูปที่ 3.3 กากไดอะตอมไมต์อบแห้ง (ซ้าย) สไลด์จ์อบแห้ง(ขวา).....	46
รูปที่ 4.1 ผงวัตถุบขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร กากไดอะตอมไมต์ (ซ้าย) สไลด์จ์ (ขวา)	57
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของตัวดูดซับที่มาจากกากไดอะตอมไมต์.....	60
รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกควอตซ์ (ซ้าย) และผลึกคริสโตบาไลต์ (ขวา) (Yang et al., 2016).....	60
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของตัวดูดซับที่มาจากสไลด์จ์	62
รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่มฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์	64
รูปที่ 4.6 หมู่มฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิวไดอะตอมไมต์	65
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่มฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากสไลด์จ์.....	69
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์.....	74
รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับจากสไลด์จ์	77
รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ซีตาของตัวดูดซับสไลด์จ์ดิบ (Raw Sludge), ถ่านสไลด์จ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอก 3:1 (ASC_KOH_3:1) และกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste) ที่พีเอชต่าง ๆ	79
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ ในระยะเวลา 300 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	81

รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากกากไถอะตอมไมต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	81
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) ในระยะเวลา 300 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์	83
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากถ่านสลัดจ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยอัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสลัดจ์ 1:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	84
รูปที่ 4.15 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์	86
รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ร่วมกับ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน	87
รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	90
รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ร่วมกับแบบจำลองการดูดซับ แบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช.....	91
รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส	92
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_D$ และ $1/T$	93
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่สารละลายฟีนอลพีเอชต่าง ๆ	94
รูปที่ 5.22 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์	98
รูปที่ 4.23 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ร่วมกับ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน	99
รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	100

รูปที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม และแบบจำลองการดูดซับ แบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช.....	101
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงกด และความสามารถในการดูดซับฟีนอล ของตัวดูดซับวัสดุผสม.....	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล่านี้ล้วนจำเป็นที่จะต้องใช้ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิกสำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิต ก่อให้เกิดปัญหาน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารประกอบฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำแม้จะอยู่ในช่วงความเข้มข้นต่ำ และถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง ซึ่งยากต่อการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปกระบวนการที่นิยมใช้ในบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนจากสารฟีนอลมีอยู่หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิกให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ แบบมูฟวี่งเบดไบโอฟิล์ม (Moving bed biofilm reactor) (Chan et al., 2009) หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพอย่าง เช่น เอนไซม์เพอรอกซิเดส (Peroxidase) ในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกให้เป็นสารควิโนน (Quinones) ที่ไม่มีความเป็นพิษแล้วนำไปกำจัดออกด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Shesterenko et al., 2012) กระบวนการทางกายภาพโดยการใช้การกรองแบบเมมเบรนและกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) ทั้งนี้ยังมีกระบวนการทางเคมี เช่น กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตัน (Electro Fenton) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการเดินระบบ มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำและมีประสิทธิภาพสูง โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือถ่านกัมมันต์เชิงการค้า (Anku et al., 2017) เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์เชิงการค้ามีราคาที่สูงและมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำ ทำให้มีความพยายามในการศึกษาและพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุราคาถูกและมีจำนวนมากมาใช้เป็นตัวดูดซับแทนการใช้ถ่านกัมมันต์เชิงการค้า

ไดอะตอมไมต์หรือดินเบาเป็นหินตะกอนประเภทหนึ่งที่เกิดจากฟอสซิลที่เป็นโครงสร้างแข็งของสาหร่ายเซลล์เดียวในกลุ่มไดอะตอมที่ทับถมกันมาเป็นเวลานานหลายล้านปี ไดอะตอมไมต์นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silica) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ มีความหนาแน่นต่ำ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง อีกทั้งยังไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ไดอะตอมไมต์ถูก

นำมาใช้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ได้แก่ การใช้เป็นวัสดุสำหรับทำอิฐมวลเบา วัสดุกรองในกระบวนการผลิตเครื่องดื่ม เช่น ชา กาแฟ นม น้ำผลไม้ และเบียร์ โดยเฉพาะกระบวนการผลิตเบียร์ที่นิยมนำไดอะตอมไมต์มาเป็นวัสดุกรองเป็นเวลานานกว่า 100 ปี เพื่อเอาตะกอนแขวนลอย เช่น เศษวัตถุดิบ ยีสต์ และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ทำให้เบียร์ที่ได้มีความใสที่เพิ่มขึ้นโดยที่สีและรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้กระบวนการผลิตเบียร์ 1 ลิตรจะก่อให้เกิดกากไดอะตอมไมต์สูงถึง 17.14 กรัม (Iliescu et al., 2009) ทำให้มีกากไดอะตอมไมต์เกิดขึ้นปริมาณมากยากต่อการกำจัด นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ไดอะตอมไมต์สำหรับเป็นวัสดุดูดซับ โดยนำไดอะตอมไมต์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและการกระตุ้นด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับและความจำเพาะกับสารถูกดูดซับ สำหรับใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำ เช่น การปรับปรุงไดอะตอมไมต์ด้วยแมงกานีสไดออกไซด์สำหรับการดูดซับไอออนสังกะสี (Caliskan et al., 2011) และ การใช้ไดอะตอมไมต์สำหรับดูดซับสีเมทิลีนบลู เป็นต้น (Zhang et al., 2013b)

นอกจากนี้กระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม เช่น เบียร์ ไวน์ น้ำผลไม้ และกาแฟ นิยมใช้ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในระบบนี้จะมีสลัดจ์เกิดขึ้นในปริมาณมาก ทำให้ยากต่อการจัดการและกำจัด แต่เมื่อนำสลัดจ์มาวิเคราะห์พบว่าสลัดจ์มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ โดยนิยมปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับ โดยผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่ให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนที่สูงขึ้น และเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับที่นำมาจากสลัดจ์สามารถนำมาใช้กำจัดสารปนเปื้อนได้หลากหลายชนิด เช่น การใช้สลัดจ์ในการดูดซับสีเมทิลีนบลู (Fan et al., 2017) การใช้สลัดจ์สำหรับดูดซับสารประกอบฟีนอลิกอย่าง 4-chlorophenol (Monsalvo et al., 2011) เป็นต้น และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ดียิ่งขึ้นได้มีการศึกษาการใช้ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุผสมระหว่างไดอะตอมไมต์และคาร์บอนสำหรับการดูดซับ p-cresol ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วการดูดซับ p-cresol ของวัสดุผสมมีค่าที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับไม่ต่างกัน (Hadjar et al., 2011)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาตัวดูดซับที่เป็นวัสดุผสมระหว่างกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์สำหรับดูดซับฟีนอล โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้สูงขึ้น โดยศึกษาผลของกระบวนการคาร์บอนเซชัน อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของ

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นรวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล ซึ่งจะเป็นการนำของเสียที่ไร้มูลค่ากลับมาใช้ประโยชน์ รวมถึงยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของกากของเสียอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

2.1.1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์ ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อน

2.1.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยกากไดอะตอมไมต์ สลัดจ์ และวัสดุผสมระหว่างกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์

2.1.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยกากไดอะตอมไมต์ และสลัดจ์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.2.1 วัตถุประสงค์

1.2.1.1 กากไดอะตอมไมต์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นตัวกรองเบียร์ที่หมดสภาพในกระบวนการผลิตเครื่องดื่ม

1.2.1.2 สลัดจ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอดติเวตเตดสลัดจ์ ของโรงงานผลิตเครื่องดื่ม ที่ภูริตเอน้ำออกด้วยสายพาน และตากแห้งที่ลานตากตะกอน

1.2.2 การปรับปรุงตัวดูดซับ

1.2.2.1 ปรับปรุงกากไดอะตอมไมต์ด้วยการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นด้วยความร้อน

1.2.2.2 ปรับปรุงสลัดจ์ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และการกระตุ้นด้วยความร้อน

1.2.2.3 ขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์ ด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ แล้วนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี และความร้อน

1.2.3 การดูดซับ

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ จลนพลศาสตร์ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล และผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับที่มาจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้องค์ความรู้ในการพัฒนาการของเสียได้แก่ กากไต่อะตอมไมด์และสลัดจ์ สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับฟีนอล เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม

1.4.2 เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับจากกากไต่อะตอมไมด์และสลัดจ์ในการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำที่ปนเปื้อน

1.4.3 เป็นการนำกากของเสียที่มีจำนวนมากซึ่งไร้มูลค่ากลับมาใช้ประโยชน์ เป็นการจัดการและการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการทิ้งของเสียเหล่านั้น



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเอากากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่มีปริมาณมากมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ โดยการนำวัสดุดังกล่าวมาผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Pyrolysis) และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดฟีนอล (Phenol) ในน้ำที่ปนเปื้อน ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งเป็นการลดปริมาณของเสีย และเป็นการนำเอาของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

2.1 ไดอะตอมไมต์ (Diatomite)

ไดอะตอมไมต์ (*Diatomaceous earth*, ดินเบา หินเบา) คือ หินตะกอนที่มีลักษณะเบา เปราะ และมีสีอ่อน เช่น ขาว ครีมน้ำตาล หรือ เหลือง (Bakr, 2010) เกิดจากการทับถมของซากเปลือกโครงสร้างแข็งของสาหร่ายเซลล์เดียวกลุ่มของไดอะตอม (Diatomea) ในแอ่งสะสมตัวเช่น ทะเล หรือทะเลสาบ ร่วมกับตะกอนหลายชนิด กลายเป็นฟอสซิล (Fossil) การสะสมดังกล่าวเกิดในช่วงยุคเทอร์เชียรี (Tertiary Periods) และยุคควอเทอร์นารี (Quaternary Periods) ซึ่งลักษณะของฟอสซิลที่พบจะมีลักษณะสมบูรณ์ ส่วนฟอสซิลที่มีอายุเก่าแก่กว่าเช่น ยุคครีเตเชียส (Criteria Period) จะมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อเวลาผ่านไปเกิดธรณีสัณฐานแผ่นธรณีภาค (Plate Tectonics) ทำให้เกิดการยกตัวเอาบริเวณที่เป็นท้องทะเลกลายขึ้นมาเป็นแผ่นดิน จึงทำให้มีการพบชั้นตะกอนของไดอะตอมไมต์บนบกปริมาณมากตามบริเวณแนวเขาหินปูนต่าง ๆ และบริเวณภูเขาไฟทั่วโลก รวมถึงในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย (Arik, 2003)

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะเรียกไดอะตอมไมต์ว่าดินเบา แต่ไดอะตอมไมต์นั้นไม่ใช่ดิน อันเนื่องมาจากองค์ประกอบหลักเป็นเปลือกของไดอะตอมที่มีองค์ประกอบเป็นดินหรือแร่ดิน (Clay Mineral) น้อยมาก อีกทั้งองค์ประกอบเหล่านั้นเป็นซากสิ่งมีชีวิต ไม่ใช่สารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และยังไม่รูปร่างและโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน จึงไม่สามารถเขียนสูตรทางเคมีได้ เหมือนกับแร่ชนิดอื่น ๆ แต่เนื่องจากไดอะตอมไมต์เกิดจากการทับถมของตะกอนชนิดต่าง ๆ ในแอ่งสะสมตัวเช่นเดียวกับหินตะกอนชนิดอื่น ๆ ดังนั้นไดอะตอมไมต์จึงจัดเป็น “หิน” ตามหลักธรณีวิทยา (เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ, 2544)

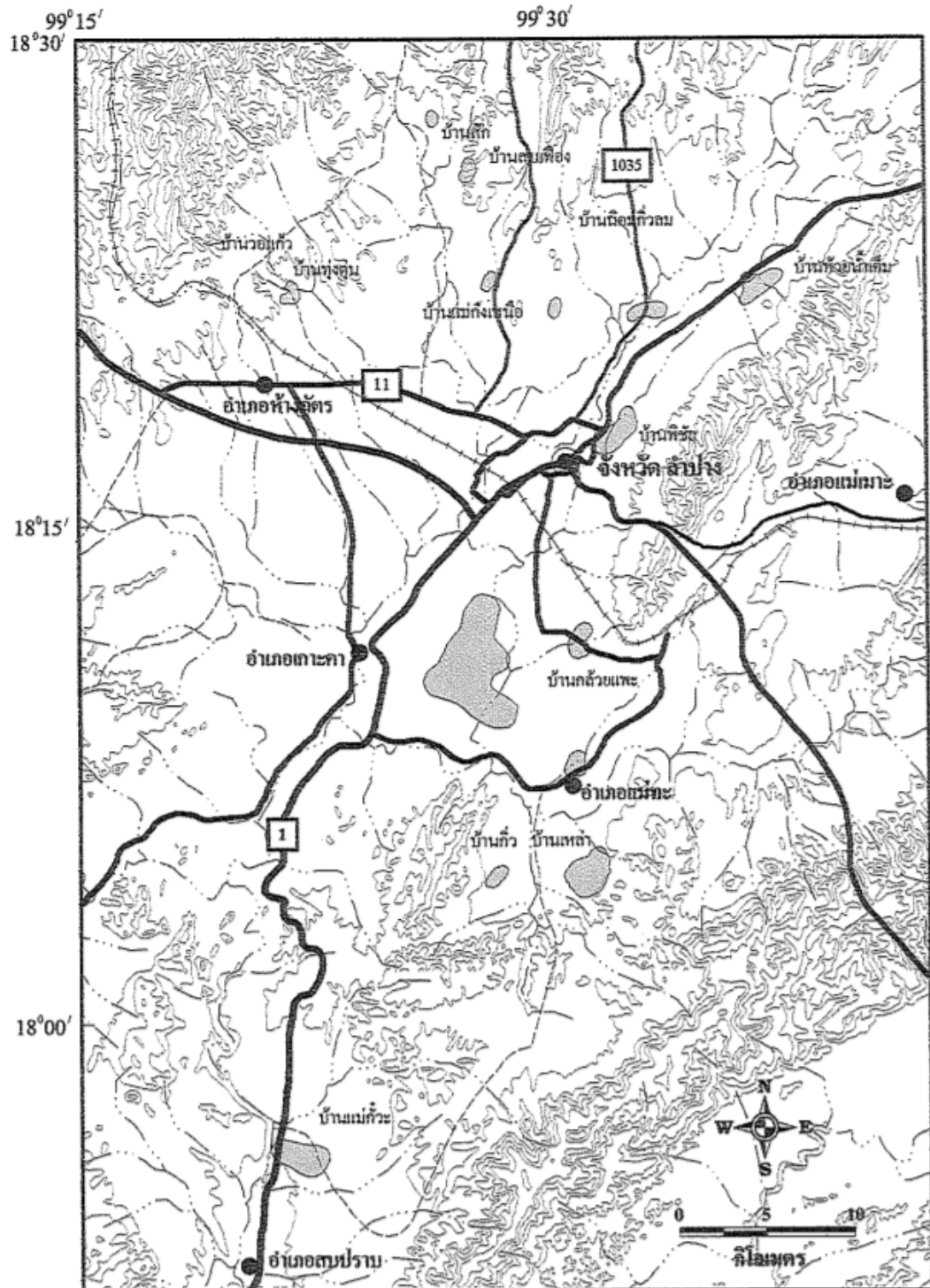
2.1.1 การกระจายตัวของไต่ตะตอมไม้ตีในประเทศไทย


ไต่ตะตอมไม้ตีส่วนใหญ่ในประเทศไทยพบได้ในบริเวณจังหวัดลำปาง กระจายไปตามแหล่งต่าง ๆ ในพื้นที่ 5 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอห้างฉัตร อำเภอสบปราบ อำเภอเกาะคา และอำเภอแม่ทะ รวมเป็นพื้นที่ 4,300 ตารางกิโลเมตร ซึ่งในแต่ละแหล่งจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ตามตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังสามารถพบชิ้นของไต่ตะตอมไม้ตีแทรกสลับกับชั้นหินตะกอนที่อยู่เหนือชั้นถ้ำหินในแอ่งลี้ จังหวัดลำพูน ทำให้คาดการณ์ได้ว่าน่าจะมีชิ้นไต่ตะตอมไม้ตีในแอ่งถ้ำหินอื่น ๆ ในบริเวณภาคเหนืออีกด้วย (เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ, 2544)

ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งของแหล่งที่พบไต่ตะตอมไม้ตีในจังหวัดลำปาง

	ตำแหน่งของแหล่ง	ลักษณะของแหล่ง
1.	อำเภอเมือง	
	โรงเรียนบ้านท่าเสด็จ ตำบลเสด็จ	พื้นสนามฟุตบอล
	บ้านห้วยน้ำเค็ม ตำบลเสด็จ	บ่อดินขนาดใหญ่
	บ้านพิชัย ตำบลพิชัย	หินโผล่จากการตัดถนน
	บ้านกิวลม ตำบลนิคมพัฒนา	หินโผล่ข้างถนน
2.	อำเภอห้างฉัตร	
	บ้านสงบเฟื่อง ตำบลบ้านเอื้อม	หลุมเจาะสำรวจดิน กองเศรษฐธรณีวิทยา
	บ้านทุ่งตุ่น ตำบลวอแก้ว	หลุมเจาะสำรวจดิน กองเศรษฐธรณีวิทยา
3.	อำเภอเกาะคา	
	บ้านม่อนหินแก้ว ตำบลศาลา	บ่อขุด
	บ้านสบจาง	ริมตลิ่งของแม่น้ำจาง
4.	อำเภอแม่ทะ	
	บ้านม่อนแสนศรี ตำบลน้ำโจ้	ขุมเหมือง
	บ้านป่าม่วง ตำบลน้ำโจ้	ขุมเหมือง บ่อน้ำ
	บ้านอ้วน ตำบลแม่ทะ	หลุมเจาะสำรวจ กศ.
	บ้านกิว บ้านนาตัม ตำบลบ้านกิว	ขุมเหมือง บ่อขุด
	บ้านป่าตัน ตำบลป่าตัน	ขุมเหมือง
5.	อำเภอสบปราบ	
	ตำบลแม่ทาน	หินโผล่จากการตัดถนน
	บ้านแม่กิว ตำบลแม่กิว	บ่อน้ำ หินโผล่จากการตัดถนน

พืมา (Piyasin, 1978)



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งและการแพร่กระจายของไดอะตอมไมต์  ที่มีการสำรวจพบแล้ว
ในจังหวัดลำปาง (Kumanchan & Traiyan, 1986)

2.1.2 คุณสมบัติของไดอะตอมไมต์

ไดอะตอมไมต์เป็นหินตะกอนที่มีสีอ่อน เช่น สีขาว สีเหลือง สีน้ำตาล น้ำหนักเบา มีความพรุนสูงถึง 80-90% ความหนาแน่นต่ำ เมื่อถูกทำให้ละเอียดจะมีลักษณะคล้ายผงแป้ง มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก (Khraisheh et al., 2004) ในส่วนขององค์ประกอบทางเคมีนั้น ไดอะตอมไมต์ มีอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silicon $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) อะลูมินา (Al_2O_3) และสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เป็นออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ ตามตารางที่ 2.2 ซึ่งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ไดอะตอมไมต์ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น มีการนำความร้อนต่ำ ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา มีอัตราการซึมผ่านสูง (0.1-10 mD) และมีพื้นที่ผิวที่สูง (Gao et al., 2005) โดยมีหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Silanol) อยู่บนพื้นผิว ทำให้พื้นผิวของไดอะตอมไมต์มีลักษณะที่ชอบน้ำ (hydrophilicity) (Yuan et al., 2004)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์หลักเป็นร้อยละของไดอะตอมไมต์จากแหล่งต่าง ๆ ในโลก

Composition	Lompoc, USA	Albacete, Spain	Moler, Denmark	Jilin, PR China
SiO_2	89.7	88.6	67.8	90.11
Al_2O_3	3.7	0.6	10.3	2.0
Fe_2O_3	1.1	0.2	6.9	0.7
CaO	0.3	3.0	1.4	0.4
MgO	0.6	0.8	1.6	0.3
Na_2O	0.3	0.5	0.5	0.2
K_2O	0.4	0.4	1.5	0.4
Ignition loss	3.7	5.2	7.9	6.3

ที่มา (Breese, 1994)

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากไดอะตอมไมต์

จากคุณสมบัติข้างต้นของไดอะตอมไมต์ทำให้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การใช้ไดอะตอมไมต์ในอุตสาหกรรมยาง เช่น การผลิตยางรถยนต์ ท่อยาง ยางสายพาน เป็นต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อความร้อน ให้กับผลิตภัณฑ์ การนำไดอะตอมไมต์ไปใช้ในการทำฉนวนกันความร้อนต่าง ๆ เช่น อิฐเก็บรักษาความร้อน ฉนวนกันเสียง กระเบื้องพื้นปู และผลิตภัณฑ์

เซรามิก การนำไดอะตอมไมต์ไปใช้เป็นในภาคการเกษตรในการกำจัดแมลงในกระบวนการเก็บรักษา เมล็ดพันธุ์พืช การทำปุ๋ยผสมจากไดอะตอมไมต์ (Wu & Chen, 2017) รวมถึงการนำไปเป็นวัสดุดูดซับต่าง ๆ เช่น โลหะหนัก (Heavy Metal) สีย้อม (Dye) และสารกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic) (Bakr, 2010)

นอกจากนี้ยังมีการนำไดอะตอมไมต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เช่น การผลิตน้ำอัดลม นม กาแฟ เบียร์ ไวน์ และน้ำผลไม้ โดยจะใช้เป็นตัวกรองนำสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากเครื่องดื่ม เพื่อเครื่องดื่มที่ได้จะมีความใสที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในการผลิตเบียร์จะมีการใช้ไดอะตอมไมต์ในปริมาณมากถึง 1.7 กรัมต่อลิตรเบียร์ที่ผลิตได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดของเสียไดอะตอมไมต์ที่มียีสต์และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก (Fillaudeau et al., 2006) ซึ่งของเสียเหล่านั้นจะกลายมาเป็นวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับในงานวิจัยนี้

2.1.4 การประยุกต์ใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับ

เนื่องจากไดอะตอมไมต์มีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกาไดออกไซด์ จึงถูกนำไปใช้เป็นตัวดูดซับประเภทซิลิกา ซึ่งสามารถใช้ไดอะตอมไมต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนโดยตรง เช่น การดูดซับสารอนินทรีย์อย่างเช่น กลุ่มของโลหะหนักได้แก่ แคดเมียม (Cadmium, Cd^{2+}) ตะกั่ว (Lead, Pb^{2+}) และสังกะสี (Zinc, Zn^{2+}) เป็นต้น สารอินทรีย์ที่เป็นกลุ่มอะโรมาติก เช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) ไซลีน (Xylene) สารกลุ่มสีย้อม การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยการปรับปรุงด้วยการกระตุ้นด้วยสารเคมีอย่างเช่น กรด หรือเบส และกระตุ้นด้วยความร้อน หรือใช้สำหรับเป็นตัวรองรับสารต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น เช่น การใช้ไดอะตอมไมต์เป็นตัวรองรับแมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่เป็นสีเบสิกให้ดียิ่งขึ้น (Bakr, 2010)

2.2 สลัดจ์ (Sludge)

สลัดจ์ (Sludge) หรือ กากตะกอนน้ำเสีย คือ กากของแข็งหรือกึ่งแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ สลัดจ์ขั้นแรก (Primary Sludge) และ สลัดจ์ขั้นสอง (Secondary Sludge) สลัดจ์ขั้นแรกมาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นแรกได้แก่ กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) กระบวนการกรอง (Filtration) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และกระบวนการโฟลเตชัน (Floatation) โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ที่มาจากธรรมชาติ หรือสารช่วยตกตะกอน ส่วนสลัดจ์ขั้นสองมาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองเช่น ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) ที่อาศัยจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่

อยู่ในน้ำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์เอง เมื่อจุลินทรีย์มีปริมาณมากขึ้นเกิดการรวมตัวกันตกตะกอนกลายเป็นสลัดจ์ จึงทำให้สลัดจ์ในชั้นที่สองมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มาจากจุลินทรีย์เหล่านั้น (Samolada & Zabaniotou, 2014)

2.2.1 ประเภทของสลัดจ์

โดยทั่วไปประเภทกากตะกอนน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของน้ำเสีย เช่น สลัดจ์น้ำเสียชุมชน (Municipal Sludge) ที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ และอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ปะปนกัน และแตกต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลา (Heterogenous Mixture) สารอินทรีย์เหล่านั้นมาจากกลุ่มของโปรตีน (Protein) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) และไขมัน (Lipid) ที่มาจากอาหาร สารโพลีเมอร์ที่มนุษย์สร้างขึ้นมา เป็นต้น ในส่วนของสลัดจ์อุตสาหกรรม (Industrial Sludge) ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมแต่ละประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น สลัดจ์เหล่านั้นจะมีองค์ประกอบตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และมีองค์ประกอบที่ไม่แตกต่างกัน (Homogenous Mixture) ในแต่ละช่วงเวลา (Samolada & Zabaniotou, 2014)

2.2.2 การจัดการและการกำจัดสลัดจ์

เนื่องจากปริมาณการเกิดของสลัดจ์มีปริมาณมาก แค่เพียงปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนในสหภาพยุโรปมีถึง 11.5 ล้านตันต่อปีในปี ค.ศ. 2010 และมีการคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 13 ล้านตันต่อปีในปี ค.ศ. 2020 (Samolada & Zabaniotou, 2014) ซึ่งยังไม่ได้รวมถึงสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นการจัดการและการกำจัดสลัดจ์ให้เป็นไปในรูปแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจจึงเป็นความท้าทายอย่างมากสำหรับวิศวกรสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปก่อนที่จะนำสลัดจ์ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำไปจัดการด้วยวิธีต่าง ๆ จะต้องลดปริมาตรสลัดจ์ก่อน เนื่องจากสลัดจ์จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือน้ำ (60-70%) การลดปริมาตรน้ำทำได้หลายวิธี เช่น การปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) การกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter) การรีดด้วยสายพาน (Belt Press) เป็นต้น (Smith et al., 2009)

หากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นไม่มีการปนเปื้อนของเสียอันตรายเช่นโลหะหนัก จะถูกนำไปผลิตเป็นปุ๋ย (fertilizer) สำหรับภาคเกษตรกรรม เช่น ในประเทศอังกฤษ 65% ของสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากน้ำเสีย

ชุมชนจะถูกส่งไปทำปุ๋ย ตามกรอบกฎหมาย 86/278/EEC แต่ในขณะเดียวกันสลัดจ์นั้นจะต้องไม่เป็นสลัดจ์ที่ปนเปื้อนด้วยสารอันตราย เพราะจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในพื้นที่นั้น ๆ (Folgueras et al., 2003)

นอกจากนี้การฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Landfill) และการเผา (Incineration) ยังเป็นอีกวิธีที่นิยมในการจัดการสลัดจ์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีนั้นเป็นวิธีที่ไม่ยั่งยืนและเป็นการสร้างภาพลักษณ์ที่ไม่ดีให้กับหน่วยงานหรือองค์กรที่รับผิดชอบ เนื่องจากการฝังในหลุมฝังกลบนั้นจะเพิ่มต้นทุนในการกำจัดอีกทั้งยังไม่เป็นการใช้หลุมฝังกลบอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก แต่พื้นที่หลุมฝังกลบนั้นมีจำกัด ส่วนการเผาสลัดจ์นั้นเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งยังเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสารที่เป็นมลพิษเช่น ไดออกซิน (Dioxin) และ ฟิวแรน (Furan) (Devi & Saroha, 2016)

ดังนั้นในปัจจุบันการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดการสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นที่สนใจในการพัฒนาการจัดการสลัดจ์ที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การไพโรไลซิส (Pyrolysis) สลัดจ์ให้เปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ (Bio Char) นั้นเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการจัดการสลัดจ์ที่เกิดขึ้น นอกจากเป็นการลดปริมาณสลัดจ์แล้ว ยังได้ถ่านชีวภาพที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายหนึ่งในนั้นคือ การใช้เป็นตัวดูดซับ

2.2.3 การประยุกต์ใช้สลัดจ์เป็นตัวดูดซับ

เราสามารถนำสลัดจ์มาใช้เป็นตัวดูดซับได้หลากหลายรูปแบบ เช่น สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) สลัดจ์แห้ง (Dried Sludge) และสลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Sludge) เป็นต้น โดยกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะเป็นการเผาสลัดจ์ในสภาวะไร้อากาศ เพื่อเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ให้เป็นถ่านสลัดจ์ (Sludge Char) ซึ่งมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ

อาจนำสลัดจ์มาใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้หลากหลายชนิด ได้แก่ การใช้สลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Activation) และวิธีทางเคมี (Chemical Activation) ในการกำจัดโลหะหนัก (Heavy Metal) เช่น โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) นิกเกิล (Nickel) สังกะสี (Zinc) และอื่น ๆ อีกหลายชนิด โดยสลัดจ์ที่มาจากน้ำเสียแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่แตกต่างกันไป ตามกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างสารถูกดูดซับกับพื้นผิวดูดซับ เช่น การเกิดพันธะเคมีระหว่างทองแดงไอออนกับพื้นผิวของตัวดูดซับ (Zhang et al.,

2013a) หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ระหว่างไอออนบวกในตัวดูดซับเช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} กับไอออนของโลหะหนักอย่างเช่น ทองแดง เป็นต้น (Méndez et al., 2010)

การดูดซับสีย้อมที่เป็นหนึ่งในมลภาวะทางน้ำที่สำคัญด้วยสไลด์จ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้พื้นผิวของสไลด์จ์มี หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group; -OH) รวมไปถึงพื้นที่ผิวและรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลู (Methylene Blue) (Li et al., 2015b) การใช้สไลด์จ์ในการ ดูดซับฟอสฟอรัสและฟอสเฟตที่เป็นหนึ่งในสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำด้วยสไลด์จ์ชนิดต่าง ๆ เช่น สไลด์จ์สารส้ม (Alum Sludge) สไลด์จ์จาก โรงงานกระดาษ (Paper Mill Sludge) และสไลด์จ์จากน้ำทิ้งกรด (Acid Mine Drainage) โดยผ่าน กลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand Exchange) และ การเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันระหว่าง ฟอสฟอรัสกับไอออนของโลหะในสไลด์จ์เช่น เหล็ก (Fe) อะลูมิเนียม (Al) และแคลเซียม (Ca)

นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารกำจัดฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) ในน้ำด้วยตัวดูดซับที่มาจาก สไลด์จ์ดิบ (Raw Sludge) สไลด์จ์แห้ง (Dried Sludge) และสไลด์จ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยสารเคมีอย่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Zou et al., 2013)

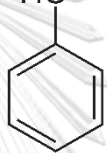
2.3 ฟีนอล (Phenol) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound)

ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มอะโรมาติกที่เกิดจากธรรมชาติและกิจกรรม ของมนุษย์ ถูกพบปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำทั่วโลก ฟีนอลถูกใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตใน หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตปิโตรเคมีภัณฑ์ สิ่งทอ ยา สีย้อม สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น จึงก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีปนเปื้อนฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิกความเข้มข้นสูง เช่น น้ำเสีย จากโรงกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมยามิฟีนอลปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 94 และ 116.7-210 มิลลิกรัม ต่อลิตรตามลำดับ นอกจากนี้ฟีนอลยังถูกจัดให้เป็นสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายลำดับต้น ๆ เนื่องจากมี ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่ความเข้มข้นต่ำ และเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ (Mutagenic Substance) เมื่อมีความเข้มข้นสูง (Calace et al., 2002) โดยในประเทศไทยกำหนดให้น้ำทิ้งที่ออกจากโรงงาน ต้องมีสารประกอบฟีนอล ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปี 2560

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล

ฟีนอลเป็นสารในกลุ่มอะโรมาติกซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl; -OH) ต่อกับวงเบนซีน (Benzene Ring) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ C_6H_5OH เมื่อเป็นของแข็งบริสุทธิ์จะมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว แต่เมื่อละลายน้ำจะให้สีชมพูอ่อนเป็นกรดอ่อน สามารถติดไฟได้ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีตามตารางที่ 2.3 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบฟีนอลิกชนิดอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล

คุณสมบัติ	
โครงสร้าง (molecular structure)	C_6H_5OH HO 
มวลโมเลกุล (molecular weight)	94.12 กรัมต่อโมล
สี (color)	ผลึกของแข็งไม่มีสี
ความหนาแน่น (density)	1.058 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด (boiling point)	181.8 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (melting point)	40.90 องศาเซลเซียส
ความดันไอ (vapor pressure)	2.00×10^{-1} ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลาย (solubility)	8.20×10^4 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส ละลายได้ดีมากในตัวทำละลายประเภทแอลกอฮอล์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) กรดอะซิติก (CH_3COOH) คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) เอทิลอีเทอร์ (C_2H_5) ₂ O และละลายได้น้อยในเบนซีน (C_6H_6)
pK _a	9.88

ที่มา (LaGrega, 1994)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบ	pKa	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
Phenol	10.00	40.85	182
p-Nitrophenol	8.40	113-114	279
o-Nitrophenol	7.23	44-45	214-216
o-Chlorophenol	8.48	7	175-176
2,4-Dimethylphenol	-	27.75	203-225
2,4-Dichlorophenol	-	-	210
4-Chloro-m-cresol	-	66	235
4,6-Dinitro-o-cresol	-	87.5	-
2,4,6-Trichlorophenol	7.39	69	246
Pentachlorophenol	-	191	310
o-Cresol	10.26	30	191-192
m-Cresol	10.00	11-12	202
p-Cresol	10.26	35.5	201

2.3.2 กระบวนการกำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิก

ในปัจจุบันกระบวนการกำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process) กระบวนการทางกายภาพ (Physical Process) และกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ตามชนิดและปริมาณของสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ชนิดของน้ำที่ปนเปื้อน รวมไปถึงต้นทุนในการบำบัดซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกกระบวนการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน

กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่มีความประหยัดที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น กระบวนการทางกายภาพ และเคมี กระบวนการทางชีวภาพอาศัยการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดมีสารปนเปื้อนที่ลดลง นอกจากนี้กระบวนการทางชีวภาพยังเป็นกระบวนการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรมเนื่องมาจากจุลินทรีย์ในน้ำ เช่น รา และแบคทีเรีย สามารถที่จะย่อยสลายสารปนเปื้อนได้อย่างหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทางชีวภาพต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่ในการ

สร้างระบบบำบัด อีกทั้งระบบยังมีความอ่อนไหวกับสารเคมีต่าง ๆ ที่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ และกระบวนการทางชีวภาพยังให้ผลที่ไม่ดีนักกับการกำจัดฟีนอล

กระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟีนอลอย่างแพร่หลาย และสามารถใช้ในการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำที่ปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบไปด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ฟลอคคูเลชัน (Flocculation) ร่วมกับกระบวนการทำให้ตะกอนลอย (Flotation) และกระบวนการกรอง (Filtration) นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการฟลอคคูเลชันร่วมกับการตกตะกอนด้วย Fe(II)/Ca(OH)_2 (Precipitation – Flocculation) กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารออกซิไดซ์ เช่น โอโซน (O_3) อย่างไรก็ตามกระบวนการข้างต้นยังมีค่าใช้จ่ายที่สูง

กระบวนการทางกายภาพที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพได้แก่ กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน (Membrane-Filtration Process) ที่ประกอบไปด้วย Nanofiltration กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ กระบวนการ (Reverse Osmosis; RO) และกระบวนการแยกไฟฟ้าเมมเบรน (Electrodialysis) ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของการอุดตันของเมมเบรน (Membrane Fouling) ที่ส่งผลทำให้อายุการใช้งานสั้น และค่าใช้จ่ายสูง อย่างไรก็ตามกระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นอีกกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำปนเปื้อน เนื่องจากมีตัวดูดซับให้เลือกใช้หลากหลาย และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถกำจัดสารปนเปื้อนเช่น ฟีนอล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ahmaruzzaman, 2008)

2.3.3 วัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดฟีนอลในน้ำ

กระบวนการดูดซับนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดสารเคมีเช่น ฟีนอล ออกจากน้ำที่ปนเปื้อน (Babel & Kurniawan, 2003) ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือถ่านกัมมันต์เชิงการค้า (Commercial Activated Carbon) เนื่องจากโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกัมมันต์เชิงการค้าในการดูดซับยังคงมีค่าใช้จ่ายสูง เป็นผลมาจากราคาของตัวดูดซับ และค่าใช้จ่ายในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ทำให้ปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก (Low-Cost Adsorbents) และมีจำนวนมากมาใช้แทนถ่านกัมมันต์เชิงการค้ามากขึ้น (Streat et al., 1995) ตัวอย่างเช่น

วัสดุที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) ที่มีราคาถูกและมีจำนวนมากพบได้ทั่วโลก มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง อีกทั้งยังมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย ดินเหนียวสามารถจัด

จำแนกตามโครงสร้างได้หลายประเภท เช่น ดินเหนียวชนิด Smectites (Montmorillonite) ชนิด Mica (Illite) ชนิด Kaolinite ชนิด Serpentine ชนิด Pyrophyllite (Talc) ชนิด Vermiculite และ ชนิด Sepiolite (Shichi & Takagi, 2000) การที่ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง และมีประจุลบบนโครงสร้างของแร่ ทำหน้าที่ในการดูดซับสารที่มีประจุบวก อีกทั้งดินเหนียวมีราคาอยู่ที่ 1.25-3.75 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีราคาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มาก นอกจากนี้ยังมีการนำดินเหนียวไปปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตัวอย่าง เช่น Porous Clay Heterostructure (PCH) ซึ่งมีรายงานว่าความสามารถดูดซับ ฟีนอล และ Dichlorophenols (2,5 DCP และ 3,4 DCP) ออกจากน้ำได้ถึง 14.5 48.7 และ 45.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Sheng et al., 2002)

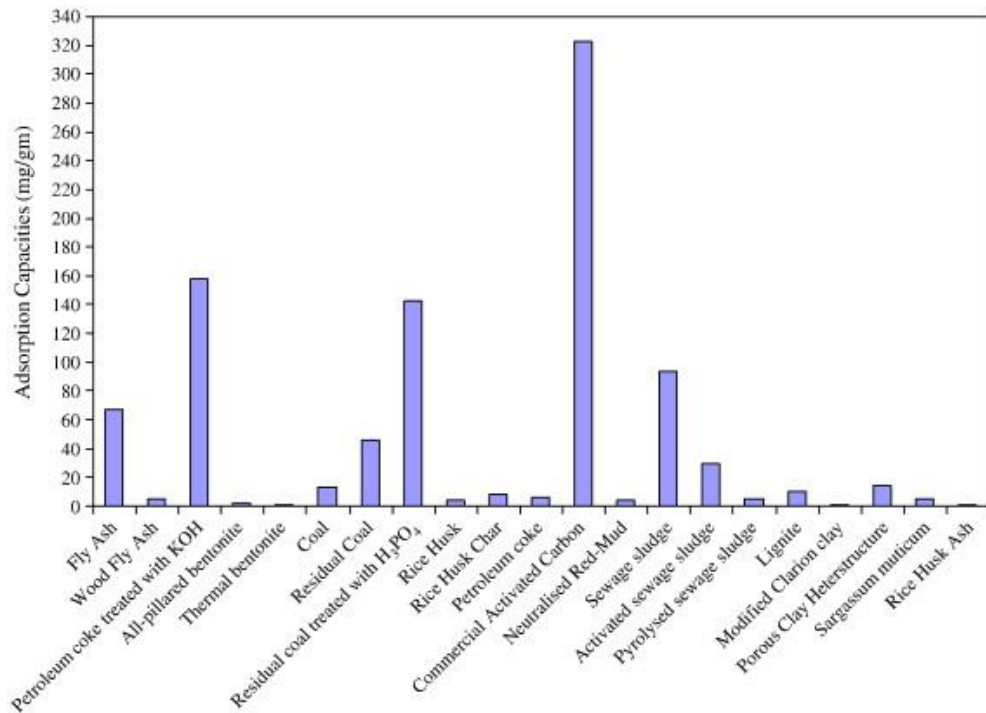
วัสดุทางชีวภาพ เช่น ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) เป็นหนึ่งในวัสดุไบโอโพลิเมอร์ (Biopolymer) ที่มีอยู่ในธรรมชาติพบได้ทั่วไปในเปลือกของสัตว์กลุ่มครัสเตเชีย (Crustacea) เห็ดรา แผลง และเปลือกหอย มีโมโนเมอร์คือ Mucopolysaccharide มีการประมาณปริมาณเปลือกของสัตว์กลุ่มครัสเตเชียที่ผลิตได้ทั่วโลกถึง 1.2×10^6 ตันต่อปี (Teng et al., 2001) นอกจากนี้ไคตินยังมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (ระดับ ppm หรือ ppb) เนื่องจากมีพันธะของ 1-Acetamido-2-Deoxy-B-D-Glucose ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group; -OH) และ อะมิโน (Amino Group; -NH₂) โดยมีรายงานการศึกษาพบว่าไคตินสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำได้ถึง 21.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (Dursun & Kalayci, 2005)

วัสดุจากกากของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เป็นวัสดุที่มีปริมาณมากและราคาถูก เนื่องจากปกติจะต้องมีต้นทุนในการกำจัด แต่การเพิ่มขึ้นของบางประการเพื่อนำกลับมาทำเป็นตัวดูดซับทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีราคาถูก ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอย (Fly Ash) ที่มีปริมาณมากเกิดจากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในกรณีของเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ขานอ้อยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล เป็นเถ้าลอยปราศจากสารที่มีความเป็นพิษอย่างโลหะหนัก (Heavy Metal) มีพื้นที่ผิวสูงถึง 15 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถถูกนำกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอลิกได้ (Akgerman & Zardkoohi, 1996)

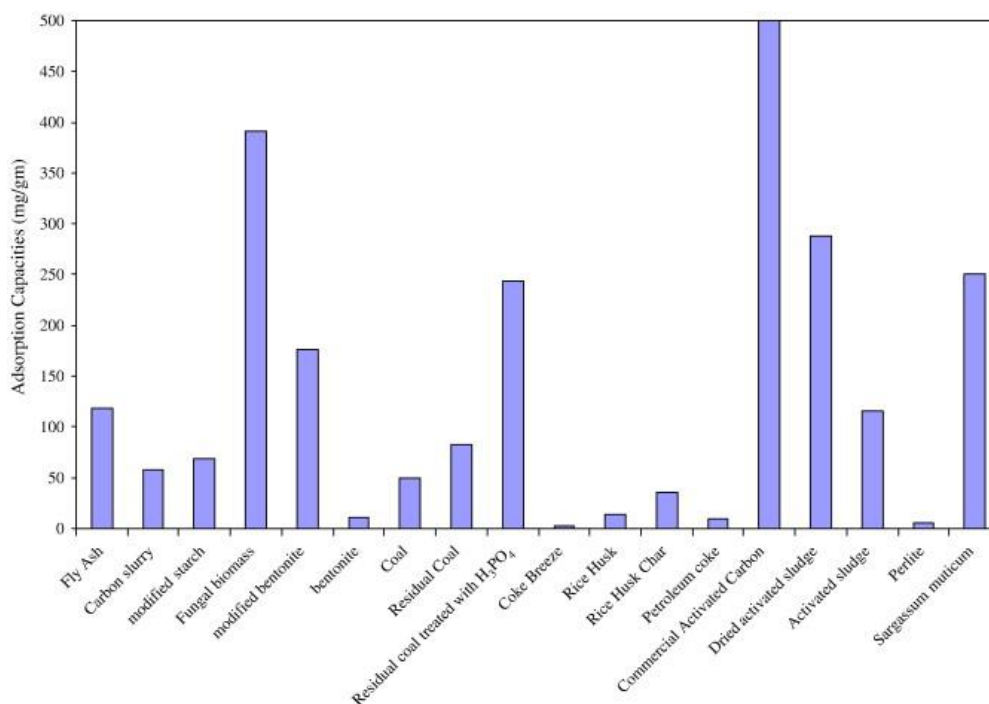
อีกหนึ่งวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ และถูกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ ตะกอนน้ำเสีย (Sludge) ที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีจำนวนมากและราคาถูก เนื่องจาก

กากตะกอนน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนสูง จึงถูกนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงถึง 230 ตารางเมตรต่อกรัม และมีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 50 มิลลิกรัมต่อกรัม (Otero et al., 2003)

นอกจากนี้ยังมีวัสดุอีกหลายชนิดที่ถูกพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสำหรับฟีนอลและสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับเหล่านี้แตกต่างกันไปดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับแต่ละชนิด



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพาราคลอโรฟินอล (p-Chlorophenol) ของตัวดูดซับแต่ละชนิด

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การใช้กระบวนการดูดซับเริ่มมีมาเมื่อ 4,000 ปีที่แล้วดังปรากฏในคัมภีร์ภาษาสันสกฤต แต่เริ่มนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมเมื่อปี ค.ศ.1785 โดยใช้ในโรงงานผลิตน้ำตาลในการกำจัดสีของน้ำตาล หลังจากนั้นในช่วงปลายของศตวรรษที่ 19 ได้มีการนำถ่านชาร์ที่ยังไม่ได้รับการกระตุ้นมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นครั้งแรก และหลังจากนั้นกระบวนการดูดซับได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยมักติดตั้งอยู่ท้ายสุดของกระบวนการเพื่อทำหน้าที่ลดปริมาณมลสารให้ต่ำตามเกณฑ์มาตรฐานการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ และในบางกรณียังใช้เป็นระบบป้องกันการหลุดรอดของมลสารในกรณีฉุกเฉินในระบบบำบัดน้ำเสียบางชนิด เช่น การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เป็นต้น

กระบวนการดูดซับเป็นความสามารถอย่างหนึ่งของบางสารในการดึงเอาโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะติดอยู่ที่พื้นผิวของวัสดุเหล่านั้นโดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุนั้น การดูดซับจัดเป็นปรากฏการณ์ในการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer) จากวัฏภาคของเหลวหรือก๊าซเข้าสู่พื้นผิวของของแข็ง ดังนั้นจึงทำให้สามารถแยกเอามวลสารออกจากวัฏภาค

ของเหลวหรือแก๊สได้ โดยมวลสารเหล่านั้นที่เป็นโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่ใช้ในการดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ดังนั้นตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันการใช้ตัวดูดซับเป็นไปอย่างแพร่หลาย ซึ่งตัวดูดซับแต่ละประเภทมีความเหมาะสมกับมวลสารที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ได้แก่

1. ตัวดูดซับกลุ่มคาร์บอน เช่น ถ่าน ถ่านกัมมันต์ อนุภาคนาโนคาร์บอน และกราฟไฟท์ เป็นต้น
2. ตัวดูดซับกลุ่มซิลิกา เช่น ซิลิกาเจล มีโซพอร์ซิลิกา ซีโอไลท์ อนุภาคนาโนซิลิกา เป็นต้น
3. ตัวดูดซับกลุ่มเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Force) ของสารดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถจำแนกแรงดังกล่าวได้เป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี ดังนั้นการดูดซับจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับ

การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน ได้แก่

1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอ่อน ๆ และมีส่วนเกี่ยวข้องกับสภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลทำให้เกิดการเสียสมมาตรของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสภาพความเป็นขั้วโมเลกุลเรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ควอดรูโพลโมเมนต์ (Quadrupole Moment) สภาพขั้วเหนี่ยวนำ (Induced Dipole) และสภาพขั้วชั่วคราว (Instantaneous Dipole) เป็นต้น ซึ่งเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่มีขั้วนั้น ๆ แพร่เข้าไปใกล้พื้นผิวตัวดูดซับและหันส่วนไดโพลโมเมนต์ที่เหมาะสมเข้าหาผิวของตัวดูดซับ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การดูดซับได้ แรงแวนเดอร์วาลส์สามารถแบ่งออกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะของอันตรกิริยาระหว่างสภาพขั้วของสารถูกดูดซับและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ได้แก่

- แรงแผ่กระจาย (Dispersion Force หรือ London Dispersion Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วและพื้นผิวตัวดูดซับที่ไม่มีขั้ว แต่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไร้ทิศทาง ทำให้โมเลกุลเกิดสภาพขั้วชั่วคราว (Instantaneous Dipole) ซึ่งทำให้โมเลกุลข้างเคียงเกิดขึ้นที่มีประจุตรงกันข้าม จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับและหมู่

ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ขนาดของแรงแผ่กระจายจะขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการเสียสมดุลของกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลมากมักมีขนาดของแรงที่สูงกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก

- แรงขั้วคู่-ขั้วคู่ (Dipole-Dipole Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับชนิดมีขั้ว (Polar Molecule) กับพื้นผิวตัวดูดซับชนิดมีขั้ว ซึ่งเป็นแรงดึงดูดชนิดถาวร (Permanent Dipole Bond) ยิ่งไดโพลโมเมนต์มีค่าสูงจะทำให้แรงดึงดูดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย
- แรงขั้วคู่-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Force) เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วและโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว โดยโมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถถูกเหนี่ยวนำให้มีสภาพมีขั้วได้ (Induced Dipole) เมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วหรือโมเลกุลที่มีไดโพลโมเมนต์เข้าใกล้ ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลที่ไม่มีขั้วส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ส่งผลทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน โดยแรงดึงดูดประเภทนี้สามารถพบได้มากในกรณีที่ตัวดูดซับชนิดมีขั้วสามารถดูดซับสารถูกดูดซับชนิดไม่มีขั้วซึ่งสามารถถูกเหนี่ยวนำโดยหมู่ฟังก์ชันชนิดมีขั้วของตัวดูดซับ และในขณะเดียวกันปรากฏการณ์นี้อาจรบกวนการดูดซับโดยโมเลกุลของน้ำซึ่งเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลเกิดสภาพขั้ว

2. แรงไอออน - ขั้วคู่ (Ion-Dipole Force) เป็นแรงทางไฟฟ้าสถิตชนิดหนึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกหรือลบกับโมเลกุลที่มีขั้ว โดยขนาดของแรงจะขึ้นอยู่กับประจุและขนาดของไอออน และค่าของโมเมนต์ขั้วคู่และขนาดของโมเลกุล โดยทั่วไปไอออนบวกจะมีขนาดเล็กกว่าไอออนลบ ความหนาแน่นของประจุจึงสูงกว่า ดังนั้นไอออนบวกจะดึงดูดกับขั้วคู่ได้แรงกว่าไอออนลบ แรงดึงดูดประเภทนี้สามารถพบได้ในกรณีที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับสูญเสีย หรือรับโปรตอน ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช

3. แรงไอออน - ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (Ion-induced dipole force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นจากไอออนบวกหรือลบกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งถูกแรงจากไอออนเหนี่ยวนำอิเล็กทรอนิกส์ให้เคลื่อนที่ไปยังข้างใดข้างหนึ่งทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวได้ เรียกว่า induced dipole โดยความแรงของแรงดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุของไอออนและสภาพของการเกิดขั้ว (polarizability) ของโมเลกุล และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแรงไอออน - คู่ขั้วแล้ว แรงดังกล่าวมีขนาดที่ต่ำกว่ามาก

4. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลชนิด คู่ขั้ว-คู่ขั้ว (Dipole-dipole force) ชนิดพิเศษ เกิดระหว่างอะตอมไฮโดรเจนที่ถูกเหนี่ยวนำโดยอะตอมที่ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) สูง เช่น ฟลูออรีน (F) F - H ออกซิเจน (O) O-H และไนโตรเจน (N) N-H ทำให้เกิดพันธะที่มีสภาพขั้วสูง อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจะเหนี่ยวนำอิเล็กทรอนิกส์

เข้าใกล้ตัวเองมาก ทำให้อะตอมไฮโดรเจนมีความเป็นบวกมากทำให้ดึงดูดอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงได้ พื้นผิวตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภท หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) หมู่ไทออล (Mercapto group, -SH) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group, -COOH) หมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic group, -SO₃H) และหมู่อะมิโน (Aminogroup, -NH₂) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีไฮโดรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบอยู่ในหมู่ฟังก์ชัน จึงมีแนวโน้มในการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ โดยพันธะไฮโดรเจนมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ประมาณ 5-10 เท่า

5. แรงดึงดูดและแรงผลักทางประจุไฟฟ้า (attractive electrostatic force and Repulsive electrostatic force) ในกรณีที่พื้นผิวตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถให้หรือรับไฮโดรเจนอออนได้ และตัวสารถูกดูดซับอยู่ในสภาพที่เป็นประจุ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างความเป็นประจุของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับทั้งในแง่แรงดึงดูดระหว่างประจุ (Attractive electrostatic force) ในกรณีที่หมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวตัวดูดซับและสารถูกดูดซับมีประจุตรงข้ามกัน หรือแรงผลักระหว่างประจุ (Repulsive electrostatic force) ในกรณีที่หมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวตัวดูดซับและสารถูกดูดซับมีประจุชนิดเดียวกัน แรงดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นได้ทั้งแรงผลักรีดหรือแรงสนับสนุนหรือขัดขวางแรงดูดซับหลักได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ความแรงของแรงดึงดูดและแรงผลักทางประจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอชของระบบ โดยตัวดูดซับจะมีแนวโน้มให้ประจุบนพื้นผิวเป็นลบเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น แต่สารถูกดูดซับนั้นความเป็นประจุจะขึ้นอยู่กับค่า pKa ของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

ความแรงของแรงดึงดูดทางกายภาพสามารถประเมินจากความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดกับระยะห่างระหว่างโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อขนาดของแรงดึงดูด เช่น ความหนาแน่นประจุ ความสามารถในการถูกเหนี่ยวนำของโมเลกุลส่งผลถึงขนาดของไดโพลโมเมนต์ นอกจากนี้ค่าพลังงานพันธะ (KJ/mol) ของแรงดึงดูดแต่ละประเภทสามารถบ่งชี้ถึงความแรงของแรงดึงดูดแบบต่าง ๆ ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พลังงานพันธะของแรงดึงดูดทางกายภาพแต่ละประเภท

แรงดึงดูดทางกายภาพ	พลังงานพันธะ (KJ/mol)
แรงแผ่กระจาย (Dispersion force)	0.5-40
แรงขั้วคู่-ขั้วคู่ (Dipole-dipole force)	5-25
แรงขั้วคู่-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (Dipole – induced dipole force)	2-10
แรงไอออน-ขั้วคู่ (Ion-dipole force)	40-600
แรงไอออน-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (Ion-induced dipole force)	3-15
พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)	10-40

ที่มา (Harza & Crittenden, 2005)

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทกายภาพคือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ และจะเกิดขึ้นได้ดีมากยิ่งขึ้น เมื่ออุณหภูมินั้นต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับและเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงเรียกปรากฏการณ์ดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)”

การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับประเภทนี้จึงมักเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง และจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้นจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับแบบเคมีจึงเกิดได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น จึงทำให้เรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)” (Worch, 2012)

2.4.2 กลไกการดูดซับ (Adsorption mechanism)

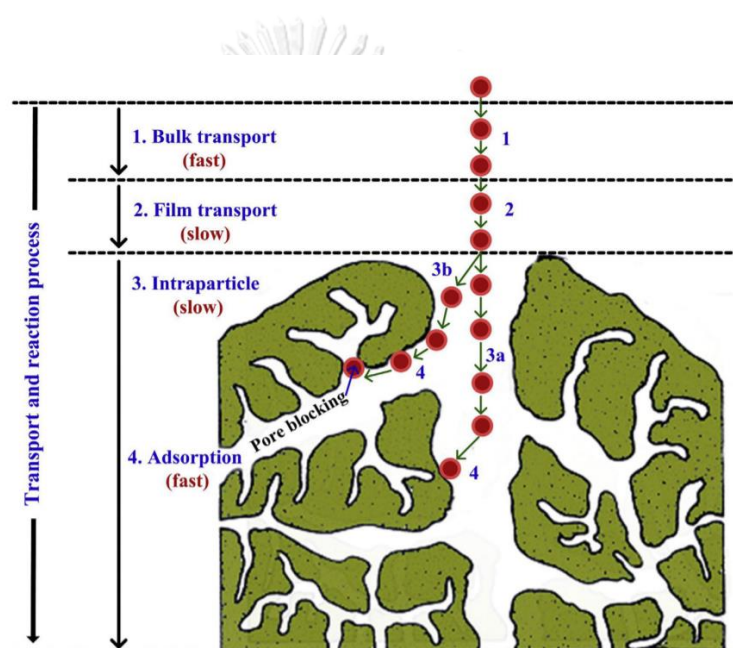
จากปรากฏการณ์ดูดซับที่กล่าวมาข้างต้น สามารถอธิบายกลไกการดูดซับแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนตามรูปที่ 2.4 ดังนี้ (Weber & Smith, 1987)

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากของเหลว (Bulk solution) ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นผ่านปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและโครงสร้างโมเลกุลของสารถูกดูดซับตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับเข้าสู่ตัวดูดซับ (Tran et al., 2017)

2.4.3 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm)

เมื่อตัวดูดซับสัมผัสกับสารละลาย สารถูกดูดซับจะเกิดการแพร่เข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายคงที่ หรือเรียกว่าสภาวะสมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) เป็นผลมาจากอัตราการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายเข้าสู่ตัวดูดซับเท่ากับอัตราการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากตัวดูดซับเข้าสู่สารละลาย ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูก

ดูดซับเพิ่มขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่จุดสมดุลเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ทั้งนี้ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบ โดยรูปร่างของกราฟไอโซเทอมสามารถบ่งบอกลักษณะการดูดซับบนพื้นของตัวดูดซับในขณะที่เกิดการดูดซับ กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้น รวมถึงแนวทางการนำตัวดูดซับไปใช้กับสารถูกดูดซับได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย โดยทั่วไปไอโซเทอมที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับในวัฏภาคของเหลวมีอยู่ 3 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบเฮนรี (Henry's isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir's isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเฮนรี (Henry's isotherm) ถูกนำมาใช้อธิบายกระบวนการดูดซับของระบบดูดซับที่มีสารถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำ มีสัดส่วนการปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับน้อย เช่น ไอออนของโลหะหนักในน้ำ หรือความชื้นในน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการดูดซับ (q) และความเข้มข้นสมดุล (C_e) แสดงดังสมการ (3-1)

$$q = K_H C_e \quad (3-1)$$

โดย q = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_H = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir's isotherm) ถูกสร้างขึ้นจากสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันมีพลังงานในการดูดซับที่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง เหมาะสมกับสารถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว (Mono-layer) และไม่มีผลกระทบของตัวทำละลายต่อตัวดูดซับ แสดงดังสมการ (3-2)

$$q_e = \frac{b q_m C_e}{(1 + b C_e)} \quad (3-2)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในสมการเส้นตรงระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C_e}$ ดังสมการ (3-3) เพื่อคำนวณหาค่า b และ q_m

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{b q_m C_e} \quad (3-3)$$

โดย q = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_m = ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 b = ค่าคงที่การดูดซับของแลงมัวร์

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในกรณีของการดูดซับในวัฏภาคของเหลว แสดงดังสมการ (3-4)

$$q = KC_e^{\frac{1}{n}} \quad (3-4)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในสมการเส้นตรงเพื่อหาค่า K และ $\frac{1}{n}$ ดังสมการ (3-5)

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3-5)$$

โดย q = ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 n, K = ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดลิช

2.4.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์เป็นการศึกษาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) และการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer rate) ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาสัมผัสระหว่างสารถูกดูดซับที่ต้องการแยกและตัวดูดซับรวมไปถึงขนาดของระบบดูดซับ โดยทั่วไปโมเดลที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetic) ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) และปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) (Worch, 2012)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่งพิจารณาจากสมการที่ (3-6)



เมื่อความเข้มข้นของสาร A มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสาร B มากๆ และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง ความเข้มข้นของสาร A จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จึงขึ้นกับความเข้มข้นของสาร B โดยมีสมการดังนี้ (Gulnaz et al., 2006)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k}{2.303} t \quad (3-7)$$

โดย q_e = ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหนึ่งตัวยกกำลังสอง หรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นแต่ละตัวยกกำลังหนึ่ง ซึ่งอธิบายถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากประจุของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับจำนวนของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และจำนวนสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยมีสมการดังนี้ (Gulnaz et al., 2006)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3-8)$$

โดย q_e = ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

2.4.5 ปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับในวัฏภาคน้ำ

ลักษณะทางกายภาพ-เคมีของตัวดูดซับ และลักษณะของน้ำที่ปนเปื้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากผลกระทบจากแรงหรือพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับซึ่งปัจจัยทางกายภาพและเคมีเหล่านั้นได้แก่

1. อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระบบมักจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีการสั่นที่มากขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มหลุดออกจากพื้นผิวตัวดูดซับมาปนเปื้อนอยู่ในสารละลายได้มากยิ่งขึ้น

2. ขนาดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับของการดูดซับมักเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าตัวดูดซับจะมีพื้นที่ผิวมาก แต่ขนาดของสารถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับส่งผลให้สารถูกดูดซับไม่สามารถเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในของตัวดูดซับได้ ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะไม่สัมพันธ์กับขนาดของพื้นที่ผิว

3. ขนาดและโครงสร้างรูพรุนของตัวกลางดูดซับ

การที่ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าขนาดของสารถูกดูดซับจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารเหล่านั้นต่ำ โดยปกติเราจะสามารถแบ่งประเภทของรูพรุนออกเป็น 3 ประเภทคือ

รูพรุนขนาดเล็ก (microporous) ขนาดรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

รูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) ขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่อ้อยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร

รูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) ขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

4. ลักษณะสมบัติของสารถูกดูดซับ

ในกรณีที่สารถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์มักมีความหลากหลายในแง่การดูดซับอย่างมาก โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแตกตัวเป็นประจุของสาร เมื่อพิจารณาในกรณีของถ่านกัมมันต์สารที่สามารถแตกตัวเป็นประจุได้ดี เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมไนเตรต สารเหล่านี้มักไม่สามารถดูดซับได้โดยถ่านกัมมันต์ แต่ในทางตรงกันข้ามสารอินทรีย์ที่ไม่แตกตัวเป็นประจุ เช่น ไอโอดีน หรือ เมอร์คิวริกคลอไรด์ กลับสามารถถูกดูดซับได้ดีโดยถ่านกัมมันต์ (Cooney, 1999)

สำหรับในกรณีที่สารถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ความสามารถในการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์มักขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารนั้น โดยสารที่มีความไม่ชอบน้ำสูง (hydrophobicity) มักจะถูกดูดซับได้ดีโดยตัวกลางดูดซับที่มีพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ซึ่งสมบัติความชอบหรือไม่ชอบน้ำนั้นเป็นสมบัติเฉพาะของสารขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันและสภาพขั้วของสารนั้น ดังตามร่างที่ 2.6 ซึ่งแสดงคุณสมบัติพื้นฐานของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เป็นมลภาวะในน้ำ เช่น ค่าการละลายน้ำ ขนาดโมเลกุล และสภาพความเป็นประจุ เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์

Pollutants	MW.	Water solubility (g/l)	Width (nm)	Length (nm)	Charge
Dichlorvos	221	10	0.58	0.78	None
Fenobucarb	207	0.66	0.69	0.97	None
2,4-D	221	0.89	0.54	0.96	Negative
Mecoprop	215	0.73-0.90	0.64	0.89	Negative
4-Chlorophenol	129	27	0.48	0.65	None
Toluene	92	0.52	0.48	0.57	None
Dichloroacetic acid	129	100	0.69	0.46	Negative
Basic yellow	319	Easy soluble	0.64	1.44	Positive
Acid Blue 45	474	Easy soluble	0.69	1.13	Negative

ที่มา (Robinson, 2008)

นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารยังส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ โดยสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ซึ่งจะมีมวลโมเลกุลที่สูงมักมีแนวโน้มในการถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีขนาดหรือมวลโมเลกุลต่ำ

5. ค่าพีเอชของตัวทำละลาย

ค่าพีเอชของตัวทำละลายส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์และประสิทธิภาพการดูดซับ อันเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับสามารถแตกตัวเป็นประจุ ทำให้เกิดการรับและให้โปรตอนออกจากโครงสร้างโมเลกุลได้ เช่นที่ค่าพีเอชต่ำ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) จะถูกเปลี่ยนเป็น ($-NH_3^+$) ได้ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ และหมู่ฟังก์ชันของสารถูกดูดซับ ถ้าหากหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับถูกเปลี่ยนให้มีสภาพ ขั้วเหมือนกันจะทำให้เกิดการผลักกันระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอันเนื่องมาจากแรงผลักกันของประจุไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดของแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์

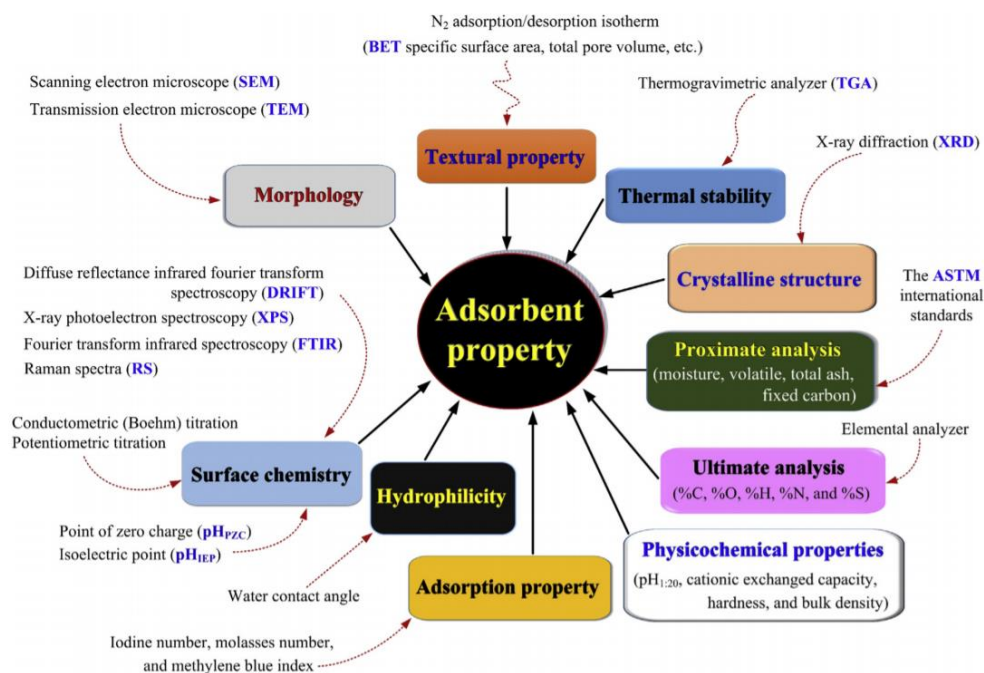
6. ความปั่นป่วน

ในกรณีการดูดซับแบบทีละเท (Batch adsorption) ความปั่นป่วนของระบบเป็นสภาวะที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการควบคุม เนื่องจากความปั่นป่วนจะทำให้หน้าที่ปั่นเปื้อนและตัวดูดซับสามารถผสมเข้ากัน และความปั่นป่วนยังส่งผลต่ออัตราการแพร่ผ่านเข้าสู่ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาค

ตัวกลางดูดซับ ซึ่งส่งผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับของระบบ ในกรณีที่ความปั่นป่วนต่ำฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคตัวกลางดูดซับจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ได้ถูกรบกวนจากแรงเฉือนที่มาจาก การปั่นป่วน จึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารถูกดูดซับเข้าสู่ตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามกรณีที่มีความปั่นป่วนสูงการแพร่ของสารถูกดูดซับสามารถแพร่เข้าสู่ตัวดูดซับได้เร็วกว่าอันเนื่องมาจากความหนาของชั้นฟิล์มน้ำที่ลดลง

2.4.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของตัวดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมให้การบำบัดน้ำเสีย โดยตัวดูดซับจะทำหน้าที่ดูดซับ อีออนหรือโมเลกุลของสารที่ปนเปื้อนเพื่อแยกสารเหล่านั้นออกจากน้ำ ส่งผลให้น้ำที่ผ่านกระบวนการดูดซับมีคุณภาพที่ดีขึ้น ตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการดูดซับมีหลายชนิด ตัวดูดซับแต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน โดยลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันนี้ส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน ลักษณะสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ดังรูป 3.5



รูปที่ 2.5 การศึกษาคุณสมบัติลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิคพื้นฐานต่าง ๆ

(Tran et al., 2017)

ในส่วนของเนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของตัวดูดซับ ที่จะใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. พื้นผิวของตัวดูดซับ (surface area)

เป็นหนึ่งในลักษณะสมบัติของตัวดูดซับที่มีความสำคัญมาก โดยทั่วไปหากตัวกลาดูดซับมีพื้นผิวนิดเดียวกัน ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย หน่วยที่ใช้วัดปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่นิยมใช้คือ ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับ โดยวิธีที่ใช้วัดปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การวัดไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซไนโตรเจน และคำนวณโดยแบบจำลองของ Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T.) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้ภาษาชนะ 2 ไบที่มีปริมาตรเท่ากัน ไบหนึ่งบรรจุตัวดูดซับ อีกไบหนึ่งเป็นภาษาชนะว่างเปล่าแล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาษาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติ จากนั้นทำให้ภาษาชนะทั้งสองเย็นจัดด้วยไนโตรเจนเหลว ในภาษาชนะที่บรรจุตัวดูดซับไว้จะเกิดการดูดซับก๊าซไนโตรเจนโดยผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาษาชนะทั้งสองซึ่งจะสัมพันธ์กันกับปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับดังสมการ B.E.T. แสดงดังสมการที่ (3-9)

$$\frac{x}{V(1-x)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)x}{V_m C} \quad (3-9)$$

โดยที่ x คือ ความดันสัมพัทธ์ระหว่างความดันก๊าซต่อความดันก๊าซอิ่มตัวที่อุณหภูมิทดลอง (P/P_0)

V คือ ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับต่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (cm^3)

V_{max} คือ ปริมาณมากที่สุดของก๊าซที่ถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (cm^3)

C คือ ค่าคงที่

ซึ่งเมื่อจัดรูปของสมการที่ (3-9) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง โดยจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{x}{V(1-x)}$ และ x เมื่อทำการสร้างกราฟและแก้สมการจะสามารถหาปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับได้จากจุดตัดแกน y ของกราฟ และสามารถหาค่า C จากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยของตารางเมตรต่อกรัมได้จากสมการที่ (3-10)

$$S = \frac{2.69 \times 10^{25} V_m A}{W} \quad (3-10)$$

โดยที่ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)

- V_m คือ ปริมาณมากที่สุดของก๊าซที่ถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (cm^3)
 W คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (g)
 A คือ พื้นที่สำหรับการดูดซับก๊าซไนโตรเจน 1 โมเลกุล (16.2 \AA^2)

2. ขนาดรูพรุน (pore size)

ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนสามารถคำนวณได้โดยวิธีของ Barret-Joyner-Halenda (BJH) โดยมีพื้นฐานมาจากสมการ Kelvin ซึ่งใช้ทำนายการเกิดการควบแน่นคาปิลารีของก๊าซไนโตรเจนสำหรับวัสดุที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-6.5 นาโนเมตร เมื่อมีการใช้สมการ Kelvin ในการศึกษาการดูดซับและคายซับไนโตรเจนโดยตั้งสมมติฐานให้รูปร่างของรูพรุนเป็นทรงกระบอกที่ถูกเติมเต็มด้วยไนโตรเจนเหลว

3. ประจุบนพื้นผิว

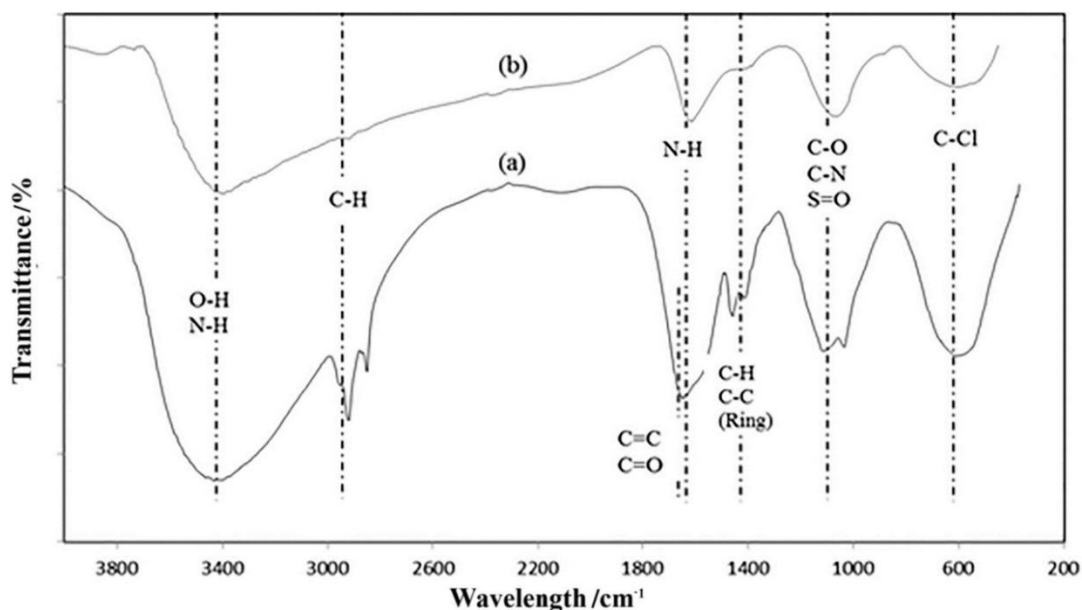
การศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับอาศัยหลักการทำให้ผลรวมประจุบนพื้นผิวมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งเกิดจากการที่มีผลรวมของประจุลบเท่ากับประจุบวก โดยอาศัยการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชหลาย ๆ ค่าโดยจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไตเตรตกรด-เบส จะแสดงสภาพความเป็นประจุบวก ลบ และกลางของตัวดูดซับโดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ข้อมูลประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำนายปรากฏการณ์การดูดซับที่เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดและแรงผลักทางประจุระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับและหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

4. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry, FTIR)

FTIR เป็นหนึ่งในเทคนิคด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อินฟราเรดสเปกโตรสโคป ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้วิเคราะห์หยาบหลายเพื่อศึกษาสมบัติของพื้นผิวตัวดูดซับที่จะส่งผลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการดูดซับ ในการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปในช่วงสเปกตรัม 400-4000 cm^{-1} โดยจะทำการบดตัวอย่างตัวดูดซับและผสมกับ KBr เพื่อช่วยให้แสงส่วน diffuse reflectance เพิ่มขึ้น โดยสารอินทรีย์จะดูดกลืนรังสี IR เข้าไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นการยืด (Stretching) และการงอ (Bending) ของพันธะภายในโมเลกุลในช่วงความถี่ต่าง ๆ แล้วให้สเปกตรัม

ออกมา สเปกตรัมที่ได้จะแตกต่างกันตามชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารอินทรีย์ การดูดกลืนรังสี IR ของหมู่ฟังก์ชันจะเกิดที่ช่วงความถี่ที่เสมอซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่คาดว่าจะพบในการวิเคราะห์ตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันที่พบในตัวกลางดูดซับที่มาจากสลัดจ์ (a) และถ่านกัมมันต์ที่มาจากสลัดจ์ (b)
(Wong et al., 2018)

5. การวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

การตรวจวัดรูปร่างและขนาดอนุภาคของตัวดูดซับจะตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงทำให้มีกำลังขยายที่สูงถึง 10-300,000 เท่า โดยอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดและถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) ผ่านสนามไฟฟ้าภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากคุณสมบัติอิเล็กตรอนที่มีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่รอบในแนวตั้งฉาก ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่นั้นเราสามารถบังคับอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยอาศัยอำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นในกล้อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ใช้ในการศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบของตัวอย่างโดยทำให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปบนพื้นผิว เมื่ออิเล็กตรอนกระทบกับพื้นผิวจะเกิดการกระเจิง

ของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะถูกรวบรวมการกระเจิงแล้วแปรผลออกมาเป็นภาพที่เราสามารถบันทึกได้ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนั้นยังสามารถต่อเติมอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุทั้งในรูปแบบปริมาณและคุณภาพ

6. การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-Ray Powder Diffraction (XRD)

X-ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิวัฒนาการองค์ประกอบของสารตัวอย่าง XRD สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ได้ดังนี้

- ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
- ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
- ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของสารตัวอย่าง

7. ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue)

ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเป็นอีกวิธีหนึ่งในการประเมินประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ทำการทดสอบโดยการนำตัวดูดซับที่ต้องการทดสอบมาใส่ภาชนะ แล้วทดสอบดูดซับเมทิลีนบลูที่ผสมอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการทดสอบจะทำโดยการ นำตัวดูดซับ 0.15 กรัมมาใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 200 มิลลิลิตร เติมเมทิลีนบลูที่ทราบความเข้มข้นลงไปจำนวน 100 มล. หลังจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลาให้นำสารละลายไปกรองแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย แล้วนำสารละลายที่ได้ตรวจวัดความเข้มข้นโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับต่อไป

8. ค่าพีเอชของตัวดูดซับ

ค่าพีเอชของตัวดูดซับเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการพิจารณาลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวการดูดซับอาจประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการแตกตัวได้ ทำให้เกิดความเป็นกรดหรือด่าง ซึ่งค่าความเป็นกรดหรือด่างของตัวดูดซับนั้นอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชของตัวดูดซับอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะของระบบที่ทดสอบ เช่น ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ปริมาณน้ำสะอาดที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ หรืออุณหภูมิในการทดสอบ ดังนั้นการทดสอบจะกำหนดสถานะมาตรฐานเพื่อควบคุมให้วิธีการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งวิธีที่ใช้ในการทดสอบค่าพีเอชมีดังนี้ นำตัวดูดซับปริมาณ 2 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของน้ำให้อยู่ที่ 7 ทำการเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้สูงถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วทำให้ระบบเย็นตัวลงมาอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียสจากนั้นจึงทำการวัดค่าพีเอชของระบบ

9. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของสารอินทรีย์

การวิเคราะห์นี้มักจะถูกนำมาใช้กับตัวดูดซับที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ การทดสอบทำโดย ตัวอย่างจะถูกเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Flash Combustion) ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมแล้วมีการเติมแก๊สออกซิเจน จะเกิดเป็น N_2 CO_2 H_2O และ SO_2 แล้วเข้าคอลัมน์เพื่อทำการแยกและตรวจวัดถัดไป ในส่วนการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน จะแตกต่างตรงที่ในกระบวนการเผาไหม้จะไม่มีการเติมแก๊สออกซิเจนเท่านั้น นำค่าแก๊สที่ได้มาคำนวณกลับเพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jian และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาจากผลพลาสมาและสมมูลการดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกไปและเป็นการเพิ่มความสามารถของการดูดซับให้สูงมากขึ้น โดยไดอะตอมไมต์ดิบและไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการกระตุ้นจะถูกวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของวัสดุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS และวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวโดยการดูดซับของ B.E.T. จากการศึกษาพบว่าเมื่อกระตุ้นไดอะตอมไมต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พื้นที่ผิวของไดอะตอมไมต์จะเพิ่มขึ้นจากเดิม $15.87 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $31.52 \text{ m}^2/\text{g}$ จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชี้ให้เห็นถึงการกระตุ้น

ด้วยโซเดียมไดออกไซด์จะช่วยเพิ่มรพูนของไดอะตอมไมด์ นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูจาก 1.72 mg/g ไปเป็น 18.15 mg/g มีประสิทธิภาพการกำจัดสีเมทิลีนบลูที่เพิ่มขึ้น 90.75% จาก 8.60% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm จากการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าการดูดซับสีเมทิลีนบลูของไดอะตอมไมด์นั้นเป็นไปแบบ pseudo-second-order ไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชไอโซเทอม มีค่าการดูดซับสูงสุด 27.86 mg/g และจากการศึกษาด้านอุณหพลศาสตร์พบว่าปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดจากไดอะตอมไมด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นแบบดูดความร้อน และสามารถเกิดขึ้นเองได้ แสดงให้เห็นว่าไดอะตอมไมด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีประสิทธิภาพที่จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อม

Aivalioti และคณะ (2012) ทำการศึกษาการกำจัด BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and m-,p-,o-xylenes) MTBE (methyl tertiary butyl ether) และ TAME (tertiary amyl methyl ether) จากสารละลายด้วยไดอะตอมไมด์ดิบ ไดอะตอมไมด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีและไดอะตอมไมด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อน โดยทำการทดลองในรูปแบบที่ละเทด้วยไดอะตอมไมด์ 14 ตัวอย่างที่แตกต่างกันตามรูปแบบของการกระตุ้น โดยทำการศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับเช่น ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรและการกระจายตัวของรพูน การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับ รวมไปถึงการศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับในแต่ละตัวอย่าง จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงไดอะตอมไมด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สามารถกำจัด BTEX MTBE และ TAME ออกจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และในบรรดาสารถูกดูดซับทั้ง 3 ชนิด BTEX นั้นเป็นสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด และผลกระทบจากเนื้อสาร (matrix effect) นั้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารถูกดูดซับบนไดอะตอมไมด์ การดูดซับด้วยไดอะตอมไมด์สอดคล้องกับสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second order model) และสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

Caliskan และคณะ (2011) ทำการศึกษาการกำจัดไอออนสังกะสี (Zn(II)) จากสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับไดอะตอมไมด์ธรรมชาติ และไดอะตอมไมด์ที่ถูกดัดแปลงด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) และความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) และไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราดชเควิช (Dubinin-Radushkevich's adsorption isotherm; D-R) ถูกนำมาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และ

จากไอโซเทอมแบบคูบิน-ราตซ์เควิช พลังงานการดูดซับเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 8 KJ mol^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสังกะสีไอออนของทั้งไดอะตอมไมต์ธรรมชาติ และไดอะตอมไมต์ที่ถูกดัดแปลงเป็นการดูดซับแบบกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการนำแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo-second-order) และแบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ (intraparticle diffusion) มาใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน และพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) เช่น เอนทัลปี (ΔH°) พลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) และเอนโทรปี (ΔS°) แสดงให้เห็นถึงการดูดซับของสังกะสีไอออนของไดอะตอมไมต์ธรรมชาติ และไดอะตอมไมต์ดัดแปลงเป็นไปตามกลไกทางกายภาพและสามารถเกิดขึ้นเองได้ (Caliskan et al., 2011)

Cheng และคณะ (2016) ได้ศึกษาการนำสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุดูดซับ สลัดจ์แห้งจากโรงบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่งในประเทศจีนถูกนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตสลัดจ์คาร์บอน (carbonized sludge) หลังจากนั้นผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและความพรุน วัสดุดูดซับที่ได้ถูกวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยการศึกษา (Caliskan et al., 2011) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (FTIR) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และขนาดพื้นที่ผิว จากการศึกษาการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนแสดงให้เห็นการสูญเสียของน้ำและสารอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำในช่วง 300-700 องศาเซลเซียส และจากการทดลองการดูดซับไนโตรเจนให้ผลเป็นไอโซเทอมการดูดซับรูปแบบที่ 5 แสดงถึงการเป็นวัสดุประเภทรูพรุนระดับกลาง (mesoporous material) และผลจากการกระตุ้นทำให้ขนาดพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 642 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแสดงให้เห็นการเกิดขึ้นของหมู่ฟังก์ชันสารประกอบคาร์บอกซิล เมทอล (carboxyl-metal complex) แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับถูกพิจารณาจากการดูดซับของ Rhodamine B พบว่าเมื่อปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นโดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปในรูปแบบแลงมัวร์ การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปแบบปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และการดูดซับไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพีเอชและค่าของแข็งที่ละลายน้ำ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในประยุกต์ใช้สลัดจ์เป็นวัสดุดูดซับได้ (Cheng et al., 2016)

Orlandi และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้สลดจ์ดิบซึ่งถูกผลิตขึ้นปริมาณมากในอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับโดยการนำสลดจ์ดิบไปอบแห้ง หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 42.5 % (v/v) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประเมินประสิทธิภาพการดูดซับด้วยการทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู และจากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและความร้อนทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับโดยตัวดูดซับที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดถึง 107.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน มีไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์-ฟลูนดริชไอโซเทอม แสดงให้เห็นว่าสลดจ์จากอุตสาหกรรมกระดาษสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับได้ (Orlandi et al., 2017)

Rozada และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้ 2 ชนิดได้แก่สลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียและยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว มาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยเพิ่มประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกและซิงค์คลอไรด์ การทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ทำการทดสอบการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูในวัฏภาคน้ำ โดยจากการศึกษาพบว่าสารตั้งต้นที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์คือสลดจ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างสลดจ์และซิงค์คลอไรด์ 1:1 เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสในสภาวะไร้ออกซิเจน ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูอยู่ที่ 134.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1358.5 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์ที่ได้ยังคงมีองค์ประกอบของโลหะสังกะสีปนอยู่ซึ่งอาจก่อให้เกิดการชะเอาโลหะดังกล่าวปนเปื้อนไปกับน้ำในระหว่างการดูดซับ จึงแนะนำให้ทำการเคลือบด้วยโพลีเมอร์และการล้างเพื่อชะเอาไอออนสังกะสีออกจากวัสดุก่อนการนำไปใช้งาน (Rozada et al., 2005)

Monsalvo และคณะ (2011) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากสลดจ์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกันออกไป 3 วิธี ได้แก่การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อใช้ทดสอบการดูดซับ 4-chlorophenol ในสารละลาย จากการศึกษาพบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวที่ต่ำ ซึ่งพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นโดยพื้นที่ผิวจะมีค่าสูงสุดที่ 100 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนั้นการที่มีปริมาณเถ้าสูงถึง 23% ทำให้เป็นปัจจัยจำกัดในการเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวของรูพรุนของวัสดุดังกล่าว และการ

กระตุ้นด้วยอากาศทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็น 250 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำหนักของแข็ง 3:1 ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส กลับเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนให้สูงขึ้นถึง 1,800 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนสูงถึง 0.35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับ 4-chlorophenol พบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 3.205 มิลลิโมลต่อกรัม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำสัจที่เป็นวัสดุที่มีราคาต่ำมาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดมลพิษในน้ำได้ (Monsalvo et al., 2011)

Dobor และคณะ (2015) ทำการศึกษาการใช้วัสดุผสมคาร์บอน-ไดอะตอมไมต์เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดโลหะหนักจากสารละลาย โดยมีเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับวัสดุผสมซึ่งเตรียมผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) การเติมหมู่ฟังก์ชัน (functionalization) และการกระตุ้นโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุที่มีรูพรุน และมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย การศึกษาลักษณะเฉพาะทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (electron Probe Microanalysis: EPMA) และการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างธาตุ และจากผลการศึกษาการดูดซับชี้ให้เห็นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยเฉพาะไอออนของตะกั่วและนิกเกิลออกจากสารละลาย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระบบแบบที่ละเท และแบบต่อเนื่องได้ การดูดซับโลหะหนักของวัสดุดังกล่าวเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 80 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับไอออนของนิกเกิล และ 380 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับไอออนของตะกั่ว นอกจากนี้ยังมีการนำเอาเทคนิค fractionation solid phase extraction (SPE) มาใช้ในการตรวจสอบลักษณะการดูดซับของวัสดุดังกล่าว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไอออนของตะกั่วสามารถสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชัน C-O บนพื้นผิวของวัสดุดังกล่าว (Dobor et al., 2015)

Hadjar และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุผสมระหว่างตัวดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งทำมาจากไดอะตอมไมต์และถ่านคาร์บอน เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการดูดซับ p-cresol ที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งวัสดุผสมมีโครงสร้างของรูพรุนที่เชื่อมต่อกันเนื่องมาจากความพรุนของวัสดุทั้งสองชนิด และมีขนาดพื้นที่ผิวสูงในระดับหนึ่ง (100-400 m²/g) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในวัสดุผสมที่ค่อนข้างสูงถึง 70-90% และจากการศึกษา

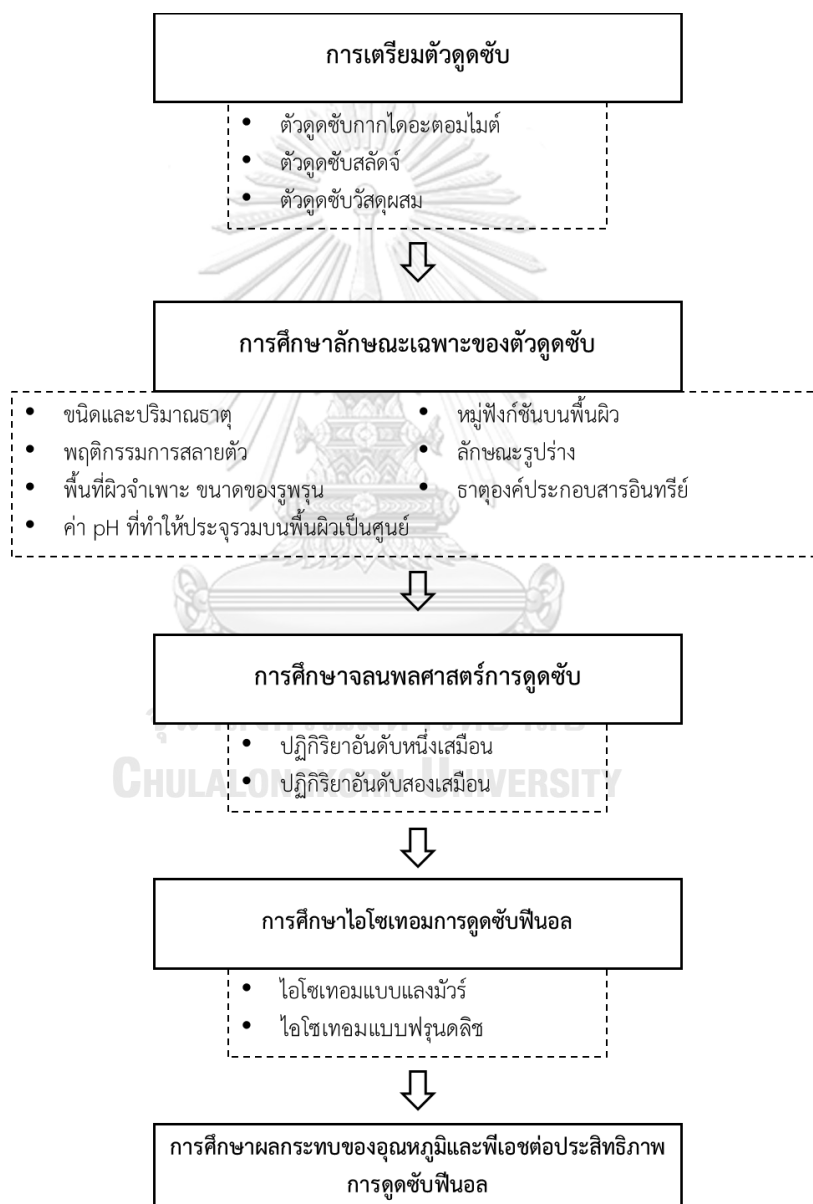
พบว่า การดูดซับ p-cresol ด้วยวัสดุผสมคาร์บอนไดอะอะตอมไมด์นั้นเกิดขึ้นเร็วกว่าการดูดซับด้วยวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับยังมีค่าใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไปใน pH ช่วงกว้าง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่ดีระหว่างโมเลกุลของ p-cresol และวัสดุผสมระหว่างสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ เหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุดูดซับสารในกลุ่มอะโรมาติกที่มีขั้ว



บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพกากไยดอะตอมไมต์และสลัดจ์ด้วยกระบวนการทางความร้อนและทางเคมี เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ จนพลศาสตร์การดูดซับ ประสิทธิภาพและไอโซเทอมการดูดซับ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ รวมไปถึงการขึ้นรูปตัวดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
(Fourier Transform Infrared spectrometer; FTIR)
ยี่ห้อ Perkin Elmer
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction; XRD)
ยี่ห้อ JEOL รุ่น JDX-3530
3. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF)
ยี่ห้อ Philips รุ่น PW-2404
4. เครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer)
ยี่ห้อ JASCO รุ่น v530
5. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer)
ยี่ห้อ Quantachrome Instruments รุ่น Autosorb-1
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscope; SEM)
ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3400N Type II
7. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน
(Thermo gravimetric analyzer; TGA) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น SDTA
851^e
8. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุและองค์ประกอบ (Elemental Analyzer)
ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PE2400 series II
9. เครื่องอัดไฮดรอลิก
10. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบเอนกประสงค์ชนิด (Static Universal Testing
Machine; Model 4502)

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. เครื่องบดแบบลูกบอลความเร็วสูง (High speed ball mill)
3. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อแนวนอน (Tubular furnace)
4. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath)
5. ตู้อบ (Laboratory oven)

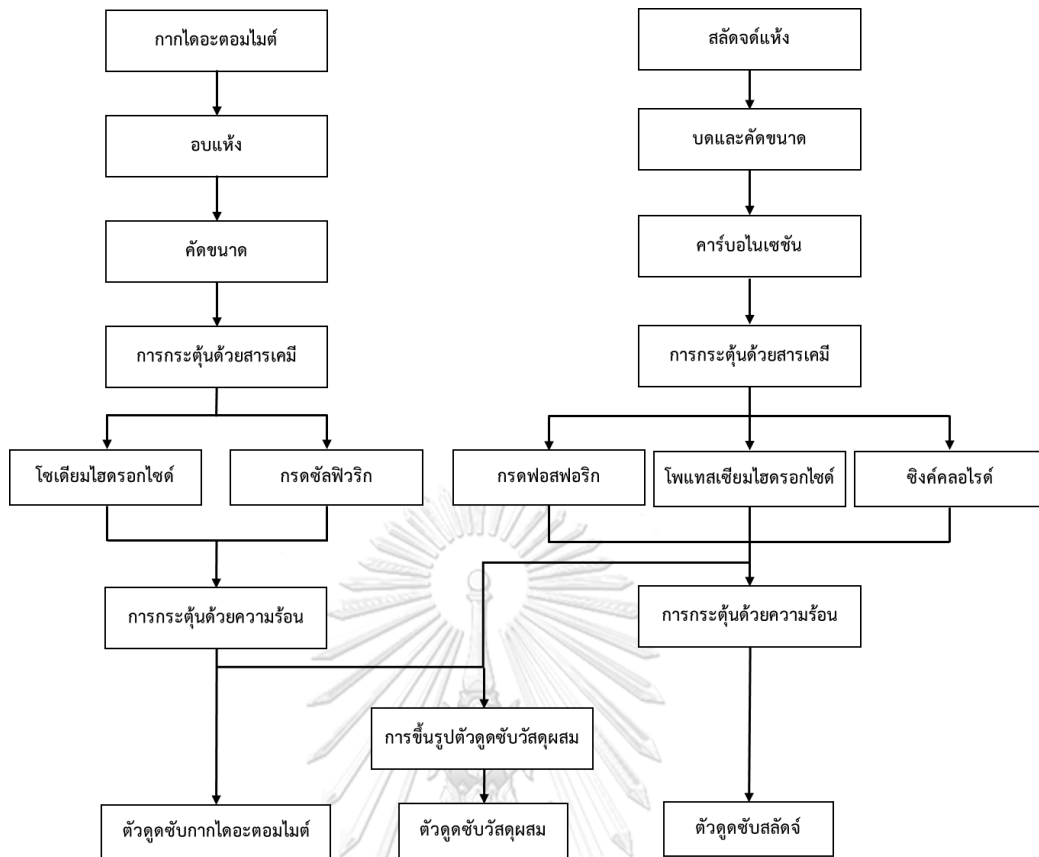
6. ตู้ควบคุมความชื้น (Desiccator)
7. ชุดตะแกรงร่อน (Sample sieve tower)
8. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker)
9. ตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter)
10. เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Rotameter)
11. ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filter set)

3.1.3 วัสดุและสารเคมี

1. กากไดอะตอมไมต์จากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม
2. สลัดจ์แห้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม
3. ฟีนอล (Phenol)
4. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
7. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)

3.2 การเตรียมตัวดูดซับ

การเตรียมตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบสองชนิดได้แก่ กากไดอะตอมไมต์ และสลัดจ์ เพื่อพัฒนาวัสดุผสมระหว่างกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์ โดยผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน และทางเคมี โดยมีขั้นตอนดังภาพ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ

3.2.1 การปรับปรุงกากไถอะตอมไมต์

กากไถอะตอมไมต์ที่ใช้ในการทดลองมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องตี๋ม ที่ใช้สำหรับเป็นตัวกรองในระบบการผลิตเครื่องตี๋มแสดงดังภาพ 3.2 การเตรียมกากไถอะตอมไมต์ทำโดยนำกากไถอะตอมไมต์ไปอบในตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นนำไปคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร

การปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับกากไถอะตอมไมต์ด้วยสารเคมีโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 1, 3, และ 5 โมลาร์ โดยใช้เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำดีไอออส น้ำ หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ (Al-Qodah et al., 2007) จะได้ตัวดูดซับดังตารางที่ 3.1(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-

Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)(Al-Qodah et al., 2007)

นำกากไถอะตอมไมต์จากการทดลองข้างต้นไปผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน โดยการเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำตัวอย่างแต่ละกลุ่มการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดไปศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล และไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล

ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองการปรับปรุงตัวดูดซับจากกากไถอะตอมไมต์

การกระตุ้นด้วยสารเคมี		ชื่อตัวดูดซับ	การกระตุ้นด้วยความร้อน
ชนิดสารเคมี	ความเข้มข้น (M)		อุณหภูมิ (°C)
ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารเคมี		Diatomite waste	
โซเดียมไฮดรอกไซด์	1	DW_NaOH_1M	85
	3	DW_NaOH_3M	500
	5	DW_NaOH_5M	600
กรดซัลฟิวริก	1	DW_H ₂ SO ₄ _1M	700
	3	DW_H ₂ SO ₄ _3M	800
	5	DW_H ₂ SO ₄ _5M	900

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 การปรับปรุงสลัดจ์

สลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นสลัดจ์จากถังตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (Activated sludge) ในโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ที่ผ่านการรีดน้ำออกเพื่อเพิ่มปริมาณของแข็งด้วยสายพาน (Belt Filter Press) แล้วนำไปตากแดดจนแห้ง ดังภาพ 3.3 การเตรียมสลัดจ์ทำโดยการนำสลัดจ์ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) แล้วนำไปคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร นำสลัดจ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เพื่อให้ได้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากนั้นจึงนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้น ด้วยสารเคมี (Chemical activation) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น

3.2.2.1 กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี

- กรดฟอสฟอริก

การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ โดยการผสมถ่านสลัดจ์และกรดฟอสฟอริกด้วยอัตราส่วนน้ำหนัก 1:1 และ 1:3 โดยใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ (Kong et al., 2014) (Orlandi et al., 2017)

- โพลีแซลไซมไฮดรอกไซด์

การกระตุ้นด้วยโพลีแซลไซมไฮดรอกไซด์ โดยการผสมผงโพลีแซลไซมไฮดรอกไซด์กับถ่านสลัดจ์ด้วยอัตราส่วนน้ำหนัก 1:1 และ 3:1 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ (Monsalvo et al., 2011)

- ซิงค์คลอไรด์

การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยการผสมถ่านสลัดจ์และซิงค์คลอไรด์ด้วยอัตราส่วนน้ำหนัก 1:1 และ 3:1 โดยใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ (Al-Malack & Dauda, 2017)

3.2.2.2 กระตุ้นด้วยความร้อน

การกระตุ้นด้วยความร้อนโดยการเผาที่สภาวะไร้อากาศภายใต้การพาของก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700, และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ทำการแช่ตัวดูดซับที่ได้ในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอออนจนกระทั่งน้ำล้างปราศจากไอออนของคลอไรด์ และมีค่าพีเอชเท่ากับน้ำดีไอออนซ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 6.3 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทำการคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร จะได้ตัวดูดซับดังตารางที่ 3.2 นำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล เพื่อเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดไปศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล และไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล

ตารางที่ 3.2 ชุดการทดลองการปรับปรุงตัวดูดซับจากสไลด์จ์

ชนิดสารเคมีกระตุ้น	อัตราส่วนน้ำหนัก (สารเคมี:ถ่านสไลด์จ์)	ชื่อตัวดูดซับ	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)
-	-	Sludge char	500 600 700 800
H ₃ PO ₄	1:1	ASC_H ₃ PO ₄ _1:1	
	3:1	ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	
ZnCl ₂	1:1	ASC_ZnCl ₂ _1:1	
	3:1	ASC_ZnCl ₂ _3:1	
KOH	1:1	ASC_KOH_1:1	
	3:1	ASC_KOH_3:1	



รูปที่ 3.3 กากไต่อะตอมไมต์อบแห้ง (ซ้าย) สไลด์จ์อบแห้ง(ขวา)

3.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

3.3.1 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ ปริมาณธาตุ และโครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยเทคนิค X-ray Fluorecence (XRF) เพื่อระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในตัวดูดซับจากกากไต่อะตอมไมต์และสไลด์จ์ในแต่ละประเภท ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารในตัวดูดซับจากกากไต่อะตอมไมต์ สไลด์จ์ และวัสดุผสมระหว่างกากไต่อะตอมไมต์และสไลด์จ์ ในแต่ละประเภทด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRF)

3.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนใช้เครื่องเทอร์โมกราฟิเมตริกซ์แอนาไลเซอร์ (TGA) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของน้ำหนักสารตัวอย่างที่หายไปเทียบกับเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด เพื่อนำมาคำนวณค่าต่าง ๆ ค่าที่วิเคราะห์ประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture) เปอร์เซ็นต์สารระเหย (volatile matter) เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และเปอร์เซ็นต์เถ้า (ash)

3.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้จากกากไถอะตอมไมต์และสไลต์แต่ละประเภทโดยใช้ เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared spectrometer; FTIR)

3.3.4 การหาค่าพีเอชที่ให้ค่าประจุมบนพื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์

(pH of Point of Zero charge; pH_{pzc})

ทำการหาค่าพีเอชที่ให้ค่าประจุมบนพื้นผิวของตัวดูดซับจากกากไถอะตอมไมต์และสไลต์แต่ละประเภท มีค่าเป็นศูนย์โดยการหาค่าศักย์ซีตา (Zeta Potential) ของตัวดูดซับในแต่ละพีเอชด้วยวิธี

- ผสมตัวดูดซับที่ต้องการทดสอบกับน้ำดีไอออนซ์ด้วยอัตราส่วน 0.05 กรัมต่อน้ำ 50 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่

- ปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) ด้วยโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์

- เติมนสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 3 5 7 9 และ 11 โดยใช้เครื่องวัดพีเอช

- นำตัวอย่างสารละลายแต่ละพีเอช ไปวัดค่าศักย์ซีตาด้วยเครื่อง Zetasizer

จากนั้นนำค่าศักย์ซีตาที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีตากับค่าพีเอช เพื่อหาค่าพีเอชที่ทำให้ประจุมบนพื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์

3.3.5 การศึกษาลักษณะรูปร่าง

การศึกษาลักษณะรูปร่างของตัวดูดซับที่ได้จากกากไถอะตอมไมต์ สไลต์ และวัสดุผสมจากกากไถอะตอมไมต์และสไลต์ ด้วยการถ่ายภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3.3.6 การวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของรูพรุน

นำตัวอย่างตัวดูดซับที่ได้แต่ละประเภทไปหาขนาดพื้นที่ผิวโดยการวัดไอโซเทอมการดูดซับของก๊าซไนโตรเจน และคำนวณโดยแบบจำลองของ Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T.)

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์แต่ละประเภท โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic Elemental Analyzer)

3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอล

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลอาศัยการดูดกลืนแสงช่วงอุลตราไวโอเล็ตของฟีนอล ทำได้โดยการสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density; OD) กับความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล นำตัวอย่างของสารละลายฟีนอลไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่างสารละลายฟีนอล

3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์แต่ละประเภททำได้โดย

- เตรียมสารละลายฟีนอลด้วยน้ำดีไอไนซ์ให้ได้ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาตรขวดละ 50 มิลลิลิตร ควบคุมความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ด้วยโซเดียมคลอไรด์
- เติมตัวดูดซับ 0.05 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมสารละลายฟีนอลไว้ นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- เก็บตัวอย่างสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา ทำการกรองสารละลายด้วย ตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter) เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของฟีนอลด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer) ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร
- นำค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายมาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับดังสมการที่ 3-1 เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงไปศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล

$$\%R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (3-1)$$

โดย	%R	คือ ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล
	C_i	คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_f	คือ ค่าความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไถอะตอมไมด์และสไลด์แต่ละประเภททำได้โดย

- เตรียมสารละลายฟีนอลด้วยน้ำดีไอออนให้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตรขวดละ 100 มิลลิลิตร ควบคุมความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ด้วยโซเดียมคลอไรด์

- เติมตัวดูดซับ 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมสารละลายฟีนอลไว้ แล้วนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer) ที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- เก็บตัวอย่างสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา ในขวดรูปชมพู่ที่เวลา 0, 0.5, 1, 5, 10, 30, 60, 120, 180, 240 และ 300 นาทีตามลำดับ หลังจากนั้นทำการกรองสารละลายด้วย ตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter) เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของฟีนอลด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer) ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร

- นำค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลามาคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ ดังสมการ

$$q_t = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad (3-2)$$

โดย	q_t	คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_f	คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	m	คือ ปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัม)
	V	คือ ปริมาตรสารละลายฟีนอล (ลิตร)

- สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับเวลาเพื่อหาเวลาที่ต้องการดูดซับเข้าสู่สมดุล เปรียบเทียบเวลาการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับแต่ละชนิด

- นำค่าความสามารถในการดูดซับในแต่ละช่วงเวลามาสร้างกราฟ เพื่อหารูปแบบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการดูดซับที่เกิดขึ้น สมการที่นำมาใช้ได้แก่สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) (4-3) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction) (4-4)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k}{2.303}t \quad (3-3)$$

โดย q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน
 t คือ เวลาใดๆ (นาที)

ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3-4)$$

โดย q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน
 t คือ เวลาใด ๆ (นาที)

3.7 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับที่มาจากกากไถอะตอมไมด์และสไลด์จัดทำได้โดย

- เตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 20, 40, 50, 80, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ควบคุมความแรงไอออนด้วยโซเดียมคลอไรด์ที่ 0.01 โมลาร์

- เติมตัวดูดซับแต่ละชนิด 0.1 กรัมลงในสารละลายฟีนอลในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้จำนวน 8 ขวด นำไปใส่ในเครื่องเขย่าที่อยู่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งหาได้จากการทดลองที่ 3.2.4 ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา แล้วทำการกรองสารละลายด้วยตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter)

เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของฟีนอลที่สมดุลด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer) ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร

- นำค่าความเข้มข้นฟีนอลที่จุดสมดุลในแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลด้วยสมการ 3-2

- ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล กับความเข้มข้นของฟีนอลที่จุดสมดุล เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด

- นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อหาไอโซเทอมดูดซับที่เหมาะสมสำหรับอธิบายการดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยไอโซเทอมที่ใช้ได้แก่ ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ (3-5) และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (3-6)

ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ (Langmuir's isotherm)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bC_e q_m} \quad (3-5)$$

โดย q คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

b คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงมัวร์

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่จุดสมดุล

ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm)

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3-6)$$

โดย q คือ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K, 1/n$ คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดลิช

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่จุดสมดุล

3.8 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากกากไถอะตอมไมต์และสลัดจ์ ในแต่ละอุณหภูมิทำได้โดย

- เตรียมสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 20, 40, 50, 80, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ควบคุมค่าความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ ด้วยโซเดียมคลอไรด์

- เติมตัวดูดซับแต่ละชนิด 0.1 กรัมลงในสารละลายพีนอลในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้จำนวน 8 ขวด นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งหาได้จากการทดลองที่ 3.2.4 ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา แล้วทำการกรองสารละลายด้วยตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter) เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของพีนอลที่สมดุลด้วยเครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer) ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร

- นำค่าความเข้มข้นพีนอลที่จุดสมดุลในแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลด้วยสมการ 3-2

- ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล กับความเข้มข้นของพีนอลที่จุดสมดุล เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด ในแต่ละอุณหภูมิ นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยสมการที่ 3-7, 3-8 และ 3-9

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (3-7)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln(K_c) \quad (3-8)$$

$$\ln(K_c) = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (3-9)$$

โดย	T	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
	K_c	คือ ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุล
	ΔG°	คือ ค่าความต่างของพลังงานอิสระ (จูลต่อโมล)
	ΔS°	คือ ค่าความต่างเอนโทรปี (จูลต่อโมล)
	ΔH	คือ ค่าความต่างเอนทาลปี (จูลต่อโมล)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล)

3.9 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับในแต่ละพีเอชทำโดย

- เตรียมสารละลายพีนอลด้วยน้ำดีไอโอไนซ์ให้ได้ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิตร ปริมาตรขวดละ 50 มิลลิตร ควบคุมความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ด้วยโซเดียมคลอไรด์
- เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ 3 5 7 9 และ 11 โดยใช้เครื่องวัดพีเอช
- เติมตัวดูดซับ 0.05 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมสารละลายพีนอลไว้ นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- เก็บตัวอย่างสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา ทำการกรองสารละลายด้วย ตลับกรองไนลอนสำหรับไซริงค์ (Nylon membrane syringe filter) เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของพีนอลด้วยเครื่องยูวีวิสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV visible spectrophotometer)
- นำค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายมาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับตั้งสมการที่ 3-1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับพีนอลที่พีเอชของสารละลายต่าง ๆ

3.10 การศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสม

การศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมด้วยวิธีการวิธีอัดรีด (Extrusion) และอัดแห้ง (Dry Pressing)

3.10.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion)

- ผสมตัวดูดซับจากสไลด์จ์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับพีนอลสูงสุด กับ Carboxy Methyl Cellulose (CMC) เพื่อใช้ตัวประสาน (binder) น้ำ และสารหล่อลื่น (lubricant) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้อัตราส่วนตัวดูดซับมากที่สุดที่สามารถขึ้นรูปได้
- นำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยใช้เครื่องอัดรีดเพื่อให้ได้เส้นวัสดุดูดซับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 2 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ

- นำตัวดูดซับที่ไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม (Compression test)

- นำวัสดุดูดซับที่ได้มาทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ ประสิทธิภาพและไอโซเทอมการดูดซับ

3.10.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแห้ง (Dry pressing)

- ผสมตัวดูดซับจากสไลด์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุด กับ Carboxy Methyl Cellulose (CMC) เพื่อใช้ตัวประสาน (binder) และสารหล่อลื่น (lubricant) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้อัตราส่วนตัวดูดซับมากที่สุดที่สามารถขึ้นรูปได้

- นำส่วนผสมที่ได้ใส่ในแม่พิมพ์ (Mold) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกความดัน 1,000 psi

- นำไปผ่านกระบวนการเผาภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยอุณหภูมิที่ 700 และ 800 องศาเซลเซียสด้วยระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้วัสดุดูดซับที่สามารถคงรูปได้เมื่ออยู่ในสภาวะทดสอบการดูดซับ

- นำตัวดูดซับที่ได้ไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม (Compression test)

- นำวัสดุดูดซับที่ได้มาทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับ ประสิทธิภาพและไอโซเทอมการดูดซับ

3.10.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (Compression test)

นำตัวดูดซับวัสดุผสมที่ผ่านกระบวนการเผาโดยมา ปรับแต่งให้ความยาวเป็นสองเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และตกแต่งส่วนปลายของชิ้นงานให้พื้นผิวราบและตั้งฉากกับแกนตัวดูดซับวัสดุผสม นำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกด ด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบเอนกประสงค์ ชนิด Static ขนาด (10 กิโลนิวตัน) โดยใช้ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม (Compressive stress)

3.11 ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

แผนงานวิจัย	ระยะเวลา (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1. ค้นคว้าเอกสารและสออบโครงร่างวิทยานิพนธ์	← →											
2. เตรียมอุปกรณ์ สารเคมี วัสดุดิบ	← →											
3. ดำเนินงานวิจัย												
3.1 เตรียมตัวดูดซับ												
3.2 ศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ												
3.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟีนอล				← →								
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล				← →								
3.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล						← →						
3.6 ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ							← →					
4. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย								← →				
5. จัดพิมพ์และสออบวิทยานิพนธ์										← →		

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำสลัดจ์และกากไดอะตอมไมต์ จากอุตสาหกรรมเครื่องต้ม มาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนและเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ และศึกษาจลนพลศาสตร์ ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล ผลของอุณหภูมิและพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล รวมถึงการทำวัสดุผสมเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

4.1.1.1 กากไดอะตอมไมต์ (Raw Diatomite Waste)

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (TGA) กากไดอะตอมไมต์มีค่าความชื้นเพียงร้อยละ 0.38 เก้าสูงถึง ร้อยละ 98.21 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ากากไดอะตอมไมต์มีเก้าซึ่งเป็นสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบเก้าพบว่ามีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าพบว่ากากไดอะตอมไมต์มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าไดอะตอมไมต์ดิบ (Raw Diatomite) ที่มีแหล่งที่มาจากเหมืองในจังหวัดลำปาง และไดอะตอมไมต์จากเหมืองในประเทศไนจีเรีย ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 75.13 และ 82.36 (Zheng et al., 2018) ตามลำดับ

4.1.1.2 สลัดจ์ (Raw Sludge)

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (TGA) พบว่าสลัดจ์มีค่าความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัว และเก้า ร้อยละ 9.20, 29.76, 15.79 และ 45.25 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสลัดจ์นั้นมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบธาตุ (Elemental Analysis) พบว่าสลัดจ์มีปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ร้อยละ 28.88, 5.08, 5.17, 0.81 และ 39.94 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และมีอัตราส่วน C/H เท่ากับ 0.4732 และเมื่อนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

อัตราส่วน C/H เพิ่มขึ้นเป็น 2.164 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอะโรมาติกคาร์บอนอันเนื่องมาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับสลัดจ์จากแหล่งกำเนิดชนิดอื่นๆ พบว่าสลัดจ์จากอุตสาหกรรมเครื่องตีมีปริมาณองค์ประกอบธาตุคาร์บอนต่ำกว่าสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษและโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีองค์ประกอบคาร์บอนร้อยละ 48.70 และ 38.24 ตามลำดับ (Al-Malack & Dauda, 2017) (Monsalvo et al., 2011) หากพิจารณาองค์ประกอบแล้วพบว่าสลัดจ์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 30.9 นอกจากนี้ยังมี ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 20.9, 13.97 และ 9.77 ตามลำดับ ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์ที่พบเป็นองค์ประกอบหลักนั้นส่วนหนึ่งมาจากกระบวนการกรองเครื่องตีนั้นได้ใช้ ไดอะตอมไมต์เป็นตัวกรองเพื่อนำเอาสิ่งปนเปื้อนออกจากเครื่องตี หลังจากการล้างทำความสะอาดระบบกรอง ไดอะตอมไมต์บางส่วนจะถูกชะลงไปปนเปื้อนกับน้ำเสียและเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหลังจากนั้นจึงกลายมาเป็นองค์ประกอบของสลัดจ์ รวมถึงเศษดินและทรายบนลานตากตะกอนที่ปนเปื้อนมากับสลัดจ์ระหว่างการตากแห้งสลัดจ์

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าทั้งกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์ไม่มีองค์ประกอบของโลหะหนักอันตราย และมีปริมาณธาตุซัลเฟอร์ต่ำ จึงมีความเหมาะสมในการนำมาพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ โดยกากไดอะตอมไมต์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับประเภทซิลิกา แตกต่างจากสลัดจ์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรียที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียในระบบ Activated sludge สารอินทรีย์ที่แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ในรูปของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันบางชนิด (Samolada & Zabaniotou, 2014) จึงทำให้สลัดจ์มีความเหมาะสมที่จะนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับประเภทคาร์บอน



รูปที่ 4.1 ผงวัสดุดิบขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร กากไดอะตอมไมต์ (ซ้าย) สลัดจ์ (ขวา)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ (Raw Sludge) และกากไดอะตอมไมต์ (Raw Diatomite Waste)

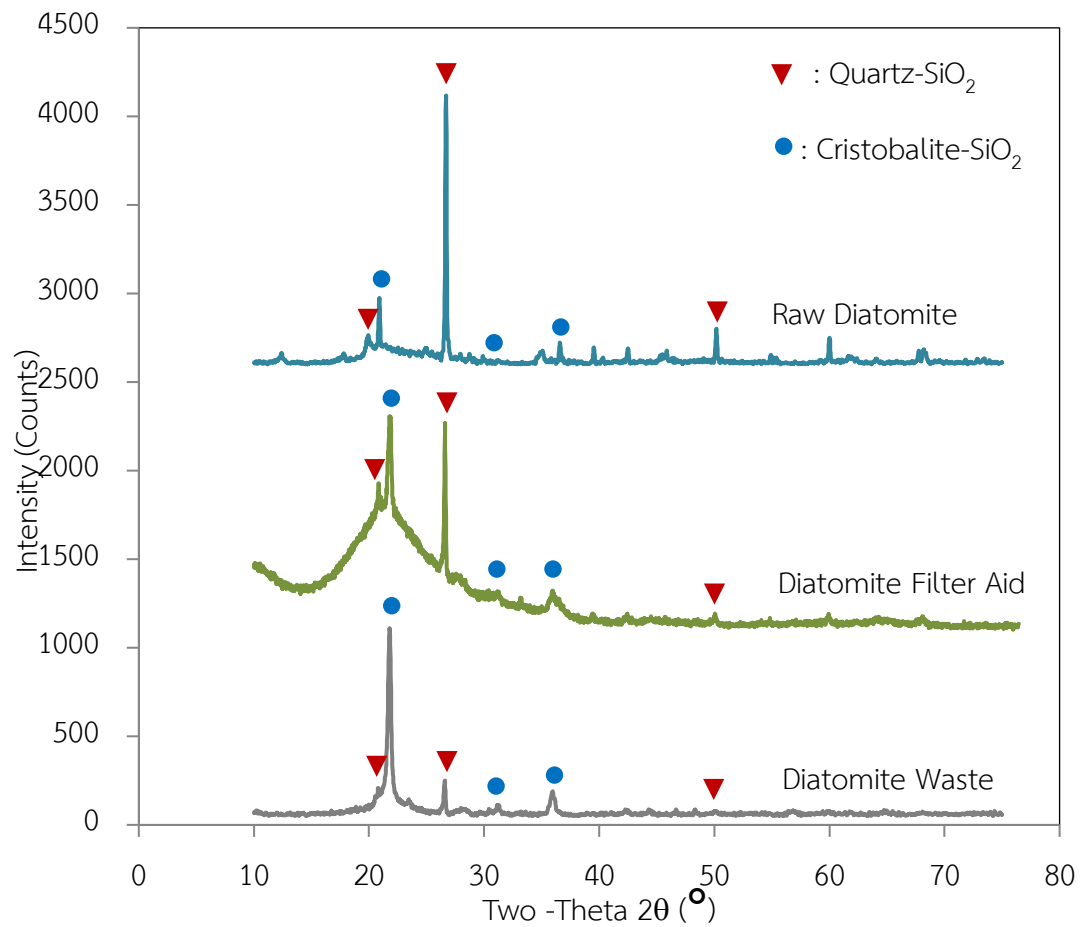
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	สลัดจ์	กากไดอะตอมไมต์
การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)		
ความชื้น (Moisture)	9.20	0.38
สารระเหยง่าย (Volatile matter)	29.76	1.21
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	15.79	0.2
เถ้า (Ash)	45.25	98.21
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)		
คาร์บอน (C)	28.88	N/A
ไฮโดรเจน (H)	5.08	N/A
ไนโตรเจน (N)	5.17	N/A
ซัลเฟอร์ (S)	0.81	N/A
ออกซิเจน (O)*	39.94	N/A
องค์ประกอบเถ้า (Ash Composition)		
SiO ₂	30.91	92.83
P ₂ O ₅	20.90	0.09
CaO	13.97	0.33
Al ₂ O ₃	9.77	2.57
SO ₃	7.64	0.11
Fe ₂ O ₃	6.66	2.03
K ₂ O	4.85	0.60
MgO	2.37	0.27
Na ₂ O	1.18	0.90
TiO ₂	0.38	0.17
MnO	0.30	<0.1
SrO	0.17	<0.1
ZnO	0.12	<0.1
อื่นๆ	0.13	<0.1

หมายเหตุ *ผลต่างจากการคำนวณ

4.1.2 โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ

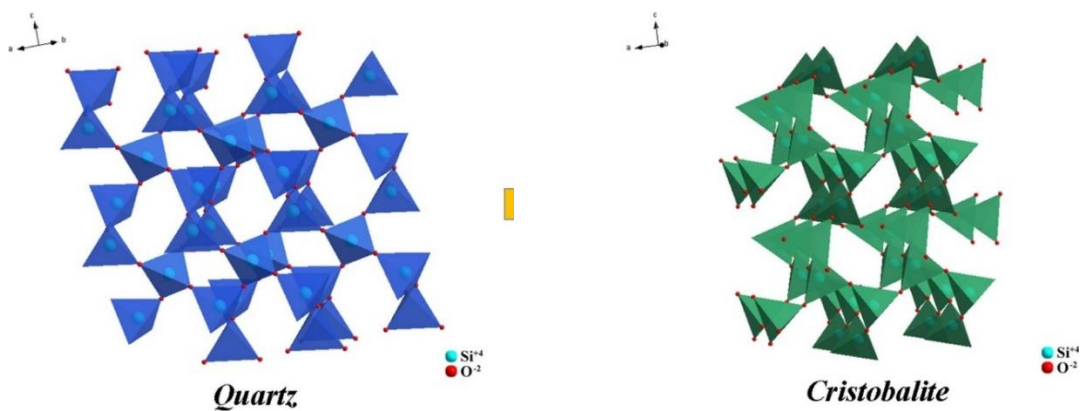
4.1.2.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่มาจากกากไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟของกากไดอะตอมไมต์ พบว่ามีพีคของผลึกโครงสร้างคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.83° , 31.37° และ 36.17° และผลึกโครงสร้างควอตซ์ (Quartz) ที่มุม 2θ เท่ากับ 20.87° , 26.63° และ 50.13° ซึ่งผลึกทั้งสองเกิดจากสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่จัดเรียงกันเป็นผลึกอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องดังรูปที่ 4.3 จากกราฟแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกคริสโตบาไลท์ที่มากกว่าโครงสร้างผลึกควอตซ์ในกากไดอะตอมไมต์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแตกต่างจากไดอะตอมไมต์ดิบ (Raw Diatomite) จากเหมืองในจังหวัดลำปางและจากแหล่งอื่น ๆ พบว่ามีโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่เป็นควอตซ์เนื่องมาจากในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มจำเป็นต้องใช้ไดอะตอมไมต์สำหรับอาหาร (Food Grade Diatomite) มาใช้ในกระบวนการกรอง โดยการนำไดอะตอมไมต์ดิบที่ได้จากเหมืองไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (Calcination) ร่วมกับฟลักซ์ (Flux) เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Martinovic et al., 2006) เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้ไดอะตอมไมต์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาเพิ่มสูงมากขึ้น และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Water Permeability) (Ediz et al., 2010) ซึ่งในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงซิลิกอนไดออกไซด์จะมีการจัดเรียงตัวของผลึกใหม่จากผลึกควอตซ์เปลี่ยนเป็นผลึกคริสโตบาไลท์ โดยจากการศึกษาก่อนหน้าพบว่าไดอะตอมไมต์จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากควอตซ์เป็นคริสโตบาไลท์ ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และเมื่อใส่ฟลักซ์ที่เป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงที่ 800 องศาเซลเซียส (Zheng et al., 2018) จึงทำให้ตัวกรองไดอะตอมไมต์ (Diatomite Filter Aid) และกากไดอะตอมไมต์ที่ใช้สำหรับเป็นตัวกรองเครื่องดื่มปรากฏพีคของผลึกคริสโตบาไลท์



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของตัวดูดซับที่มาจากกากไดอะตอมไมต์

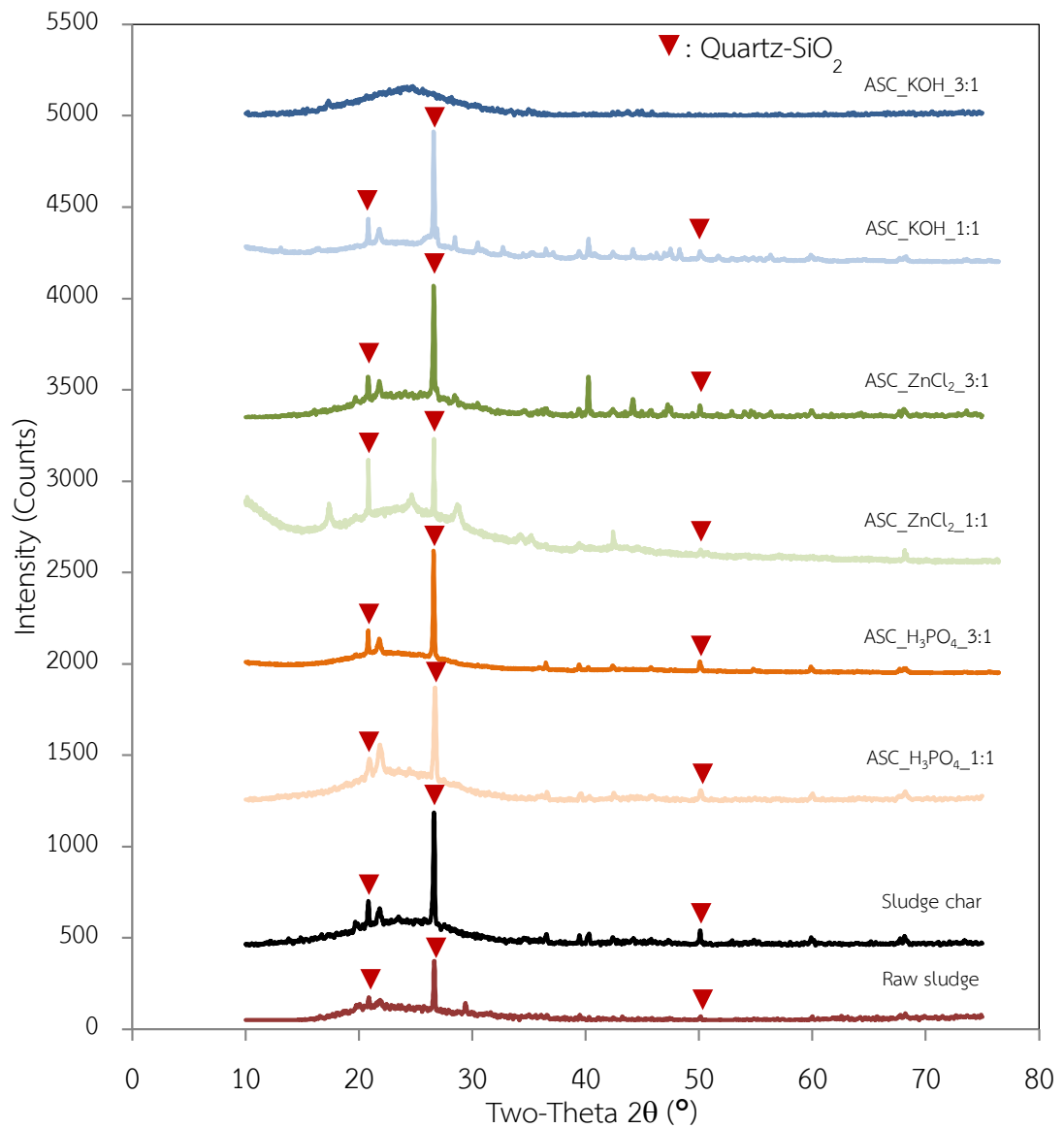
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกควอตซ์ (ซ้าย) และผลึกคริสโตบาไลท์ (ขวา) (Yang et al., 2016)

4.1.2.2 ตัวดูดซับจากสไลด์จ์ (Sludge)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในตัวดูดซับที่มาจากสไลด์จ์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการปรากฏพีคของโครงสร้างผลึกควอตซ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 20.87° , 26.63° และ 50.13° ในตัวดูดซับจากสไลด์จ์ดิบ (Raw Sludge) ซึ่งเป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ที่พบมากบนพื้นผิวโลกและเป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าในตัวดูดซับจากสไลด์จ์เมื่อนำสไลด์จ์แห้งไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ตัวดูดซับถ่านสไลด์จ์ (Sludge Char) รวมถึงตัวดูดซับถ่านสไลด์จ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้แก่ $ASC_H_3PO_4\ 1:1$, $ASC_H_3PO_4\ 3:1$, $ASC_ZnCl_2\ 1:1$, $ASC_ZnCl_2\ 3:1$ และ $ASC_KOH\ 1:1$ พบว่ายังคงปรากฏพีคของควอตซ์เหมือนกับในตัวดูดซับสไลด์จ์แตกต่างกันตรงที่ความสูงของพีคที่เพิ่มสูงกว่าตัวดูดซับสไลด์จ์แห้งเนื่องจากความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน การกระตุ้นด้วยความร้อน นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่มีลักษณะฐานกว้างและความสูงต่ำที่มุม 2θ เท่ากับ $16-34^\circ$ ซึ่งเป็นลักษณะของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอน เป็นโครงสร้างของชั้นเครือข่ายอะโรมาติกคาร์บอน (Aromatic network) แบบสุ่มทำให้ไม่มีความสมบูรณ์ของผลึก และหากพิจารณาตัวดูดซับ $ASC_KOH\ 3:1$ กลับไม่ปรากฏพีคของควอตซ์ มีเพียงแต่พีคของคาร์บอนอสัณฐาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านสไลด์จ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะเปลี่ยนซิลิกอนที่อยู่ในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบซิลิกอนที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งบางส่วนจะถูกกำจัดออกภายหลังด้วยกระบวนการล้างด้วยกรด และบางส่วนจะกลายเป็นซิลิกอนที่ไร้ผลึก จึงทำให้พีคของควอตซ์หายไป (Buasri et al., 2012)



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของตัวดูดซับที่มาจากสลัดจ์

4.1.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ

4.1.3.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste)

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ แสดงดังรูปที่ 4.5 ลักษณะกราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3446 cm^{-1} แสดงถึง

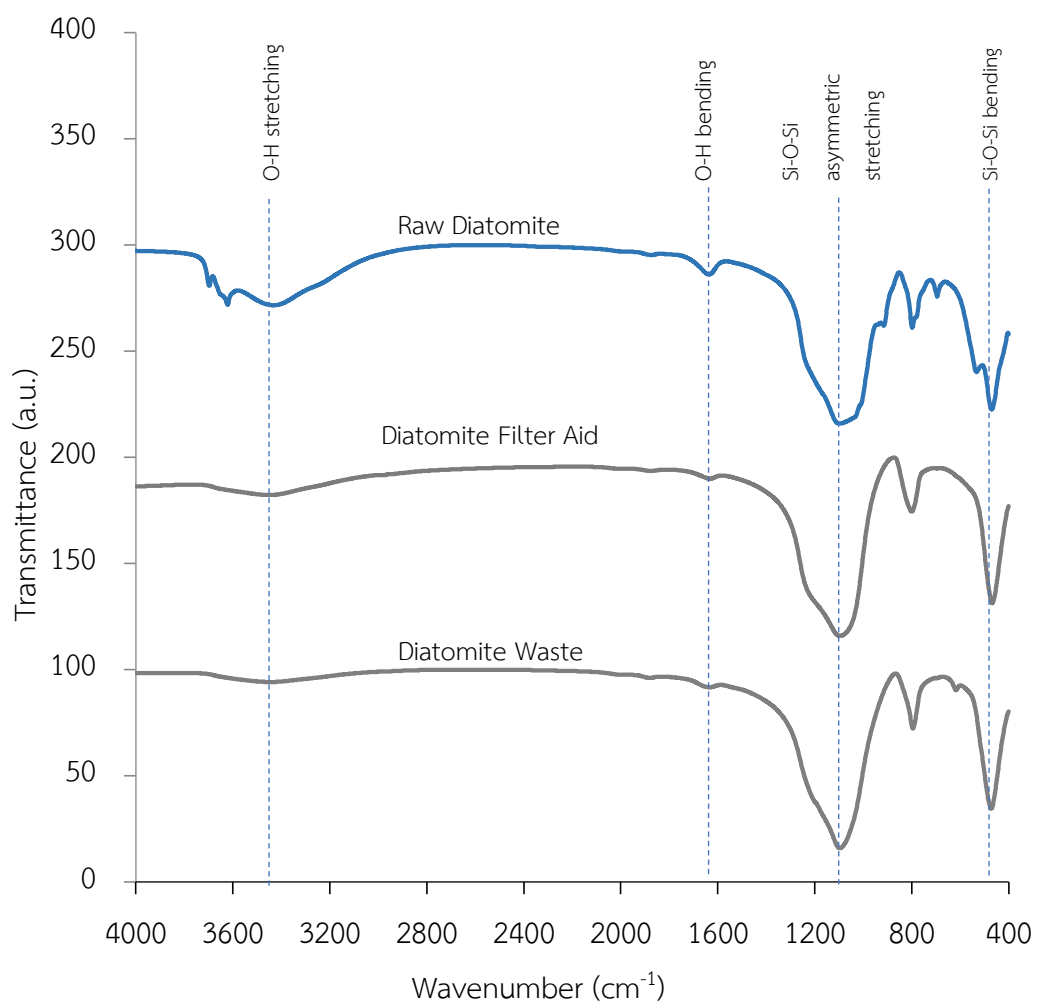
การยืดของพันธะไฮโดรเจนซิลานอล (H-Bonded Silanols; Si-OH) (O-H Stretching) ในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล ช่วงคลื่น 1632 cm^{-1} แสดงถึงการงอของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล (O-H Bending) ที่ช่วงคลื่น 1096 795 และ 471 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตร การยืดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ซิลอกเซน (Siloxane) นอกจากนี้ที่ช่วงคลื่น 617.18 cm^{-1} แสดงถึงลักษณะของ Silicon-Oxygen Tetrahedron ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึกคริสโตบาไลต์ เช่นเดียวกับที่พบพิคของผลึกคริสโตบาไลต์ในผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD รูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวตัวกรองไดอะตอมไมต์ ซึ่งเป็นตัวกรองไดอะตอมไมต์สำหรับใช้กรองเครื่องดื่ม ลักษณะกราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันนี้ที่ช่วงคลื่น 3447 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะไฮโดรเจนซิลานอล (H-Bonded Silanols; Si-OH) (O-H Stretching) ในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล ช่วงคลื่น 1631 cm^{-1} แสดงถึงการงอของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล (O-H Bending) ที่ช่วงคลื่น 1095 799 และ 467 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตร การยืดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ซิลอกเซน (Siloxane) นอกจากนี้ที่ช่วงคลื่น 615.18 cm^{-1} แสดงถึงลักษณะของ Silicon-oxygen tetrahedron ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึกคริสโตบาไลต์ เช่นเดียวกับที่พบพิคของผลึกคริสโตบาไลต์ในผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้งตัวกรองไดอะตอมไมต์และกากไดอะตอมไมต์มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่เหมือนกันแสดงให้เห็นว่ากระบวนการกรองเครื่องดื่มด้วยไดอะตอมไมต์ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไดอะตอมไมต์แต่อย่างไร

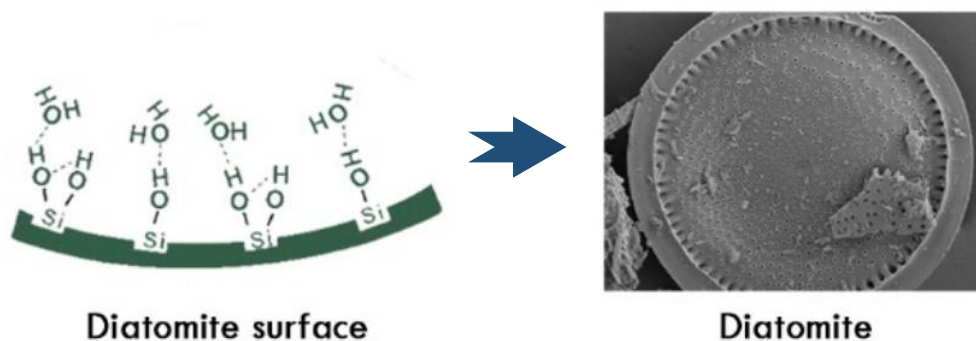
หากเปรียบเทียบกับไดอะตอมไมต์ดิบ ซึ่งได้จากเหมืองมีลักษณะกราฟดังนี้ ที่ช่วงคลื่น $3434\text{--}3698\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏจำนวน 3 พิค แสดงถึงการยืดของพันธะไฮโดรเจนซิลานอล (H-Bonded Silanol; Si-OH) (O-H Stretching) ในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล ช่วงคลื่น 1636 cm^{-1} แสดงถึงการงอของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟังก์ไฮดรอกซิล (O-H Bending) ที่ช่วงคลื่น 1097, 797 และ 469 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตร การยืดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ซิลอกเซน (Siloxane) นอกจากนี้ที่ช่วงคลื่น 695 และ 533 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ Al ในหมู่ฟังก์ Si-O-Al ซึ่งเป็นโครงสร้าง Octahedral Co-Ordination และไม่ปรากฏช่วงคลื่นที่เป็นลักษณะของ Silicon-Oxygen Tetrahedron ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึกคริสโตบาไลต์ ซึ่งแตกต่างกับตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ และตัวกรองไดอะตอมไมต์ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากากไดอะตอมไมต์และตัวกรองไดอะตอมไมต์นั้นได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร และทั้งกาก

ไดอะตอมไมต์ตัวกรองไดอะตอมไมต์และไดอะตอมไมต์ดิบนั้นมีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นซิลีนอล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลต่อกับซิลิกอน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่บนตัวดูดทั้ง 3 ชนิดมี หมู่ฟังก์ชันซิลีนอล และหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซนเป็นหมู่ฟังก์ชันหลัก (รูปที่ 4.6) อันเนื่องมาจากองค์ประกอบหลักของไดอะตอมไมต์เป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ โดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะส่งผลต่อสภาพผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแต่ละชนิด



รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์



รูปที่ 4.6 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิวไดอะตอมไมต์

4.1.3.2 ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge)

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากสลัดจ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ แสดงดังรูปที่ 4.7 ลักษณะกราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) ดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3402 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H Stretching) และหมู่ฟังก์ชันเอมีน (N-H stretching) ช่วงคลื่น 2927 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะภายในหมู่ฟังก์ชันแอลคิล (C-H Stretching) (Ros et al., 2006) ช่วงคลื่น 1654 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และคาร์บอนิล (C=O stretching) ช่วงคลื่น 1548 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C stretching) ช่วงคลื่น 1406 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C-C stretching) (ElShafei et al., 2017) ช่วงคลื่น 1036 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอสเตอร์ อีเทอร์ และแอลกอฮอล์ (C-O stretching) (Wong et al., 2017) จากหมู่ฟังก์ชันข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ นั้นประกอบไปด้วยสารชีวโมเลกุลหลากหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) จากการมีอยู่ของแอลกอฮอล์ (Alcohol) จากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คีโตน (Ketone) และอัลดีไฮด์ (Aldehyde) จากหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl) โปรตีนจากการมีหมู่ฟังก์ชันเอมีน (Amine) และคาร์บอกซิล (Carboxyl) ลิพิด (Lipid) จากการมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและหมู่เอคิล (Alyl) ที่เป็นส่วนประกอบของสายแอลิแฟติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) ในลิพิด นอกจากสารชีวโมเลกุลแล้วสลัดจ์ยังมีองค์ประกอบจากสารประกอบอินทรีย์อีกหลากหลายชนิดเช่นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติก และสารประกอบออกซิเจน (Oxygenated Compound) เป็นต้น เนื่องจากสลัดจ์เกิดจากแบคทีเรีย

ที่เพิ่มจำนวนขึ้นจากสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำเสีย รวมไปถึงสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ทำให้สลัดจ์มีองค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลและสารอินทรีย์ดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นสารออร์กาโนซิลิกอน (Organosilicon) ที่ช่วงคลื่น 1083, 798 และ 470 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) เนื่องจากองค์ของธาตุซิลิกอนที่มีอยู่มากในสลัดจ์ (Ren et al., 2014)

เมื่อนำสลัดจ์ดิบไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ (Sludge Char) ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้มีความแตกต่างกับตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ ในเรื่องของความสูงของพีค (Peak Intensities) ที่ลดลงในทุกหมู่ฟังก์ชัน แสดงให้เห็นถึงการลดลงของหมู่ฟังก์ชันอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างการคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้น เช่น Aromatization Ketonization Dehydration และ Decarboxylation ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Devitalization) และการสร้างถ่าน (Char Formation) ซึ่งจะทำให้คาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นร่างแหของวงอะโรมาติกคาร์บอน ซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของหมู่ฟังก์ชันโดยรวม และเมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชัน จากกราฟในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าถ่านสลัดจ์ (Sludge Char) มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 2976 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะภายในหมู่ฟังก์ชันแอลคิล (C-H Stretching) ช่วงคลื่น 1544 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C Stretching) ที่ช่วงคลื่น 1114 – 1211 แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอสเตอร์ อีเทอร์ และแอลกอฮอล์ (C-O Stretching) ที่ช่วงคลื่น 1080, 798 และ 467 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) ซึ่งยังคงอยู่แม้จะผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง

กระตุ้นถ่านสลัดจ์ด้วยกรดฟอสฟอริก

เมื่อกระตุ้นถ่านสลัดจ์ด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 1:1 พบว่าตัวดูดซับ ASC_H₃PO₄_1:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3383 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่ช่วงคลื่น 2977 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะภายในหมู่ฟังก์ชันแอลคิล (C-H stretching) ช่วงคลื่น 1569 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C stretching) ช่วงคลื่น 1050 – 1211 แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอสเตอร์ อีเทอร์

และแอลกอฮอล์ (C-O stretching) ที่ช่วงคลื่น 1083, 797 และ 463 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดฟอสฟอริกที่ใช้กระตุ้นเป็นอัตราส่วน 3:1 พบว่าตัวดูดซับ ASC_H₃PO₄_1:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ช่วงคลื่น 3340 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H Stretching) ช่วงคลื่น 1575 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C Stretching) ที่ช่วงคลื่น 1083, 797 และ 463 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าลักษณะกราฟของตัวดูดซับ ASC_H₃PO₄_1:1 และ ASC_H₃PO₄_3:1 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

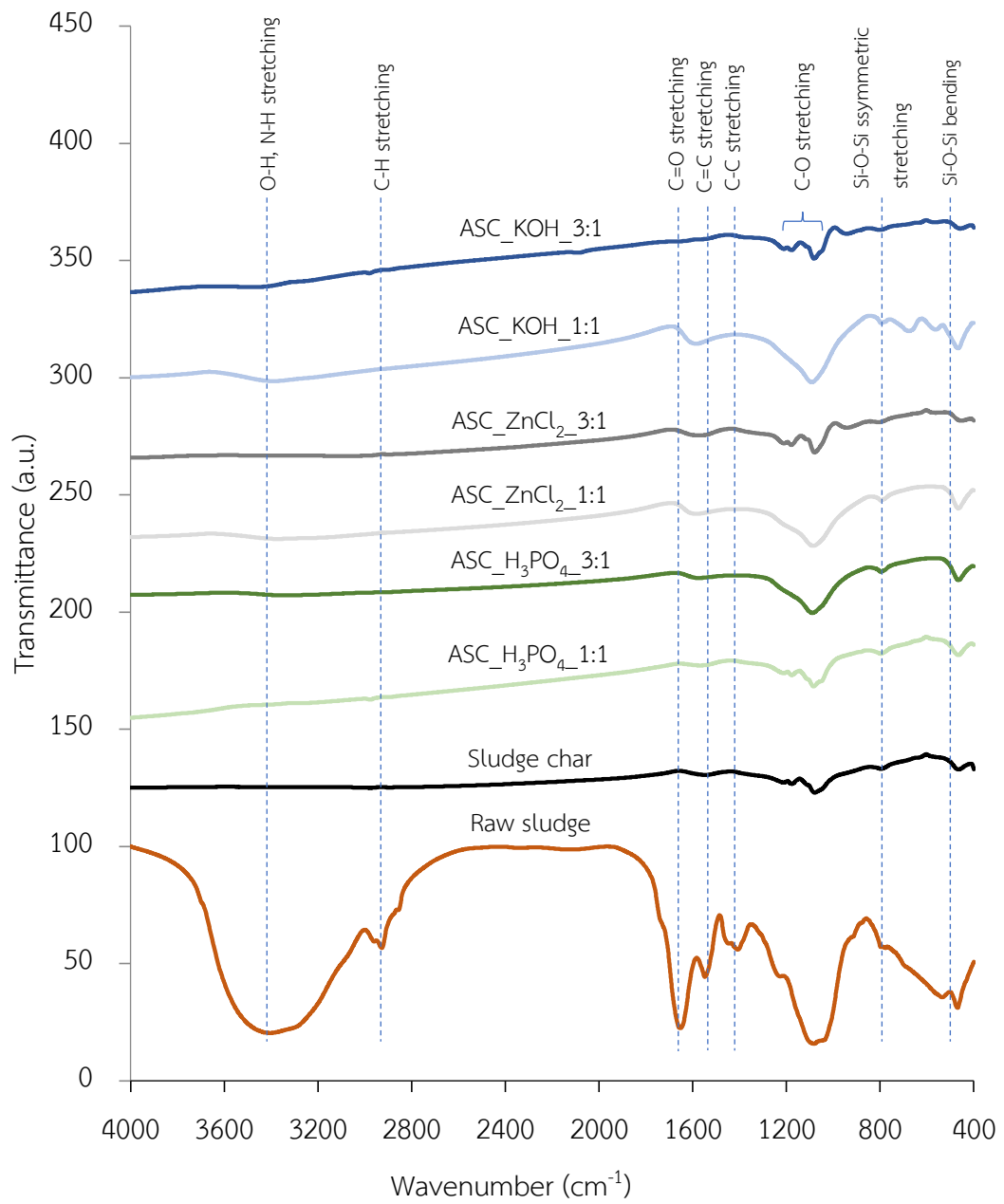
กระตุ้นถ่านสั้ดจ้ด้วยซิงค์คลอไรด์

เมื่อกระตุ้นถ่านสั้ดจ้ด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:1 พบว่าตัวดูดซับ ASC_ZnCl₂_1:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3367 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H Stretching) ช่วงคลื่น 1586 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C Stretching) ช่วงคลื่น 1398 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C-C Stretching) ช่วงคลื่น 1083, 797 และ 463 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) และเมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์คลอไรด์ที่ใช้กระตุ้นเป็น 3:1 พบว่า ตัวดูดซับ ASC_ZnCl₂_3:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3356 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H Stretching) ที่ช่วงคลื่น 2835 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะภายในหมู่ฟังก์ชันแอลคิล (C-H Stretching) ที่ช่วงคลื่น 1575 cm^{-1} แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C Stretching) บริเวณช่วงคลื่น 1080 – 1210 แสดงถึงการยึดของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอสเทอร์ อีเทอร์ และแอลกอฮอล์ (C-O Stretching) ช่วงคลื่น 1080, 807 และ 450 cm^{-1} แสดงถึงการยึดแบบไม่สมมาตร การยึดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane)

กระตุ้นถ่านสัลดจ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

เมื่อกระตุ้นถ่านสัลดจ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 พบว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_1:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 1091 795 และ 467 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตร การยืดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane) และเมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กระตุ้นเป็น 3:1 พบว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันดังนี้ ที่ช่วงคลื่น 3483 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H Stretching) ที่ช่วงคลื่น 2980 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะภายในหมู่ฟังก์ชันแอลคิล (C-H Stretching) ช่วงคลื่น 1543 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C Stretching) บริเวณช่วงคลื่น 1047 – 1210 แสดงถึงการยืดของพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอสเตอร์ อีเทอร์ และแอลกอฮอล์ (C-O Stretching) ช่วงคลื่น 1082, 805 และ 458 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตร การยืดแบบสมมาตร และการงอของพันธะ Si-O-Si ในหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Siloxane)

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟของตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นโดยสารเคมี ได้แก่ กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะกราฟคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยในบางบริเวณช่วงคลื่น และมีความคล้ายคลึงกับลักษณะกราฟของตัวดูดซับถ่านสัลดจ์ (Sludge char) โดยจะสังเกตได้ว่าหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่ที่พบนั้นมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygen-Containing Functional Groups) อันเนื่องมาจากอัตราส่วน O/C ที่สูง แสดงถึงองค์ประกอบออกซิเจนที่มีปริมาณมาก ในสัลดจ์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการทำตัวดูดซับ และเมื่อถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จึงยังคงมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะส่งผลต่อสภาพขั้วบนพื้นผิวตัวดูดซับ



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับจากสไลด์จ์

4.1.4 ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

4.1.4.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste)

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของกากไดอะตอมไมต์ซึ่งเป็นกากที่ของเสียที่ได้จากกระบวนการกรองเครื่องดื่ม ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิวเพียง 1.12 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 1.805 ลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2,265 นาโนเมตร แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจัดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ซึ่งแตกต่างจากไดอะตอมไมต์ (Raw diatomite) ที่มาจากเหมืองในจังหวัดลำปาง รวมถึงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิว 28.23 ตารางเมตร และ 28 ตารางเมตรตามลำดับ (Du et al., 2018) ซึ่งมากกว่ากากไดอะตอมไมต์ถึง 8 เท่า อีกทั้งขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอันเนื่องมาจากกระบวนการให้ความร้อนแก่ไดอะตอมไมต์ที่อุณหภูมิสูง (Calcination) ร่วมกับฟลักซ์ (Flux) เพื่อให้ได้ไดอะตอมไมต์ที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกา กำจัดสิ่งปนเปื้อน และเพิ่มการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการแพทย์ ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนเกิดความเสียหายและพื้นที่ผิวลดลง (Ediz et al., 2010)

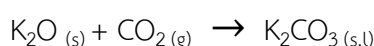
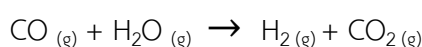
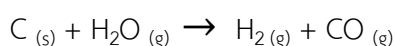
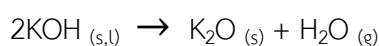
4.1.4.2 ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge)

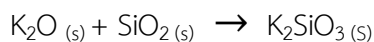
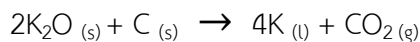
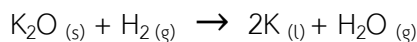
จากการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับที่มาจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์จากอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2 สลัดจ์แห้ง (Raw Sludge) มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำเพียง 12.46 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.0461 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม หลังจากนั้นนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Activation) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านสลัดจ์ (Sludge char) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 276.5 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3129 ลูกบาศก์ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่มีการสลายตัวของสารอินทรีย์ในสลัดจ์ ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน โดยผ่านปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ดีไฮเดรชัน (Dehydration) และดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) เปลี่ยนคาร์บอนบางส่วนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และก่อให้เกิดโครงสร้างของอะโรมาติกคาร์บอนซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มมากขึ้น (Chanaka Udayanga et al., 2019) (Smith et al., 2009)

เมื่อถ่านสัลดจ์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation) ด้วยสารเคมี ทั้ง 3 ชนิดได้แก่ H_3PO_4 (กรดฟอสฟอริก) $ZnCl_2$ (ซิงค์คลอไรด์) และ KOH (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ที่อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างสารเคมีกระตุ้นและถ่านสัลดจ์ 3:1 และ 1:1 ทำให้ถ่านสัลดจ์ที่ได้มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่มากกว่าถ่านสัลดจ์ที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสัลดจ์พบว่า ที่อัตราส่วน 3:1 จะทำให้ถ่านสัลดจ์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าอัตราส่วน 1:1 ของทุกสารเคมีกระตุ้นที่ใช้กระตุ้น

ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สารเคมีกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำให้ตัวดูดซับมีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด 2,565 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.577 ลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ รองลงมาคือซิงค์คลอไรด์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน 1,180 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.9576 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับ และสารเคมีกระตุ้นที่ทำให้ตัวดูดซับถ่านสัลดจ์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำสุด คือ กรดฟอสฟอริกที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน 501.4 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.4488 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีกระตุ้นที่ทำให้ตัวดูดซับถ่านสัลดจ์จากอุตสาหกรรมเครื่องตีมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากที่สุด ซึ่งเพิ่มขึ้น 205 เท่าเมื่อเทียบกับสัลดจ์แห้ง และมีขนาดมากกว่าตัวดูดซับถ่านสัลดจ์จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แก่ ถ่านสัลดจ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟิวริก และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีพื้นที่ผิว 346.49, 221.52 และ 156 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (Zou et al., 2013) (Wong et al., 2018) (Silva et al., 2016) โดยทั่วไปมีอยู่ของเถ้าซึ่งเป็นสารอนินทรีย์อยู่ภายในวัสดุดิบ เช่นเดียวกับสัลดจ์ในงานวิจัยนี้ที่มีปริมาณซิลิกาไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูง เมื่อนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้น จะเกิดการขัดขวางการสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่ต่ำ แต่จากผลการทดลองการกระตุ้นถ่านสัลดจ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กลับทำให้พื้นที่ผิวของถ่านสัลดจ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นผลมาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนและซิลิกาไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของสัลดจ์ ดังสมการ





ระหว่างการกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแทรกซึมของโพแทสเซียมออกไซด์ระหว่างธาตุคาร์บอนเกิดสารประกอบ Intercalation ระหว่างคาร์บอนและโพแทสเซียมออกไซด์ รวมถึงทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์เกิดเป็นสารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกตซึ่งบางส่วนจะถูกกำจัดภายหลังจากการล้างด้วยกรด และบางส่วนจะมีลักษณะไร้ผลึก ทำให้เกิดรูพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นดังจะเห็นได้จากหายไปของพีคควอตซ์ในตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นโลหะโพแทสเซียมแทรกซึมระหว่างชั้นคาร์บอน (Carbonaceous Layers) เกิดการกัดกร่อนคาร์บอนบางส่วนให้กลายเป็นปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงปลดปล่อยไอน้ำ เกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว (Hwang et al., 2008) (Xu et al., 2015) ซึ่งแตกต่างจากกลไกการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์อย่างซิลิกาไดออกไซด์ทำให้อ่านสล็อตซ์ที่ได้มีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวต่ำกว่าอ่านสล็อตซ์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยกลไกการกระตุ้นเกิดจากซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกทำหน้าที่เป็น Dehydrating Agent (Wang et al., 2011) ในระหว่างการกระตุ้นจะแทรกซึมไประหว่างชั้นคาร์บอนภายใน (Carbon matrix) ที่อุณหภูมิสูงก่อให้เกิดปฏิกิริยา Dehydration Depolymerization และ Aromatization โดยการเปลี่ยนสารประกอบอะลิฟาติกให้เป็นสารประกอบอะโรมาติก ก่อให้เกิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น (Lin et al., 2012) โดยมีรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ระบุว่ากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะเพิ่มพื้นที่ผิวได้มากกว่าการกระตุ้นกรดฟอสฟอริก (Wang et al., 2011)

นอกจากนี้หากพิจารณาขนาดรูพรุนเฉลี่ยพบว่ารูพรุนของสล็อตซ์แห้ง เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และเมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระตุ้นด้วยความร้อนจะเพิ่มขนาดรูพรุนเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีขนาดของรูพรุนจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารเคมี และอัตราส่วนระหว่างสารเคมีกระตุ้นต่อสล็อตซ์ 3:1 จะให้ขนาดรูพรุนที่น้อยกว่าอัตราส่วน 1:1 ของทุกสารเคมีกระตุ้น ซึ่งทั้งหมดเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) โดยเรียงลำดับสารเคมีที่ทำให้ขนาดรูพรุนมีค่าน้อยไปมากดังนี้ $\text{KOH} < \text{ZnCl}_2 < \text{H}_3\text{PO}_4$ ซึ่งขนาดของรูพรุนนั้นขึ้นอยู่กับกลไกของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น และจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกดูดซับกับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

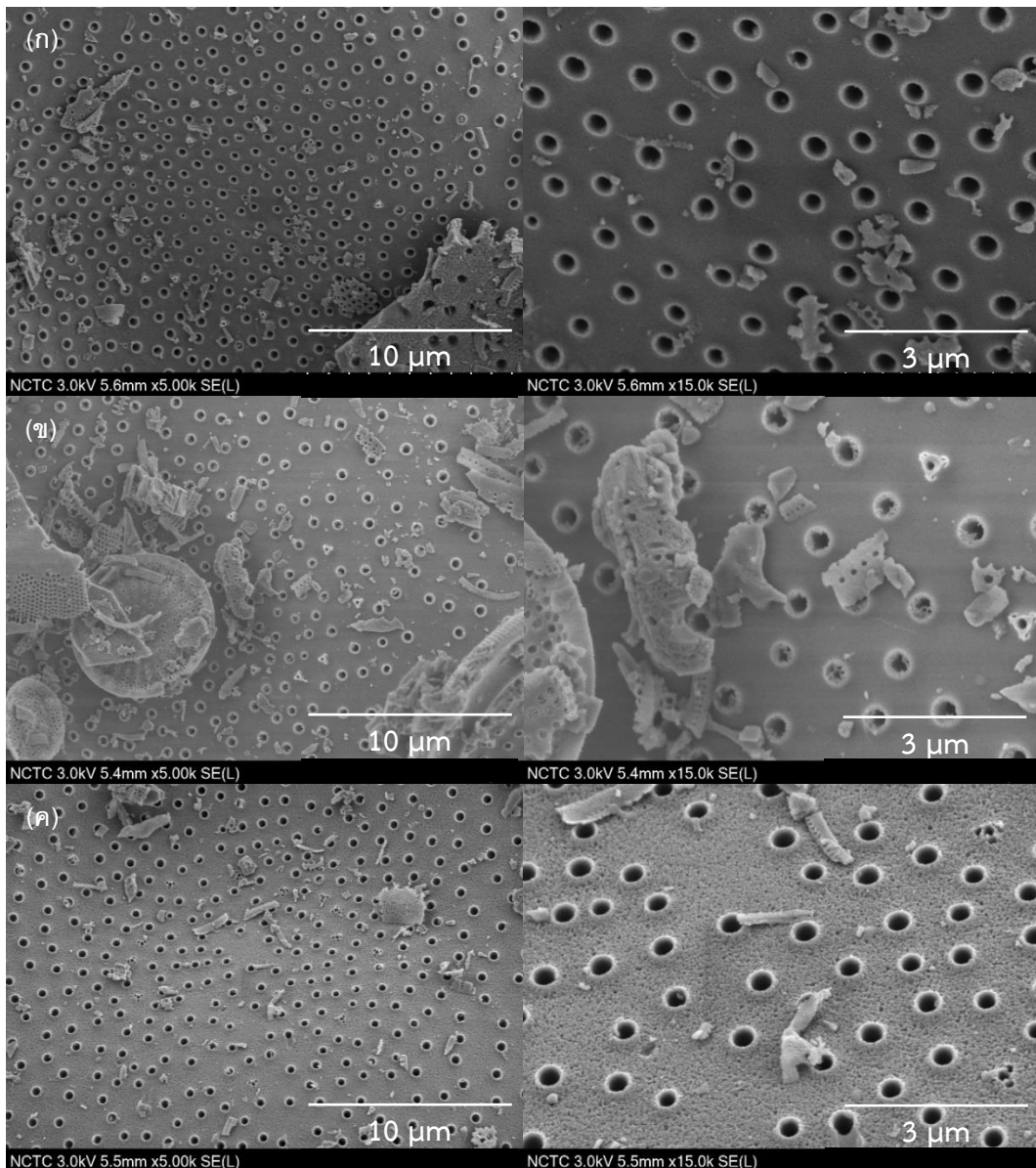
ตารางที่ 4.2 ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	S_{BET} ($m^2 \cdot g^{-1}$)	D_p (nm)	V_{Total} ($cm^3 \cdot g^{-1}$)
Raw sludge	12.46	1.479	0.0461
Sludge Char	276.5	4.527	0.3129
ASC_H ₃ PO ₄ _1:1	290	4.987	0.3615
ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	501.4	3.581	0.4488
ASC_ZnCl ₂ _1:1	715	3.615	0.6463
ASC_ZnCl ₂ _3:1	1180	3.246	0.9576
ASC_KOH_1:1	1001	3.490	0.8736
ASC_KOH_3:1	2565	2.460	1.577
Diatomite Waste	3.188	2265	1.805
Commercial Diatomite	28.23	8.8973	0.0628

4.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ

4.1.5.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste)

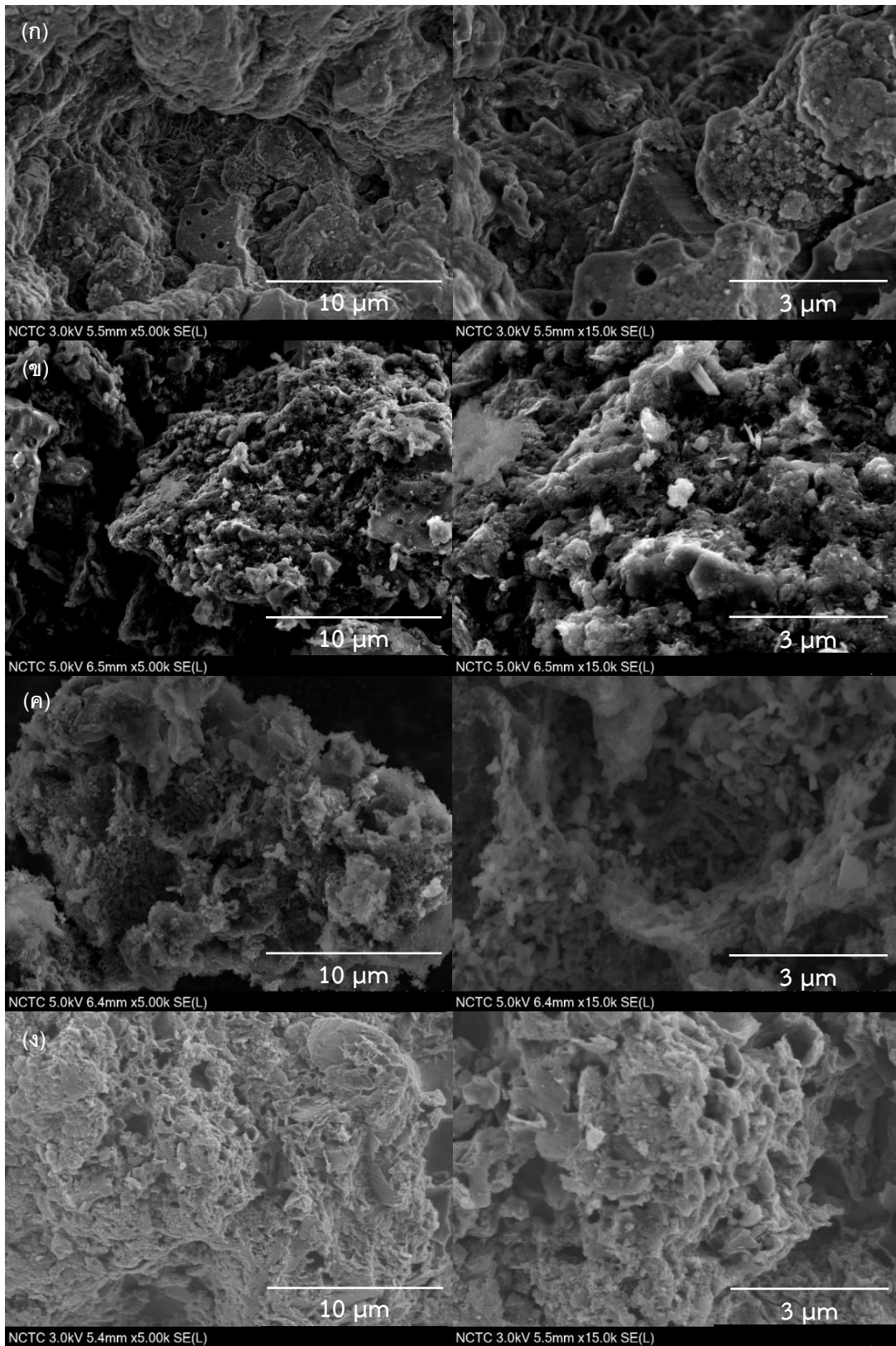
ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า (ซ้าย) และ 15000 เท่า (ขวา) แสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ถึงลักษณะโครงสร้างของไดอะตอมไมต์แต่ละชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นลักษณะของผนังที่มีรูพรุนที่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบอยู่ในโครงสร้างที่คล้ายเหรียญของไดอะตอมไมต์ที่เป็นเปลือกของสาหร่ายในกลุ่มไดอะตอม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของผนังของกากไดอะตอมไมต์ และตัวกรองไดอะตอมไมต์ (รูปที่ 4.8 (ก) และ 4.8 (ข)) จะพบลักษณะพื้นผิวของผนังที่เรียบแตกต่างกับพื้นผิวของไดอะตอมไมต์ดิบ (รูปที่ 4.8 (ค)) ที่มีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่บนพื้นผิวของผนัง แสดงให้เห็นว่ากากไดอะตอมไมต์ และตัวกรองไดอะตอมไมต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เป็นไดอะตอมไมต์ที่ใช้สำหรับอาหารที่ได้จากการนำไดอะตอมไมต์ดิบ ไปผ่านกระบวนการความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้พื้นผิวของไดอะตอมไมต์เกิดการหลอมเคลือบรูพรุนบนผนัง สังเกตได้จากพื้นผิวตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ และตัวกรองไดอะตอมไมต์ที่มีลักษณะเรียบมากกว่าไดอะตอมไมต์ดิบ

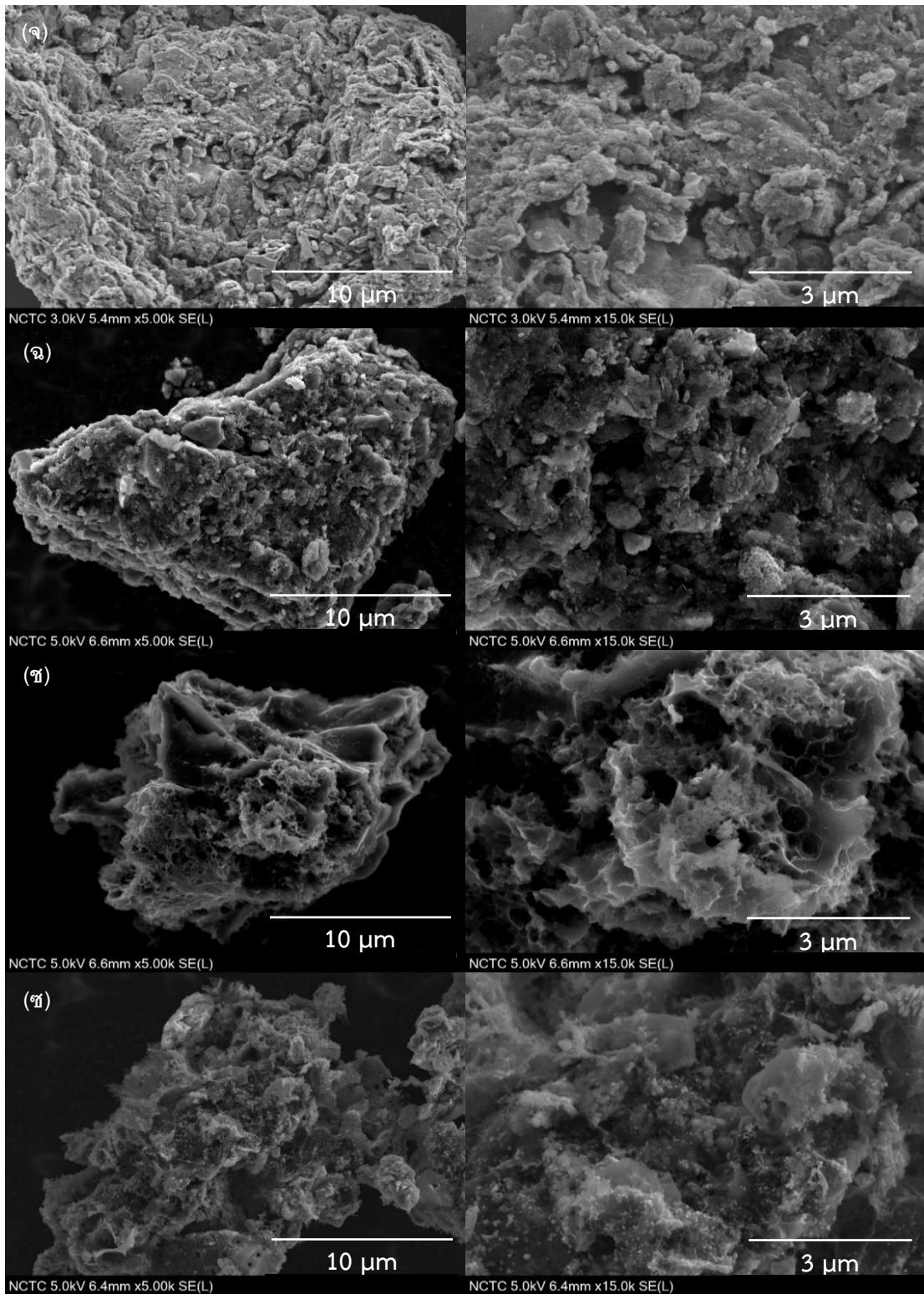


รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (ซ้าย) กำลังขยาย 5000x (ขวา) กำลังขยาย 15000x (ก) ตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ (ข) ตัวกรองไดอะตอมไมต์ (ค) ไดอะตอมไมต์ดิบ

4.1.5.2 ตัวดูดซับจากสลัดจ์ (Sludge)

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับจากสลัดจ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า (ซ้าย) และ 15000 เท่า (ขวา) แสดงดังรูปที่ 4.9 จากภาพจะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระไร้ระเบียบ มีรูพรุนที่สามารถสังเกตได้น้อยเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น นอกจากนี้ยังปรากฏชิ้นส่วนโครงสร้างของไดอะตอมไมต์ที่ใช้ในกระบวนการกรองเครื่องดื่ม (รูปที่ 4.9 (ก)) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้นที่พบว่าองค์ประกอบของสลัดจ์มีสารประกอบซิลิกาไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักของแก้ว โครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของไดอะตอมไมต์ และเมื่อนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และการกระตุ้นด้วยสารเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสลัดจ์ 1:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.9 (ข)-(ง)) พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้จากสารเคมีที่ใช้กระตุ้นแต่ละชนิด ในแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยมีรูพรุนที่สามารถสังเกตเห็นได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ อย่างไรก็ตามยังคงพบโครงสร้างของไดอะตอมไมต์อยู่ในแต่ละตัวดูดซับทำให้ยังคงพบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ในผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนที่ใช้กระตุ้นไม่ได้ทำให้สารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์สลายตัวแต่อย่างใด



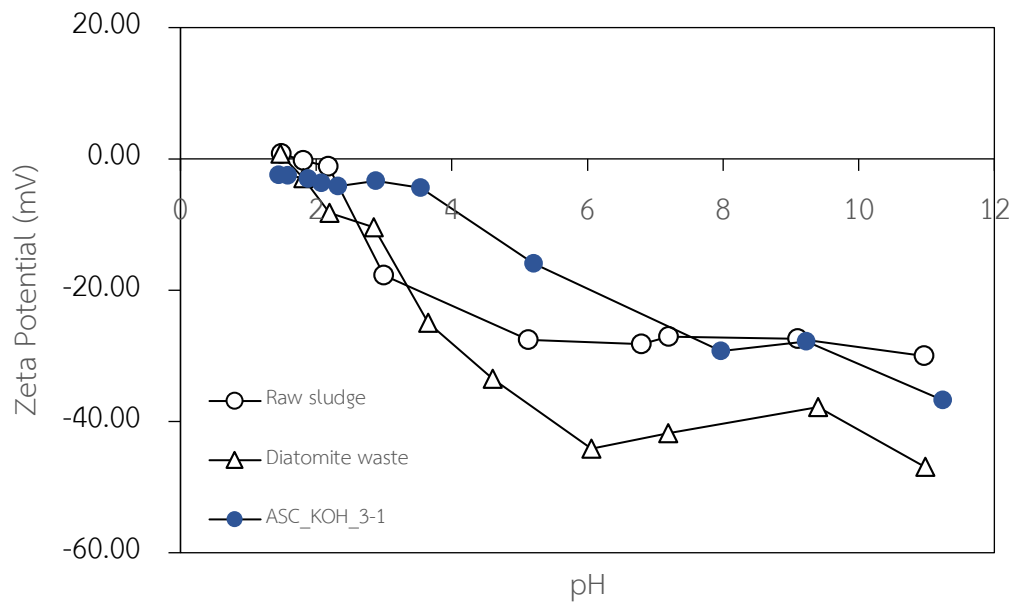


รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับจากสลัดจ์ (ซ้าย) กำลังขยาย 5000x (ขวา) กำลังขยาย 15000x
 (ก) สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) (ข) ถ่านสลัดจ์ (Sludge Char) (ค) ASC_H₃PO₄_1:1 (ง) ASC_H₃PO₄_3:1
 (จ) ASC_ZnCl₂_1:1 (ฉ) ASC_ZnCl₂_3:1 (ช) ASC_KOH_1:1 (ซ) ASC_KOH_3:1

4.1.6 ค่าพีเอชที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์

(pH_{pzc})

ผลการศึกษาค่าพีเอชที่ทำให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีตา (Zeta Potential) กับค่าพีเอช ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดได้แก่ สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge), ถ่านสลัดจ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3:1 (ASC_KOH_3:1) และกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste) แสดงดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ Raw Sludge และ ASC_KOH_3:1 มีค่า pH_{pzc} ที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่า 1.542, 1.738 และ น้อยกว่า 1.42 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ส่งผลให้ที่พีเอชดังกล่าวจะทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า pH_{pzc} จะทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าลบ และเมื่อพีเอชมีค่าน้อยกว่า pH_{pzc} จะทำให้ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นบวก ซึ่งจากการทดสอบการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับแต่ละชนิด ทำให้พีเอชของสารละลายฟีนอลที่ 6.02 ซึ่งให้เห็นถึงประจุรวมบนพื้นผิวของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีค่าเป็นลบ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด การที่ค่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีค่าต่ำอาจเป็นผลมาจากตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ มีโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซิลิกอน เช่น หมู่ฟังก์ชันซิลิเลตซึ่งมีค่า pKa ที่ต่ำ เป็นต้น (Li et al., 2015a) นอกจากนี้ตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ และ ASC_KOH_3:1 มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ส่วนใหญ่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygen-Containing Functional Groups) ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล หมู่ฟังก์ชันซิลิเลต หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบฟอสฟอรัส ที่มีค่า pKa ต่ำ นอกจากนี้การที่ตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีค่า pH_{pzc} ที่ใกล้เคียงกับตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการคาร์บอนไอออน และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH_{pzc}



รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ซีตาของตัวดูดซับสไลด์จ์ดิบ (Raw Sludge), ถ่านสไลด์จ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอก 3:1 (ASC_KOH_3:1) และกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste) ที่พีเอชต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวของตัวซับแต่ละชนิดมีค่าเท่ากับศูนย์ (pH_{pzc})

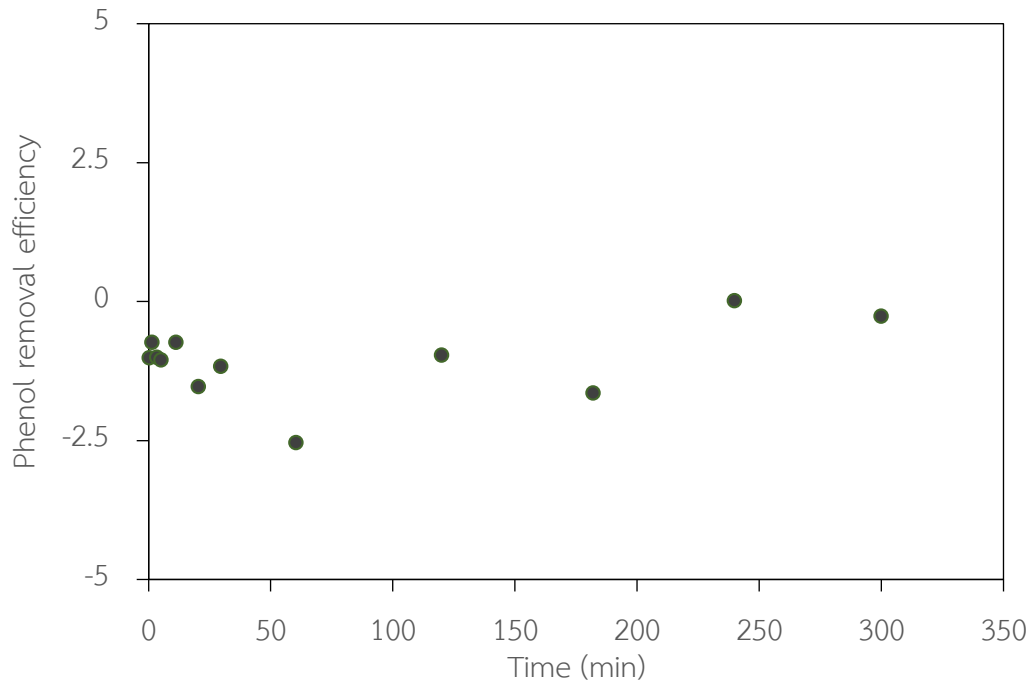
ตัวดูดซับ	pH_{pzc}
กากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste)	1.542
สไลด์จ์ดิบ (Raw Sludge)	1.738
ถ่านสไลด์จ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอก 3:1 (ASC_KOH_3:1)	<1.45

4.2 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์

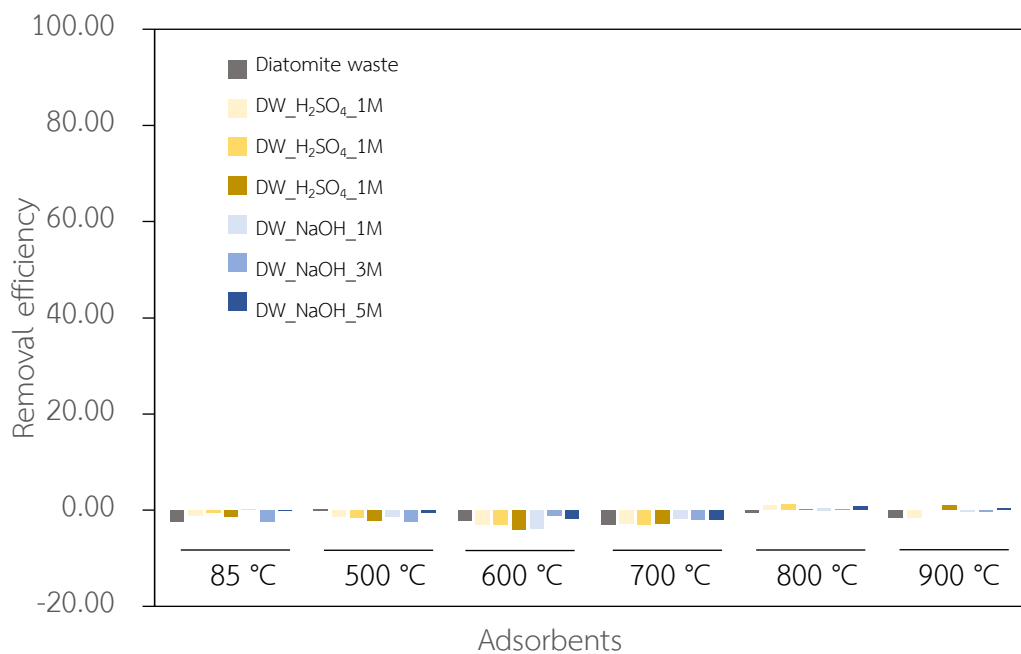
4.2.1 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล

4.2.1.1 ตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite waste)

ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ ทดสอบโดยใช้ตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ และตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 85, 500, 600, 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษแบบทีละเท (Batch Test) ด้วยความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายฟีนอล 50 มิลลิตร น้ำหนักตัวดูดซับ 50 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ จากการทดสอบการดูดซับกากไดอะตอมไมต์ ในช่วงเวลา 0-300 นาที พบว่าตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ ไม่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลดังรูปที่ 4.11 และเมื่อนำกากไดอะตอมไมต์ไปผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 85, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส นำไปทดสอบการดูดซับฟีนอลเป็นเวลา 300 นาทีพบว่าตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการกระตุ้นไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลแต่อย่างใด ดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากกากไดอะตอมไมต์ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงร่วมกับฟลักซ์ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทำให้โครงสร้างรูพรุนของไดอะตอมไมต์ถูกทำลายส่งผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิวของกากไดอะตอมไมต์ที่เหลือพื้นที่ผิวเพียง 3.18 ตารางเมตรต่อกรัม ส่งผลให้ตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ ในระยะเวลา 300 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์



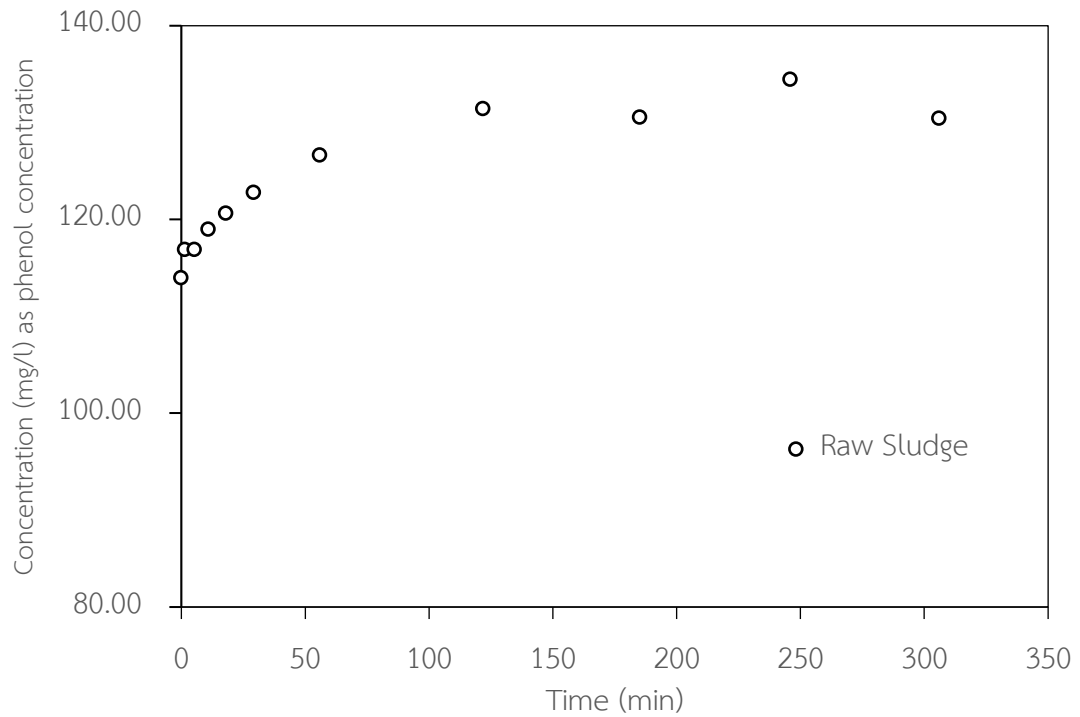
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.1.1 ตัวดูดซับจากกากสลัดจ์ (Sludge)

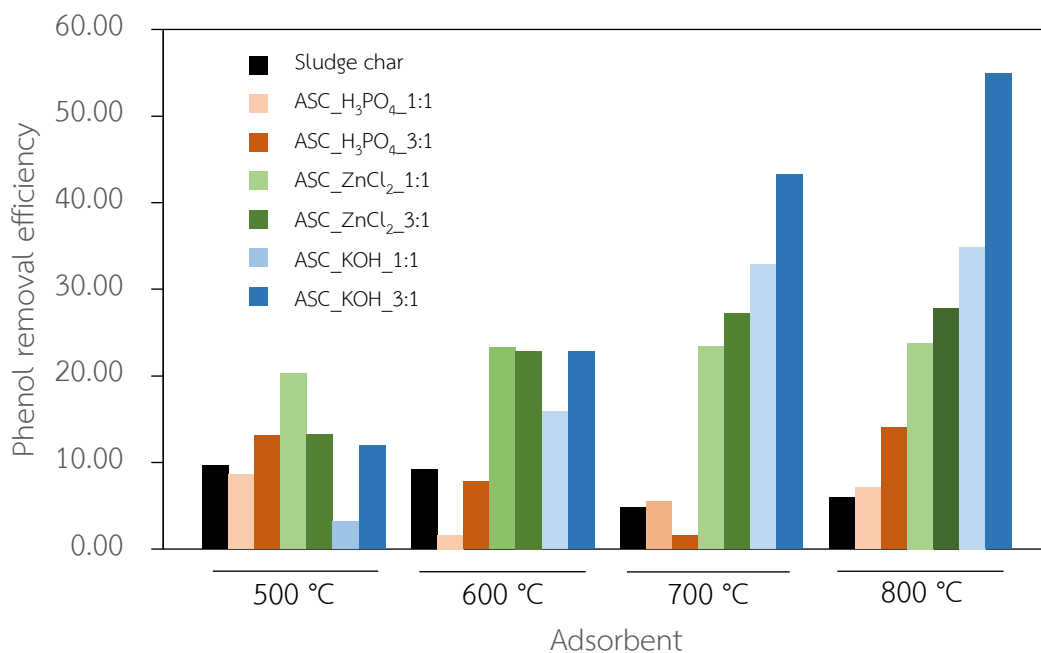
ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากสลัดจ์ ทดสอบโดยใช้ตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) และ ถ่านสลัดจ์ (Sludge Char) ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสลัดจ์ 1:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิกระตุ้น 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาแบบทีละเท (Batch test) ด้วยความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลายฟีนอล 50 มิลลิลิตร น้ำหนักตัวดูดซับ 50 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วย Raw sludge เป็นระยะเวลา 300 นาที ดังรูปที่ 4.13 พบว่า สลัดจ์ดิบ ไม่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอล อีกทั้งยังปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 270 นาโนเมตรออกมา สังเกตได้จากความเข้มข้นเทียบเท่าฟีนอลที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วง 0-56 นาที จะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเทียบเท่าฟีนอลอย่างรวดเร็ว และความเข้มข้นจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 122 นาที จึงจะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับ Raw sludge ไม่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอล แต่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมาปนเปื้อนกับน้ำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำ จึงไม่สามารถใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับโดยตรงได้

รูปที่ 4.14 เมื่อนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และกระตุ้นด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ หลังจากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลเป็นระยะเวลา 300 นาที พบว่าอุณหภูมิกระตุ้นที่ทำให้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้สูงสุด คือ 500 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำถ่านสลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสลัดจ์ 1:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุดในทุกสารเคมีที่ใช้กระตุ้น และอัตราส่วนสารเคมีกระตุ้น 3:1 จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าอัตราส่วน 1:1 และเมื่อพิจารณาชนิดของสารเคมีกระตุ้นพบว่า โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่ทำให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด รองลงมาคือซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกตามลำดับ จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจึงคัดเลือกตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮ

ดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ไปทำการศึกษากลศาสตร์การดูดซับฟีนอล (Phenol Adsorption Kinetic) และไอโซเทอมการดูดซับ (Phenol Adsorption Isotherm) ในการทดลองถัดไป



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับสไลด์ดิบ (Raw Sludge) ในระยะเวลา 300 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์



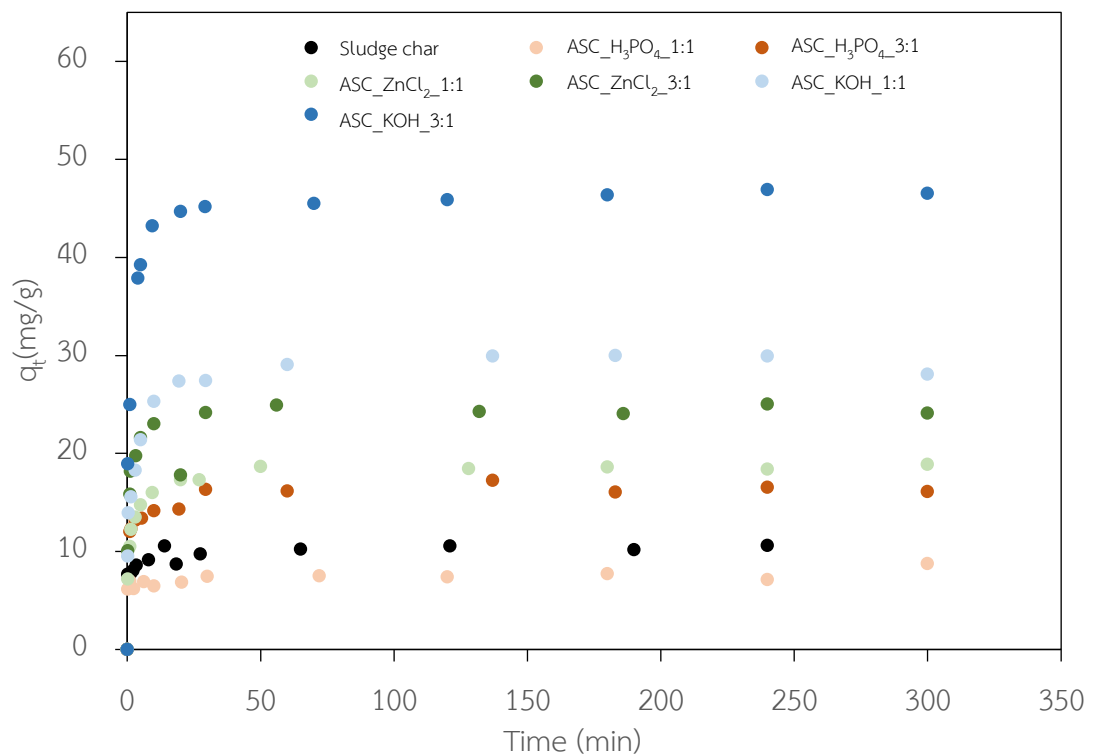
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากถ่านสัลดจ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยอัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสัลดจ์ 1:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.2 จลนศาสตร์การดูดซับฟีนอลด้วยตัวดูดซับจากสัลดจ์

ทำการศึกษากลศาสตร์การดูดซับฟีนอลโดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านสัลดจ์ 7 ชนิดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารเคมี และการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับในแต่ละเวลากับระยะเวลาแสดงดังรูปที่ 5.15 การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับทั้ง 7 ชนิดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มแรกของการทดลองหลังจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สมดุลโดยใช้ระยะเวลาแตกต่างกันไปในแต่ละตัวดูดซับ และเมื่อนำผลการศึกษาดังกล่าวไปคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo First Order Reaction) และปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo Second Order Reaction) เพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.4 จากการวิเคราะห์พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับทั้ง 7 ชนิดเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo Second Order) โดยพิจารณาจากค่า R² ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 และกราฟของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.16

เมื่อพิจารณาค่าครึ่งชีวิต (Half-life; $t_{0.5}$) ในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนพบว่า ตัวดูดซับทั้ง 6 ชนิดได้แก่ Sludge char, ASC_H₃PO₄_3:1, ASC_ZnCl₂_1:1, ASC_ZnCl₂_3:1, ASC_KOH_1:1 และ ASC_KOH_3:1 มีค่าครึ่งชีวิตที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 0.52- 1.28 นาที มีเพียงตัวดูดซับ ASC_H₃PO₄_1:1 ที่มีค่าครึ่งชีวิตสูงถึง 3.34 นาที อย่างไรก็ตามค่าครึ่งชีวิตการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับส่วนใหญ่ในงานวิจัยนี้ยังมีค่าต่ำกว่าตัวดูดซับจากสลัดจ์จากงานวิจัยของ (Zou et al., 2013) ถึง 4 เท่า แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่สภาวะสมดุล (q_e) พบว่าการกระตุ้นถ่านสลัดจ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำให้ตัวดูดซับมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุด รองลงมาคือ ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก ตามลำดับ (KOH>ZnCl₂>H₃PO₄) ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านสลัดจ์ที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี และการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสลัดจ์ 3:1 จะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่า 1:1 ถึง 2, 1.3 และ 1.6 เท่า ของสารเคมีกระตุ้นกรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

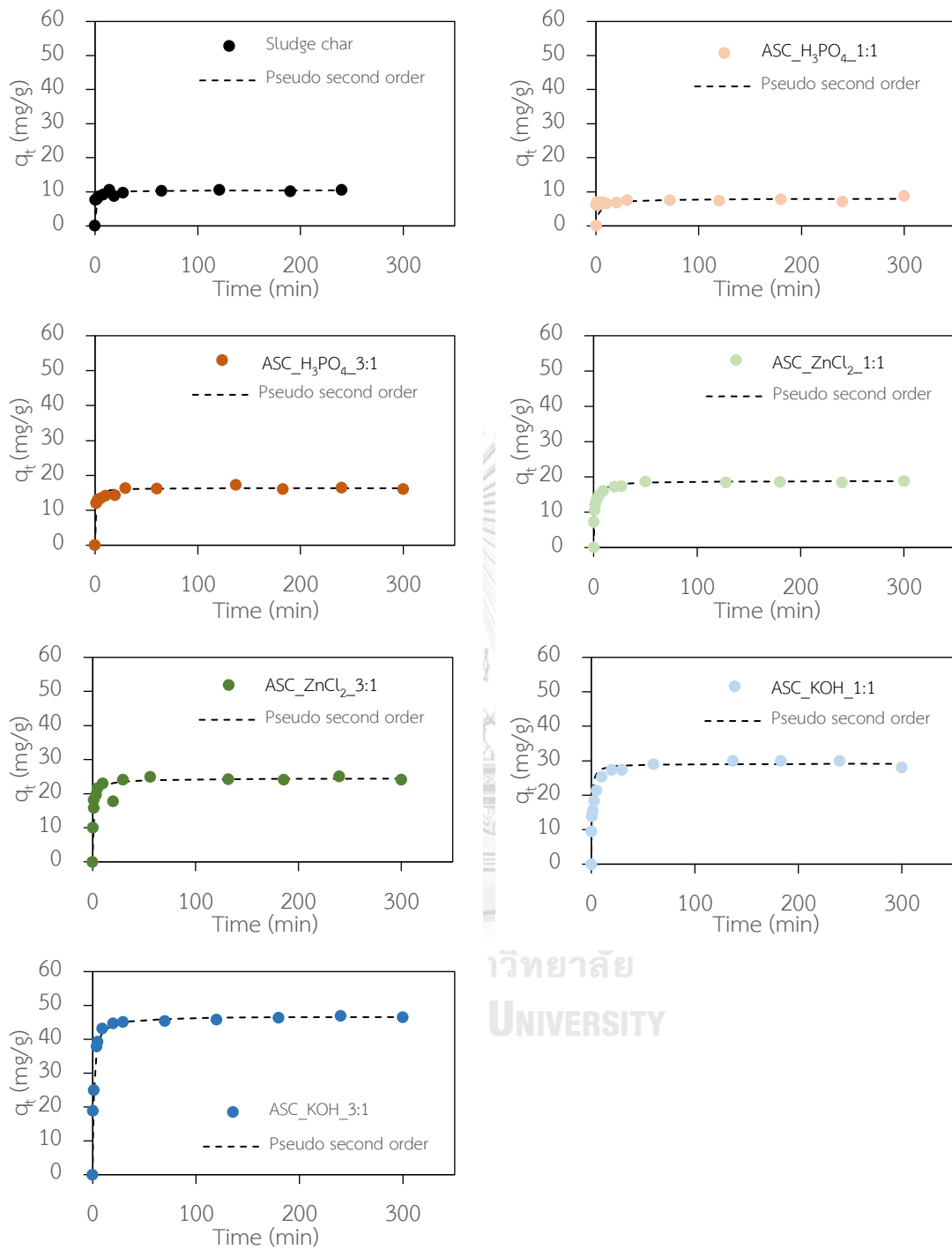


รูปที่ 4.15 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสไลด์จ์

ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน และอันดับสองเสมือน

ตัวดูดซับ	Pseudo first order			Pseudo second order			
	q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	k_1 (min^{-1})	R^2	q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	k_2 ($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	R^2	$t_{0.5}$ (min)
Sludge char	3.16	0.0389	0.7258	10.49	0.0803	0.9994	1.19
ASC_H ₃ PO ₄ _1:1	2.05	0.0044	0.6635	8.04	0.0372	0.9871	3.34
ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	5.41	0.0725	0.47	16.34	0.1182	0.9998	0.52
ASC_ZnCl ₂ _1:1	8.84	0.0762	0.8758	18.87	0.0414	0.9998	1.28
ASC_ZnCl ₂ _3:1	13.05	0.2731	0.8758	24.51	0.0351	0.9984	1.16
ASC_KOH_1:1	14.38	0.0544	0.8476	29.15	0.0633	0.9984	0.54
ASC_KOH_3:1	10.03	0.0256	0.7389	46.73	0.0204	0.9999	1.05



รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสไลด์จ์ร่วมกับ
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

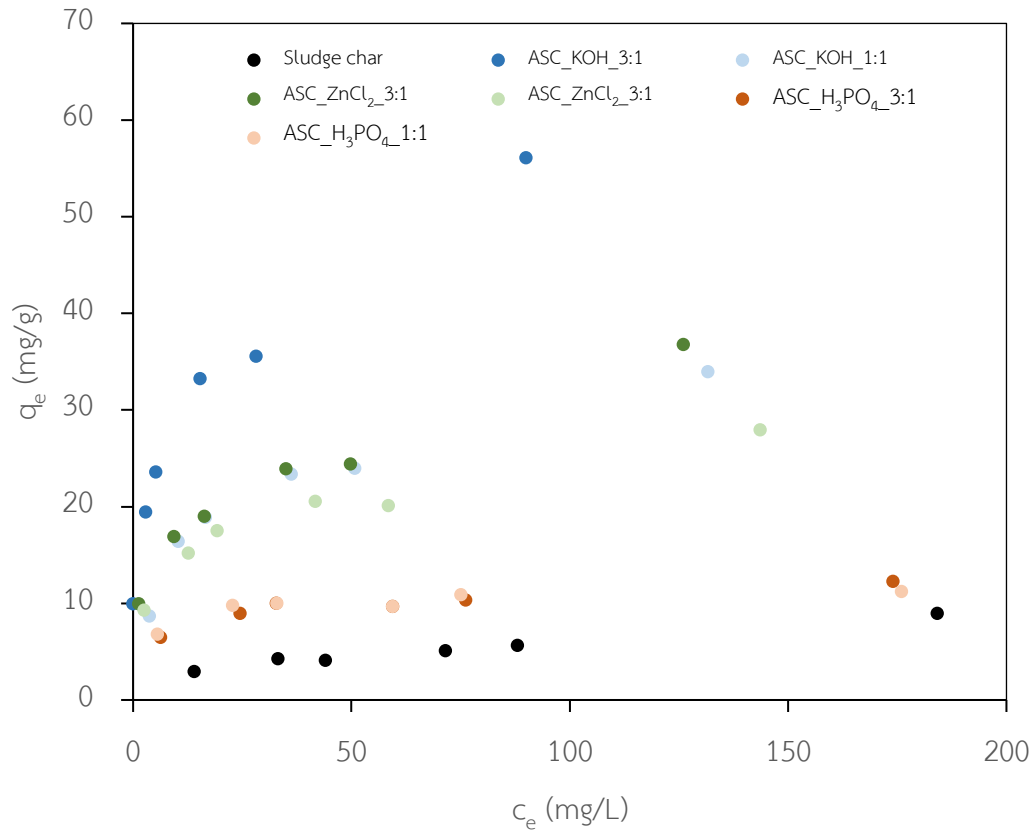
4.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับทั้ง 7 ชนิดที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) กับความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุลของแต่ละตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.17 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir's Isotherm) และฟรุนดลิช (Freundlich's Isotherm) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับฟีนอล และความสามารถในการดูดซับฟีนอลของแต่ละตัวดูดซับ โดยพิจารณาจากค่า R^2 และความเข้ากันของแบบจำลองกับผลการศึกษา (รูปที่ 4.18) ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับชนิด ASC_H₃PO₄_1:1, ASC_H₃PO₄_3:1 และ ASC_KOH_1:1 มีไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแบบแลงมัวร์ ส่วนตัวดูดซับชนิดถ่านสัลดจ์, ASC_ZnCl₂_1:1, ASC_ZnCl₂_3:1 และ ASC_KOH_3:1 มีไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบจากค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่สภาวะสมดุล (q_e) ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุลสูงสุดของแต่ละตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับถ่านสัลดจ์ ที่เป็นตัวดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี มีค่าความสามารถในการดูดซับเพียง 8.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นฟีนอลสมดุล 184.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี โดยทุกสารเคมีอัตราส่วนระหว่างสารเคมีกระตุ้นต่อถ่านสัลดจ์ 3:1 จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่สภาวะสมดุลสูงกว่าอัตราส่วน 1:1 เมื่อพิจารณาตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี ตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ASC_KOH_3:1) มีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด รองลงมาคือซิงค์คลอไรด์ (ASC_ZnCl₂_3:1) และกรดฟอสฟอริก (ASC_H₃PO₄_3:1) โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ 56.07 36.73 และ 12.22 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุล 90.00, 126.09 และ 174.04 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งการที่ตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด เป็นผลมาจากการที่มีขนาดพื้นที่ผิวสูงถึง 2565 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้กลไกการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับยังเกิดจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygen-Containing Functional Groups) ได้แก่ ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซิล (Carboxyl) เอสเทอร์ (Ester) และซิลอกเซน (Siloxane) ซึ่งจะสามารถดูดซับฟีนอลผ่านแรงระหว่าง พันธะไฮโดรเจน และแรงวานเดอร์วาล (Sellaoui et al., 2019) นอกจากนี้ตัวดูดซับยังมีโครงสร้างของวงอะโรมาติกคาร์บอนซึ่งจะช่วยให้

การดูดซับฟีนอลผ่าน $\pi - \pi$ interaction ซึ่งเป็นแรงระหว่างวงอะโรมาติกของตัวดูดซับกับวงอะโรมาติกของฟีนอล (Shen & Fu, 2018) จากผลการทดลองจึงคัดเลือกตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ไปทำการศึกษาการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับในการทดลองถัดไป

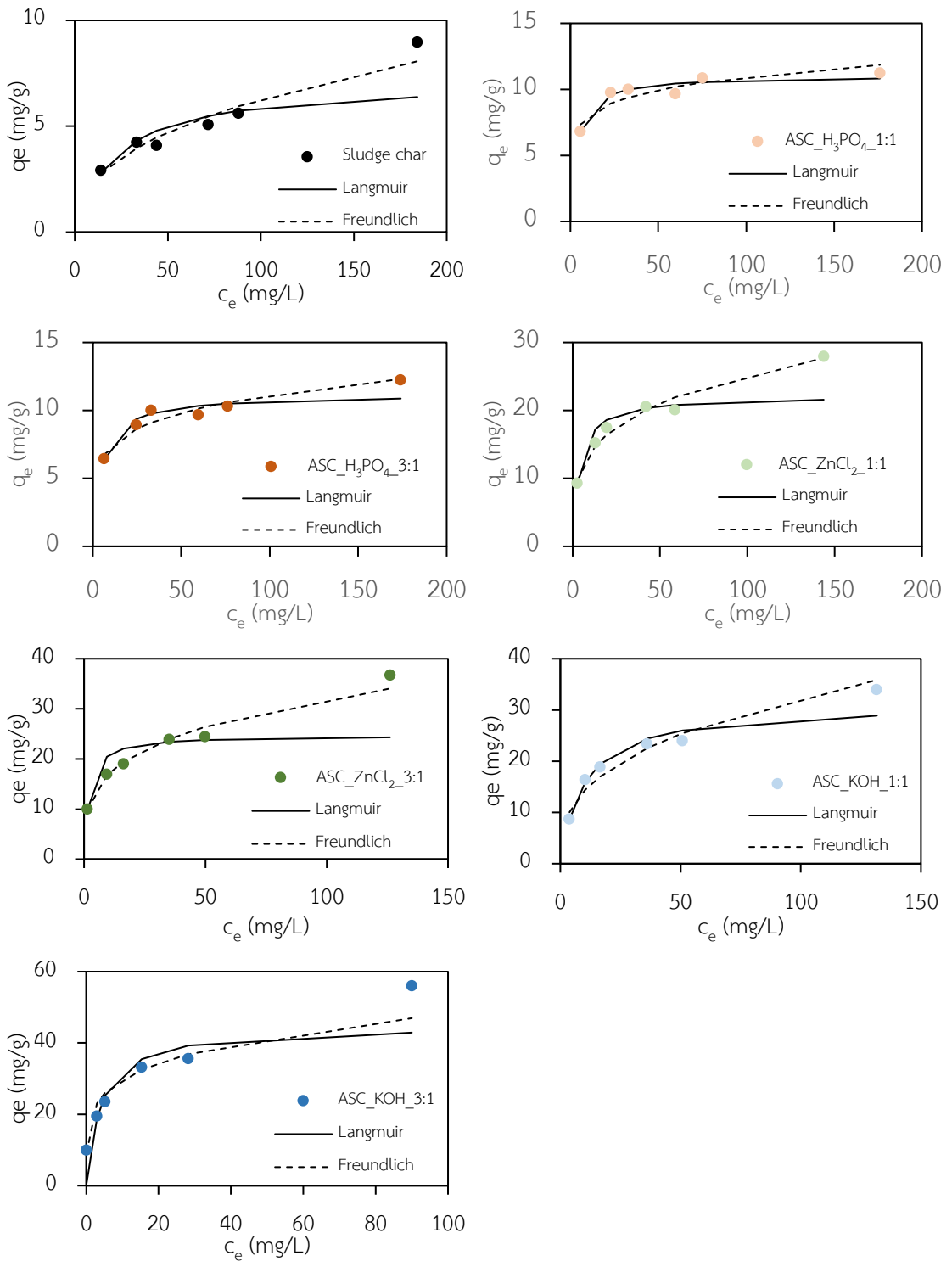
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับจากค่าคงที่แบบจำลองฟรุนดลิช (K_f) ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สมดุล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีค่า K_f 18.46 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวดูดซับถ่านสัลดจ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮโดรอกไซด์ที่มีค่า K_f เท่ากับ 18.06 แต่มีพื้นที่ผิวเพียง 346.5 ตารางเมตรต่อกรัม (Zou et al., 2013) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขี้เลื่อยหว่ายพบว่าที่มีค่า K_f 29.37 ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ทั้งที่มีพื้นที่ผิวเพียง 1083 ตารางเมตรต่อกรัม (Hameed & Rahman, 2008) แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ยังมีคงมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่น้อยเมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ผิว แต่จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม Rhodamine b พบว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองฟรุนดลิชซึ่งมีค่า K_f สูงถึง 198.34 (Tocharoen et al., 2019) ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Hameed & Rahman, 2008) และถ่านกัมมันต์จากใบปาล์ม (da Silva Lacerda et al., 2015) ที่มีค่า K_f 23.566 และ 35.06 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม Rhodamine b ซึ่งเป็นสีย้อมประจุบวกที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้ดีกว่าฟีนอล ซึ่งอาจเป็นผลมาจากประจุบนพื้นผิว และความชอบระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับพื้นผิวดูดซับ



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสไลด์จ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ตัวดูดซับ	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	q_m ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	k_L ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)	R^2	n	k_f ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})^{1/n}$)	R^2
Sludge char	7.13	0.0462	0.8755	2.41	0.9292	0.9513
ASC_H ₃ PO ₄ _1:1	11.04	0.2862	0.964	7.17	5.7610	0.8491
ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	11.17	0.2103	0.9403	5.50	4.8239	0.932
ASC_ZnCl ₂ _1:1	22.12	0.2754	0.9395	3.82	7.5579	0.978
ASC_ZnCl ₂ _3:1	24.69	0.5082	0.8903	3.65	9.0594	0.9862
ASC_KOH_1:1	31.06	0.1013	0.99	2.78	6.2058	0.9466
ASC_KOH_3:1	44.84	0.2470	0.9225	4.82	18.4672	0.9525

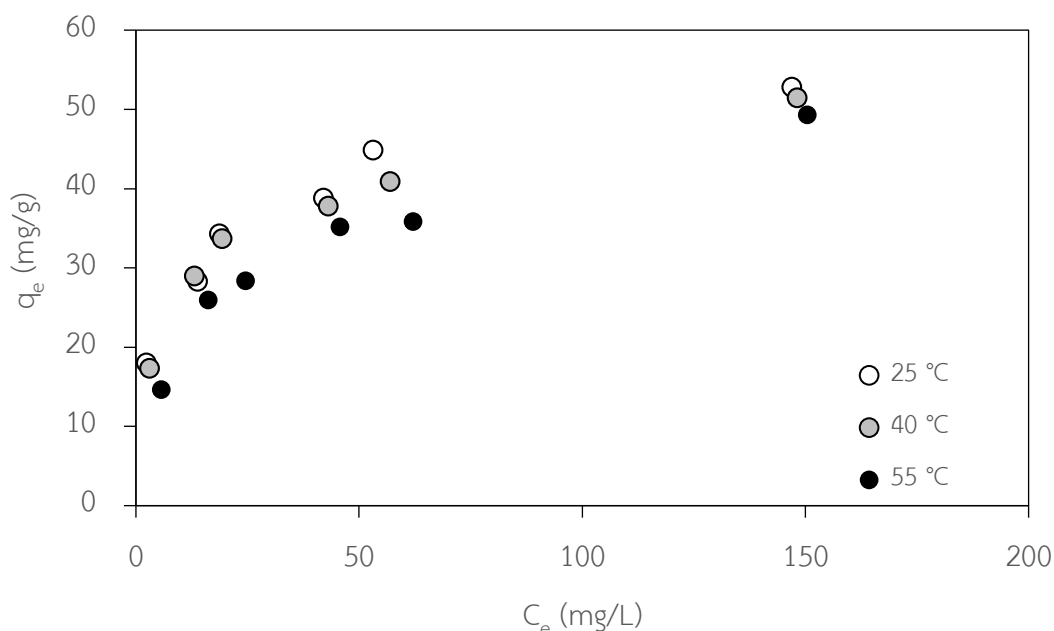


รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสไลด์จ์ร่วมกับแบบจำลองการดูดซับ

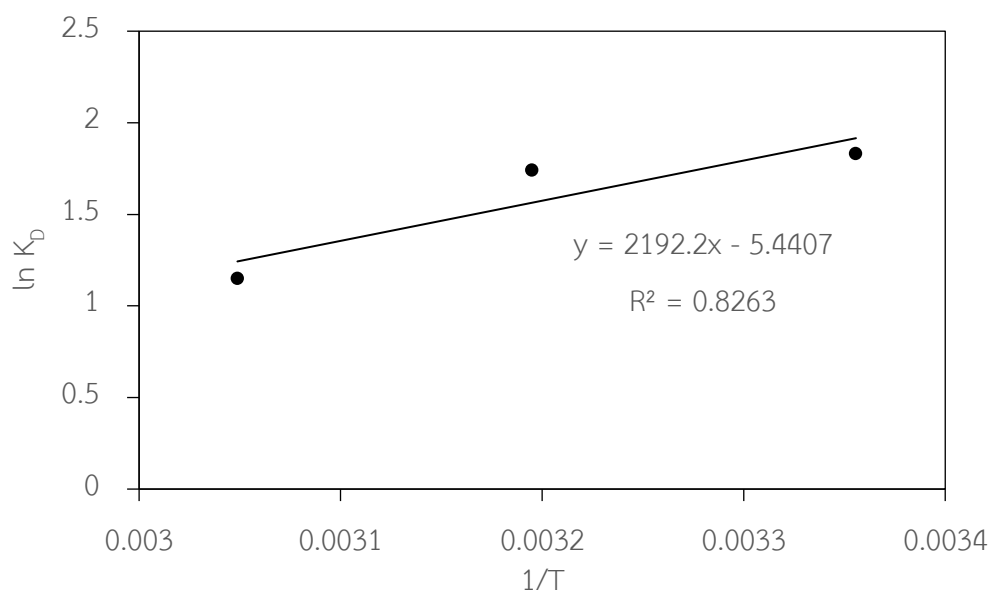
แบบแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

4.2.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับถ่านสั้ดจ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3:1 (ASC_KOH_3:1) ภายใต้อุณหภูมิ 25, 40 และ 55 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลโดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ 40 และ 55 องศาเซลเซียสตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (รูปที่ 4.20) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6 จากผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) มีค่าติดลบแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบคลายความร้อนเมื่อพิจารณาจากค่า ΔH° ที่มีค่าติดลบ นอกจากนี้การที่ ΔH° มีค่าน้อยกว่า 25 kJ/mol แสดงให้เห็นถึงกระบวนการดูดซับระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 และฟีนอลเป็นกระบวนการดูดซับแบบกายภาพเป็นหลัก (Physical Adsorption) ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก ร่วมกับกระบวนการดูดซับแบบเคมี (Chemical Adsorption) (Abramian & El-Rassy, 2009)



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_D$ และ $1/T$

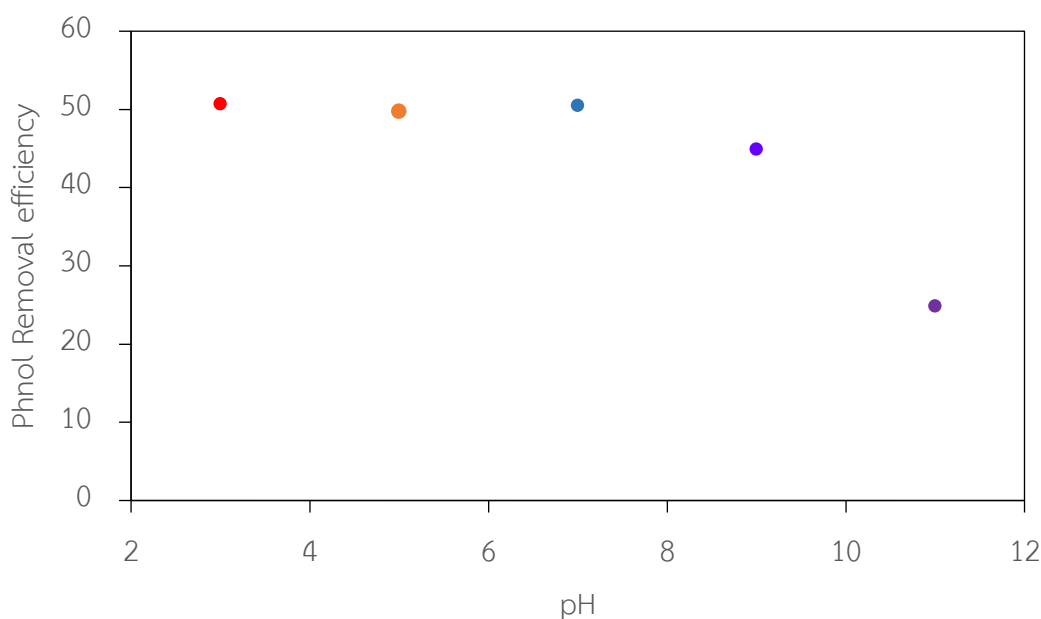
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1

อุณหภูมิ (K)	ΔG° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol)	ΔH° (kJ/mol)
298	-1.50		
313	-1.44	-45.23	-18.23
328	-0.38		

4.2.5 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับถ่านสั้ดจ์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3:1 (ASC_KOH_3:1) ในสารละลายฟีนอลที่มีพีเอช 3, 5, 7, 9 และ 11 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.21 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าที่ช่วงพีเอชของสารละลายฟีนอลระหว่าง 3-7 จะทำให้ตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดซึ่งเกิดจากฟีนอลอยู่ในรูปของตัวรับโปรตอน (Protonated) และประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 และลดลงอย่างมากที่พีเอช 11 อันเนื่องมาจากตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มีค่า

pH_{pzc} ที่น้อยกว่า 1.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุลบเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 1.45 ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นว่าในช่วงพีเอชระหว่าง 3 ถึง 11 พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุลบ เช่นเดียวกับฟีนอลซึ่งมีค่า pK_a 9.88 ซึ่งเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีพีเอชที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าค่า pK_a ฟีนอลจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายโปรตอน (Deprotonated) จึงทำให้ประจุของโมเลกุลเป็นประจุลบซึ่งเป็นประจุชนิดเดียวกับพื้นผิวของตัวดูดซับที่พีเอชเดียวกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับลดลง



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่สารละลายฟีนอลพีเอชต่าง ๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม

4.3.1 การขึ้นรูปตัวดูดซับด้วย

ในการขึ้นรูปตัวดูดซับเพื่อพัฒนาตัวดูดซับชนิดเม็ดสำหรับใช้งานในระบบบำบัดและผลิตน้ำ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การขึ้นรูปด้วยตัวดูดซับถ่านสัลดิจที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3:1 (ASC_KOH_3:1) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด ด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และวิธีการอัดแบบแห้ง (Dry Pressing) โดยใช้ Carboxy Methyl Cellulose (CMC) เป็นตัวเชื่อมผสม (Binder) ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสในสภาวะไร้ออกซิเจน ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.7

จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้ง ในอัตราส่วนผสม CMC ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยมีกากไดอะตอมไมต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 0, 5, และ 10 สามารถคงรูปอยู่ได้ ภายหลังจากการอัดรีดโดยพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะเรียบมัน อย่างไรก็ตามภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสพบว่าตัวขึ้นงานไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ เมื่อมีการสัมผัสที่ตัวขึ้นงานจะเกิดการแตกออกเป็นผงทำให้ไม่สามารถนำขึ้นงานไปใช้ได้ ซึ่งเกิดจากการอัดแบบแห้งที่ปราศจากน้ำ ตัวเชื่อมผสมที่เป็น CMC ไม่สามารถเกิดโครงสร้างพอลิเมอร์ระหว่างกันได้ ภายหลังจากการเผาจึงไม่เกิดการเชื่อมผสมของอนุภาคถ่านเข้าด้วยกัน จึงไม่สามารถคงรูปขึ้นงานขึ้นได้

เมื่อพิจารณาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดพบว่า อัตราส่วนผสม CMC ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยมีกากไดอะตอมไมต์เป็นส่วนผสมร้อยละ 0, 5 และ 10 สามารถอัดรีดขึ้นงานที่มีความสมบูรณ์ได้ แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสภายหลังจากการเผาขึ้นงานที่ได้ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ มีการแตกสลายออกเป็นผงเมื่อมีการสัมผัส และที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียสมีเพียงขึ้นงานที่มีอัตราส่วนผสม CMC ร้อยละ 40 ที่สามารถคงรูปอยู่ได้และมีความแข็งแรงพอที่จะนำไปทดสอบการดูดซับฟีนอลรวมถึงการทดสอบความต้านทานต่อแรงกดของวัสดุได้

ตารางที่ 4.7 กระบวนการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมด้วยวิธีอัดรีดและอัดแห้ง

Diatomite Waste (ร้อยละ)	CMC (ร้อยละ)	อุณหภูมิเผา (°C)	วิธีอัดรีด		วิธีอัดแห้ง	
			ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา
0	20	700	✓	✗	✓	✗
5	20	700	✓	✗	✓	✗
10	20	700	✓	✗	✓	✗
0	30	700	✓	✗	✓	✗
5	30	700	✓	✗	✓	✗
10	30	700	✓	✗	✓	✗
0	40	700	✓	✗	✓	✗
5	40	700	✓	✗	✓	✗
10	40	700	✓	✗	✓	✗
0	20	800	✓	✗	✓	✗
5	20	800	✓	✗	✓	✗
10	20	800	✓	✗	✓	✗
0	30	800	✓	✗	✓	✗
5	30	800	✓	✗	✓	✗
10	30	800	✓	✗	✓	✗
0	40	800	✓	✓	✓	✗
5	40	800	✓	✓	✓	✗
10	40	800	✓	✓	✓	✗

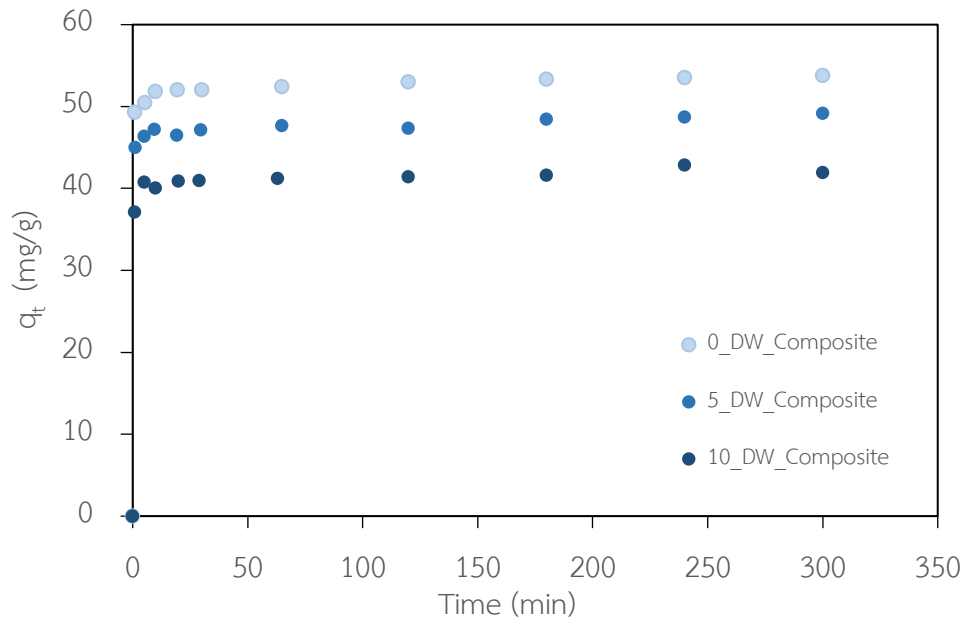
หมายเหตุ สัญลักษณ์ ✓ และ ✗ แสดงถึงชิ้นงานที่สามารถคงรูปอยู่ได้ และชิ้นงานที่ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ตามลำดับ

4.3.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับวัสดุผสม

ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับพินอลโดยใช้ตัวดูดซับวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ตัวดูดซับวัสดุผสมกากไถอะตอมไมต์ร้อยละ 0 (0_DW_Composite), ตัวดูดซับวัสดุผสม กากไถอะตอมไมต์ ร้อยละ 5 (5_DW_Composite) และ ตัวดูดซับวัสดุผสมกากไถอะตอมไมต์ร้อยละ 10 (10_DW_Composite) จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับในแต่ละเวลากับระยะเวลาแสดงดังรูปที่ 4.22 การดูดซับพินอลของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มแรกของการทดลองหลังจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สมดุลโดยใช้ระยะเวลาแตกต่างกันไปในแต่ละตัวดูดซับ และเมื่อนำผลการศึกษาดังกล่าวไปคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo First Order Reaction) และปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo Second Order Reaction) เพื่อศึกษากลไกและพฤติกรรมของการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.8 จากการวิเคราะห์พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับพินอลของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo Second Order) โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 และกราฟของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.23

เมื่อพิจารณาค่าครึ่งชีวิต (Half-life; $t_{0.5}$) ในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนพบว่าตัวดูดซับทั้ง 3 มีค่าครึ่งชีวิตที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง (0.46 - 1.17 นาที) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าครึ่งชีวิตของตัวดูดซับชนิด ASC_KOH_3:1 ที่มีลักษณะเป็นผง แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะนำตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 มาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับชนิดเม็ด แต่ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับพินอลยังคงไม่แตกต่างจากเดิม ซึ่งจะทำให้การนำตัวดูดซับไปใช้งานได้อย่างสะดวก

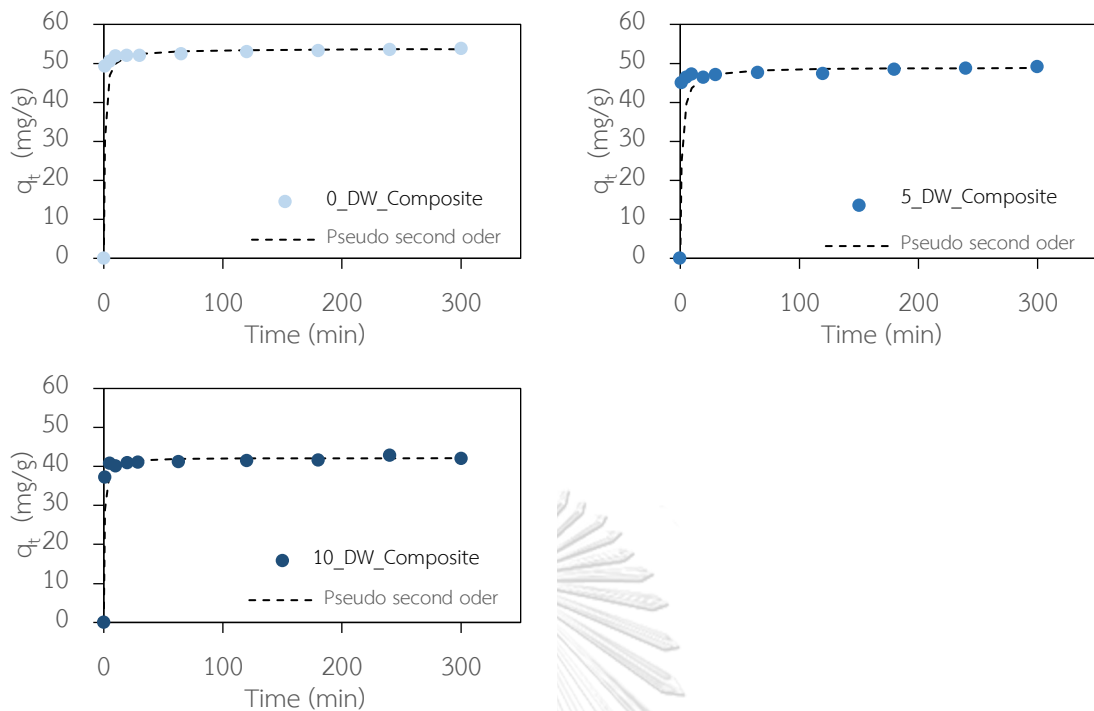
เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับพินอลที่สภาวะสมดุล (q_e) พบว่าตัวดูดซับ 0_DW_Composite มีค่าความสามารถในการดูดซับพินอลที่สภาวะสมดุลสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับ 5_DW_Composite และ 10_DW_Composite ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าการใส่ส่วนผสมกากไถอะตอมไมต์ในกระบวนการการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมไม่ได้มีส่วนในการเพิ่มความเร็วในการดูดซับและความสามารถในการดูดซับพินอล ในทางกลับกันกับเป็นการลดความสามารถในการดูดซับพินอล



รูปที่ 4.22 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 100 mg/L อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน และอันดับสองเสมือน

ตัวดูดซับ	Pseudo first order			Pseudo second order			
	q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	k_1 (min^{-1})	R^2	q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	k_2 ($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	R^2	$t_{0.5}$ (min)
0_DW_Composite	2.74	0.01013	0.8725	53.76	0.02419	1.0000	0.77
5_DW_Composite	2.93	0.00737	0.9251	49.02	0.01741	0.9998	1.17
10_DW_Composite	2.74	0.01059	0.6911	42.19	0.05153	0.9997	0.46

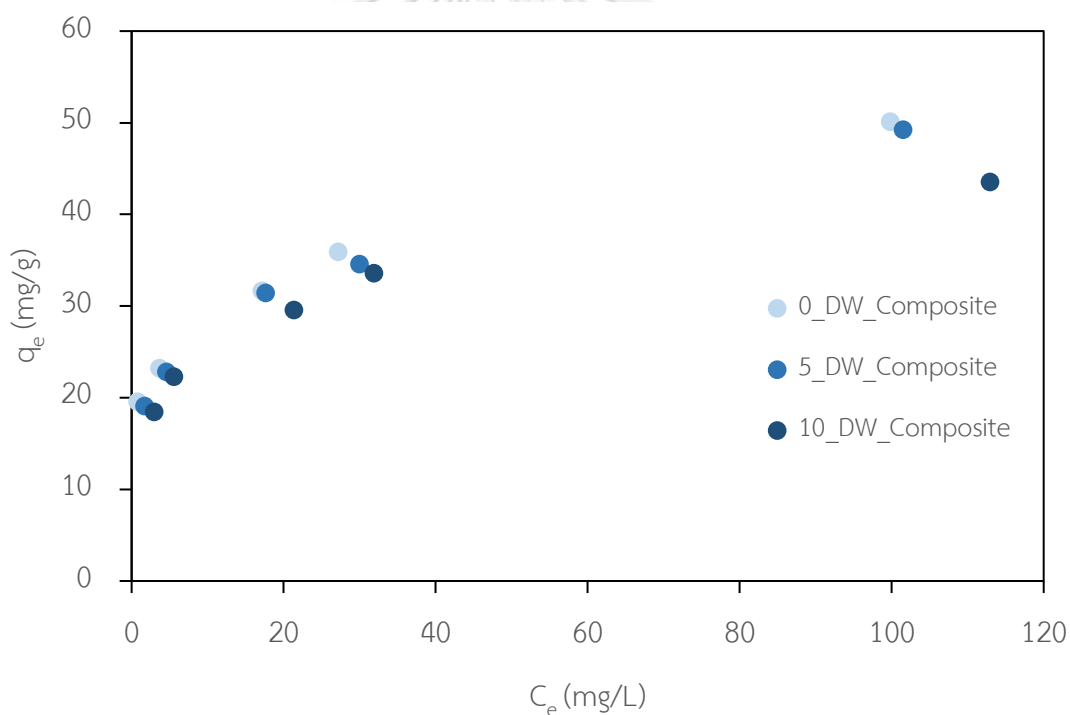


รูปที่ 4.23 จลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากสลัดจ์ร่วมกับ
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

4.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับชนิดเม็ดทั้ง 3 ชนิดได้แก่ ตัวดูดซับวัสดุผสมกากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 0 (0_DW_Composite), ตัวดูดซับวัสดุผสม กากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 5 (5_DW_Composite) และ ตัวดูดซับวัสดุผสม กากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 10 (10_DW_Composite) จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) กับความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุลของแต่ละตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.24 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir's Isotherm) และฟรุนดลิช (Freundlich's Isotherm) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับฟีนอล และความสามารถในการดูดซับฟีนอลของแต่ละตัวดูดซับ โดยพิจารณาจากค่า R^2 และความเข้ากันของแบบจำลองกับผลการศึกษา (รูปที่ 4.25) ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองดังตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช

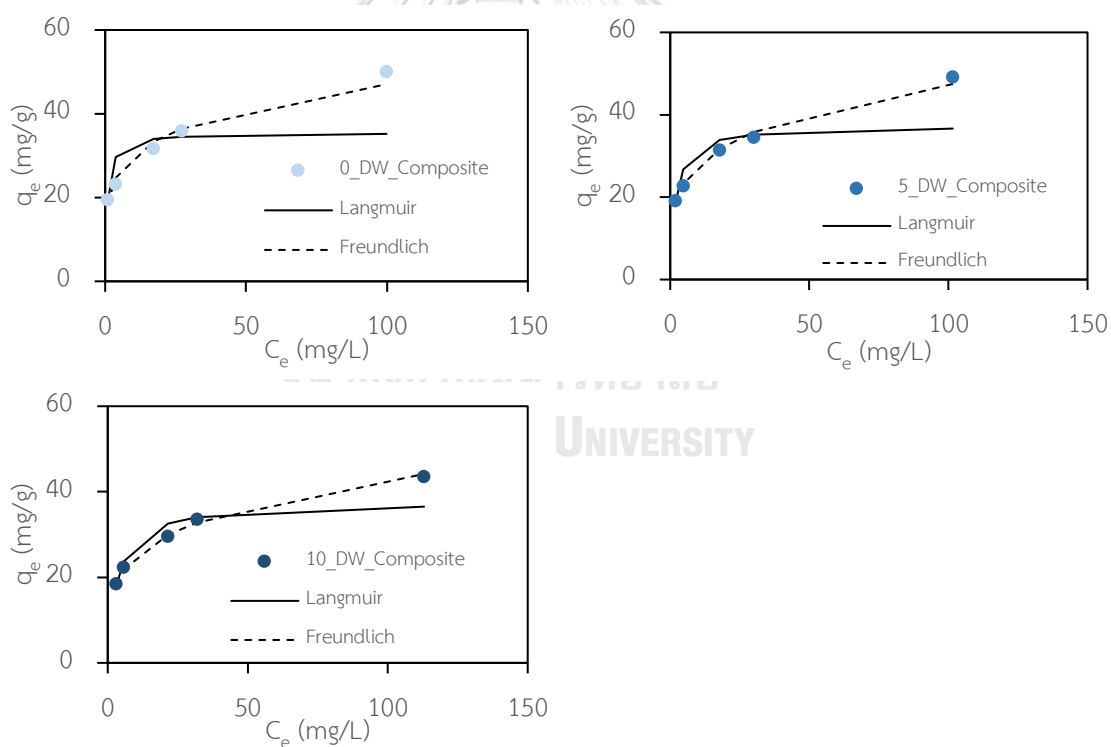
เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบจากค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่สภาวะสมดุล (q_e) ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สภาวะสมดุลสูงสุดของแต่ละตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับ 0_DW_Composite เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับตัวดูดซับ 5_DW_Composite รองลงมาคือตัวดูดซับ 10_DW_Composite โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ 50.07, 49.21 และ 43.05 mg/g ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฟีนอลที่สมดุล 98.85, 101.57 และ 113 mg/L ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการผสมกากไถอะตอมไมต์ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมมีแนวโน้มทำความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลงตามอัตราส่วนของกากไถอะตอมไมต์ที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งเป็นผลมาจากการที่กากไถอะตอมไมต์ไม่สามารถดูดซับฟีนอลได้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่น้อย



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

ตัวดูดซับ	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	q_m	k_L	R^2	n	k_f	R^2
	($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)			$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})^{1/n}$	
0_DW_Composite	35.46	1.3689	0.727	5.08	19.0327	0.974
5_DW_Composite	37.31	0.5514	0.8376	4.33	16.3192	0.9925
10_DW_Composite	37.59	0.3033	0.9366	4.27	14.6016	0.9962



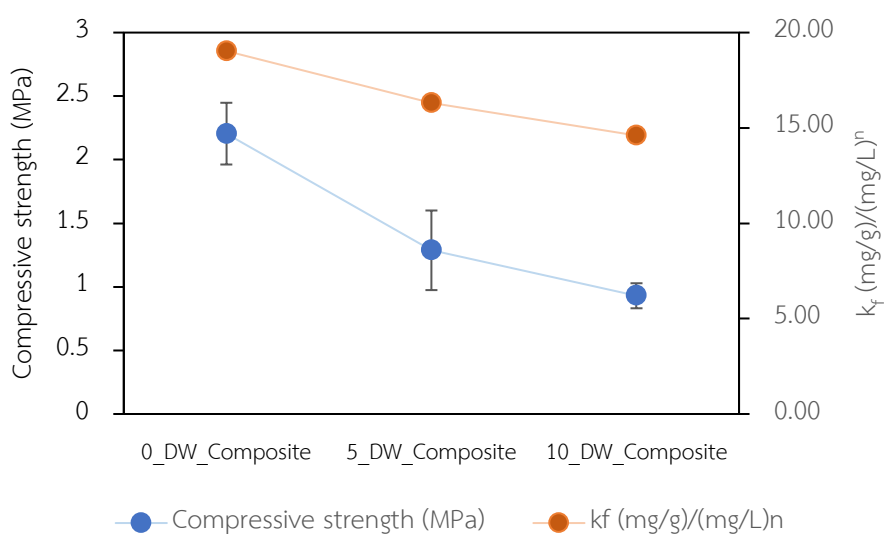
รูปที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม และแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

4.3.4 ความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับวัสดุผสม

จากการขึ้นรูปตัวดูดซับชนิดเม็ดด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion) โดยใช้ตัวประสานชนิด CMC ในอัตราส่วน ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยผสมกากไดอะตอมไมต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักเพื่อให้ได้ตัวดูดซับวัสดุผสม 3 ชนิดได้แก่ ตัวดูดซับวัสดุผสมกากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 0 (0_DW_Composite), ตัวดูดซับวัสดุผสม กากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 5 (5_DW_Composite) และ ตัวดูดซับวัสดุผสมกากไดอะตอมไมต์ร้อยละ 10 (10_DW_Composite) นำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงกดของวัสดุ (Test for Compressive Strength) เนื่องจากความต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับจะส่งผลต่อการป้องกันความเสียหายของตัวดูดซับ ในระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการใช้งานในคอลัมน์ หากตัวดูดซับมีความเสียหายจะส่งผลต่อการอุดตันส่งผลให้เกิดความดันลดในระบบ (Pressure drop) เพิ่มมากขึ้น (David, 2015) รูปที่ 4.26 จากผลการทดสอบพบว่าตัวดูดซับ 0_DW_Composite มีความต้านทานต่อแรงกดสูงสุดที่ 2.205 MPa รองลงมาคือตัวดูดซับ 5_DW_Composite และตัวดูดซับ 10_DW_Composite ที่มีความต้านทานต่อแรงกด 1.287 MPa และ 0.93 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการผสมกากไดอะตอมไมต์ในกระบวนการขึ้นรูปไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามการใส่กากไดอะตอมไมต์ในวัสดุผสมจะทำให้ความแข็งแรงของตัวดูดซับลดลงตามปริมาณของกากไดอะตอมไมต์สังเกตได้จากค่าความต้านทานของแรงกดวัสดุที่ลดลงเมื่อปริมาณกากไดอะตอมไมต์เพิ่มขึ้น

หากพิจารณาอัตราส่วนกากไดอะตอมไมต์ในตัวดูดซับกับค่าความต้านทานต่อแรงกดของวัสดุ และค่า k_f ซึ่งเป็นค่าคงที่จากแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ พบว่าอัตราส่วนกากไดอะตอมไมต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดของวัสดุลดลง และความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลงเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่ากากไดอะตอมไมต์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของตัวดูดซับไม่ว่าจะเป็นใช้เป็นตัวดูดซับโดยตรง หรือใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปตัวดูดซับชนิดเม็ด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของกากไดอะตอมไมต์จะพบว่ากากไดอะตอมไมต์มีความบริสุทธิ์ของซิลิกอนไดออกไซด์สูง จึงน่าจะมีความเหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์เป็นแหล่งของซิลิกอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์วัสดุเซรามิกความพรุนตัวสูง เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) นอกจากนี้กากไดอะตอมไมต์ยังมีความหนาแน่นต่ำและมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นอิฐมวล และวัสดุทนไฟได้

ตัวดูดซับที่ได้ถึงแม้จะสามารถคงรูปอยู่ได้ในระหว่างการทดสอบการดูดซับ แต่ความต้านทานต่อแรงกดของวัสดุดูดซับในงานวิจัยนี้ ยังคงมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงกดสูงถึง 40 MPa (Nuilerd et al., 2018) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของชนิดตัวประสาน อัตราส่วนผสมของแต่ละส่วนผสม ระยะเวลาในการเผา เพื่อที่จะเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวดูดซับมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงกด และความสามารถในการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำกากไดอะตอมไมต์และสลัดจ์จากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับฟีนอล โดยผ่านการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพตัวดูดซับ กระบวนการขึ้นรูปของวัสดุดูดซับ การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับฟีนอล การศึกษาอุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอลโดยใช้การทดลองแบบทีละเท ซึ่งจากผลการทดลองสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ

5.1.1.1 กากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่าตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ เป็นไดอะตอมไมต์ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ส่งผลให้องค์ประกอบแก้วที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูงกว่าไดอะตอมไมต์ดิบ (Raw Diatomite) มีโครงสร้างผลึกคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) สูงกว่าผลึกควอตซ์ (Quartz) มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยเพียง 3.188 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกากไดอะตอมไมต์ดิบ อย่างไรก็ตามหมู่ฟังก์ชันที่พบส่วนใหญ่ยังคงเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกอน-ออกซิเจน ที่ไม่แตกต่างจากไดอะตอมไมต์ดิบ และมีค่า pH_{pzc} ต่ำเพียง 1.542

5.1.1.2 สลัดจ์ (Sludge)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่าตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์และมีองค์ประกอบแก้วที่เป็นซิลิกาสูง มีโครงสร้างผลึกควอตซ์ และมีหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ส่วนใหญ่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygen-Containing Functional Groups) มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำเพียง 12.46 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวดูดซับสลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน การกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนจะมีอัตราส่วน C/H เพิ่มขึ้น มีโครงสร้างผลึกคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) เพิ่มขึ้น และยังพบโครงสร้างผลึกควอตซ์ ยกเว้น ASC_KOH_3:1 มีหมู่ฟังก์ชันลดลงจากตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ จากการ

กระตุ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นตามชนิดและปริมาณของสารเคมีกระตุ้น โดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้มากที่สุดถึง 2565 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังมีค่า pH_{pzc} น้อยกว่า 1.45 ซึ่งใกล้เคียงกับตัวดูดซับสไลต์ดิบ

5.1.2 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์ (Diatomite Waste) และสลัดจ์ (Sludge)

จากการศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับพบว่าตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ และตัวดูดซับกากไดอะตอมไมต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในทุกความเข้มข้นและทุกอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์กากไดอะตอมไมต์เพื่อเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากกากไดอะตอมไมต์ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้โครงสร้างของรูพรุนภายในถูกทำลายส่งผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ไม่สามารถเกิดการดูดซับฟีนอลโดยตัวดูดซับสลัดจ์ดิบ อีกทั้งยังปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมามากเกินไป จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโดยตรงได้ ในทางกลับกันเมื่อสลัดจ์ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและการกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อนจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิกระตุ้นที่ทำให้ตัวดูดซับถ่านสลัดจ์มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุด จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลพบว่าตัวดูดซับถ่านสลัดจ์ทุกชนิดเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo Second Order) โดยมีค่าครึ่งชีวิตสั้น และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลพบว่าตัวดูดซับถ่านสลัดจ์เป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยเรียงลำดับสารเคมีกระตุ้นที่ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ดังนี้ $KOH > ZnCl_2 > H_3PO_4$ และตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุด โดยมีปฏิกิริยาการดูดซับแบบดูดความร้อน และค่าพีเอชของสารละลายที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วงพีเอช 3-7

5.1.3 การศึกษาการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม

วิธีการขึ้นรูปตัวดูดซับวัสดุผสมที่ดีที่สุดคือวิธีการอัดรีดโดยใช้ตัวประสาน Carboxy Methyl Cellulose เป็นตัวเชื่อมผสมในอัตราส่วนร้อยละ 40 กากไดอะตอมไมต์ ร้อยละ 0 ถึง 10 และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจน จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอล

ของตัวดูดซับวัสดุผสมพบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และมีไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองฟรุนดลิช โดยมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกับตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 การผสมกากไดอะตอมไมต์ในวัสดุผสมจะลดความสามารถในการดูดซับ และลดความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดของตัวดูดซับ

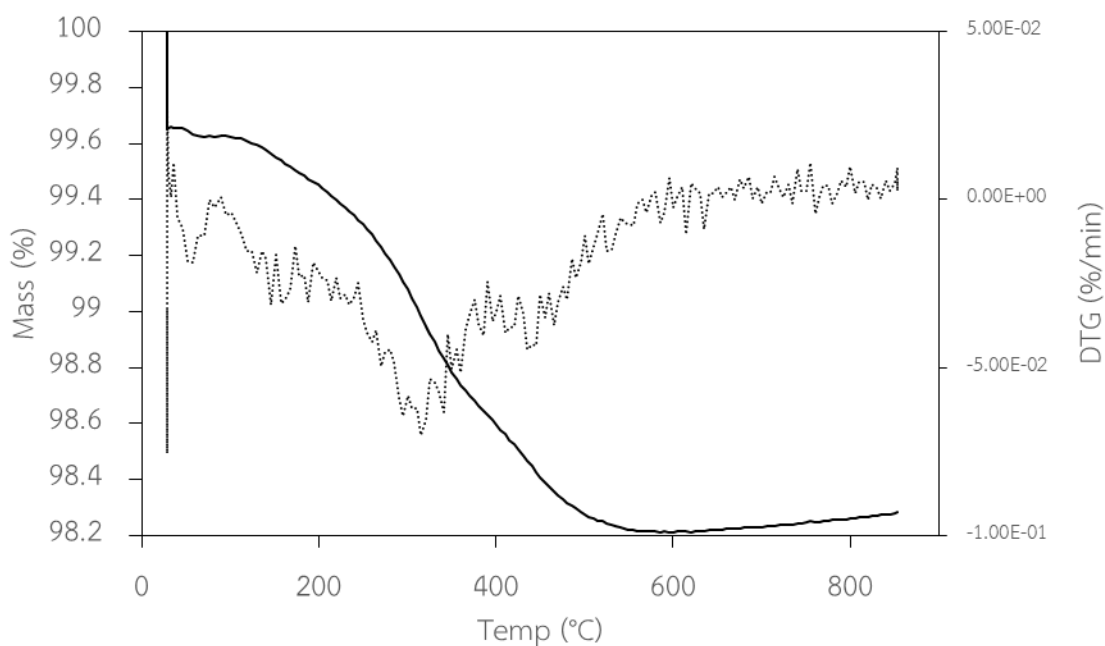
จากผลการทดลองที่ผ่านมามองเห็นได้ว่ากากไดอะตอมไมต์ไม่เหมาะที่จะถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับฟีนอล ในขณะที่สไลด์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และการกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะมากและมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูง นอกจากนี้ด้วยสมบัติดังกล่าวยังสามารถนำตัวดูดซับที่ได้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อีกหลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับมลสารชนิดอื่น ๆ เช่น โลหะหนัก สีย้อมในน้ำ ควัน รวมถึงสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในบรรยากาศ เป็นต้น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง และกระบวนการไพโรไลซิส เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสไลด์อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

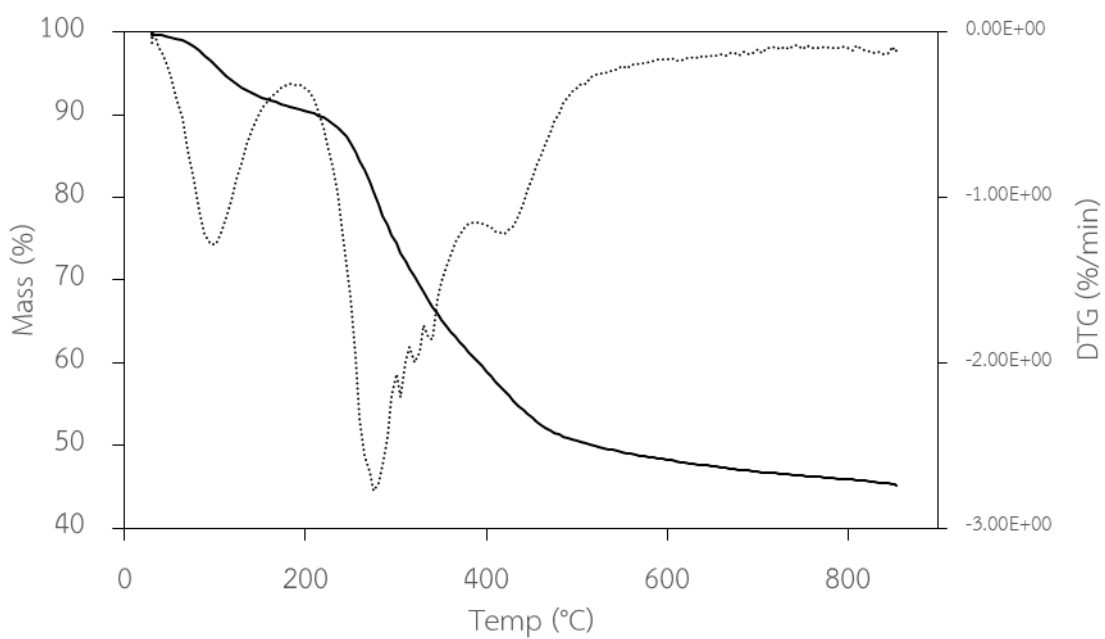
1. ควรศึกษาการนำกากไดอะตอมไมต์ไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นนอกเหนือจากตัวดูดซับ เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลท์ เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่สูง ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตอิฐทนไฟ เป็นต้น
2. ควรศึกษาการนำตัวดูดซับถ่านสไลด์และตัวดูดซับวัสดุผสมไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสารชนิดอื่น เช่น โลหะหนัก สีย้อม ในน้ำ ควัน สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ เป็นต้น
3. ควรศึกษาการนำถ่านสไลด์ไปใช้ประโยชน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและกระบวนการไพโรไลซิส
4. ควรศึกษากระบวนการกระตุ้นถ่านสไลด์ด้วยวิธีอื่นเพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมีและส่งผลต่อการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เช่น การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น







รูปที่ ก.1 การวิเคราะห์การสลายตัวของกาโดอะตอมไมต์โดย TGA และ DTG



รูปที่ ก.2 การวิเคราะห์การสลายตัวของสลิคโดย TGA และ DTG

ตารางที่ ก.1 หมู่ฟังก์ชันในแต่ละช่วงคลื่นของตัวดูดซับจากกากไดอะตอมไมต์

ตัวดูดซับ	Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
Diatomite waste	3445	Silanol, Hydroxyl (O-H) stretching
	1632	Silanol, Hydroxyl (O-H) bending
	1096	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	795	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	617	Si-O tetrahedra of cristobalite
	471	Siloxane (Si-O-Si) bending
Diatomite filter aid	3447	Silanol, Hydroxyl (O-H) stretching
	1631	Silanol, Hydroxyl (O-H) bending
	1095	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	799	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	615	Si-O tetrahedra of cristobalite
	467	Siloxane (Si-O-Si) bending
Raw diatomite	3698 3621 3434	Silanol, Hydroxyl (O-H) stretching
	1636	Silanol, Hydroxyl (O-H) bending
	1097	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	798	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	533 695	Si-O-Al (Ilia et al., 2009)
	469	Siloxane (Si-O-Si) bending

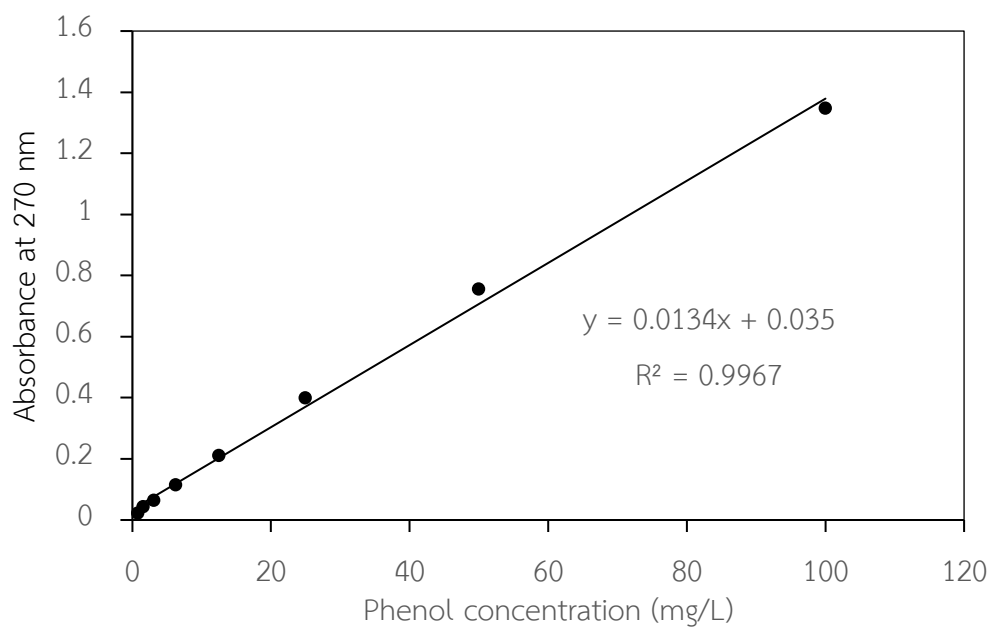
ตารางที่ ก.2 หมู่ฟังก์ชันในแต่ละช่วงคลื่นของตัวดูดซับจากสลัดจ์

ตัวดูดซับ	Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
Raw sludge	3402	Hydroxyl (O-H) stretching
	2927	Akyl group (C-H) stretching
	1654	Carbonyl (C=O) stretching
	1548	Aromatic (C=C) stretching
	1406	Aromatic (C-C) stretching
	1037	Carboxyl ether ester and alcohol (C-O) stretching
	1083	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	798	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	469	Siloxane (Si-O-Si) bending
Char sludge	2976	Akyl group (C-H) stretching
	1544	Aromatic (C=C) stretching
	1211 1177 1114	Carboxyl ether ester and alcohol (C-O) stretching
	1080	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	797	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	467	Siloxane (Si-O-Si) bending

ตัวอย่างดูดซับ	Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
ASC_H ₃ PO ₄ _1:1	3383	Hydroxyl (O-H) stretching
	2977	Akyl group (C-H) stretching
	1569	Aromatic (C=C) stretching
	1211 1177 1113	Carboxyl ether ester and alcohol (C-O) stretching
	1083	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	797	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	468	Siloxane (Si-O-Si) bending
	3340	Hydroxyl (O-H) stretching
	1575	Aromatic (C=C) stretching
	1089	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	796	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
ASC_ZnCl ₂ _1:1	466	Siloxane (Si-O-Si) bending
	3367	Hydroxyl (O-H) stretching
	1586	Aromatic (C=C) stretching
	1087	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	796	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	466.25	Siloxane (Si-O-Si) bending

ตัวดูดซับ	Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
ASC_ZnCl ₂ _3:1	3356 3113	Hydroxyl (O-H) stretching
	2973 2835	Akyl group (C-H) stretching
	1575	Aromatic (C=C) stretching
	1210 1179 1111	Carboxyl ether ester and alcohol (C-O) stretching
	1080	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	808	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	450	Siloxane (Si-O-Si) bending
ASC_KOH_1:1	3397	Hydroxyl (O-H) stretching
	1586	Aromatic (C=C) stretching
	1092	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	795	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	467	Siloxane (Si-O-Si) bending
ASC_KOH_3:1	3484	Hydroxyl (O-H) stretching
	2979	Akyl group (C-H) stretching
	1543	Aromatic (C=C) stretching
	1210 1178 1114 1047	Carboxyl ether ester and alcohol (C-O) stretching
	1082	Siloxane (Si-O-Si) asymmetric stretching
	805	Siloxane (Si-O-Si) symmetric stretching
	458	Siloxane (Si-O-Si) bending





รูปที่ ข.1 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล ที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร



ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของไดอะตอมไมต์และสลัดจ์

Diatomite			Sludge		
Time (minute)	Concentration (mg/l)	q_t (mg/g)	Time (minute)	Concentration (mg/l)	q_t (mg/g)
0	102.96	0.000	0	102.96	0
0.5	99.15	-1.015	0.5	113.96	-8.418
1.42	98.59	-0.735	1.41	116.83	-9.854
3.33	99.13	-1.004	5.44	116.82	-9.851
5.11	99.22	-1.052	11.06	118.96	-10.918
11.34	98.59	-0.735	18.14	120.58	-11.731
20.33	100.19	-1.537	29.22	122.75	-12.813
29.5	99.46	-1.168	56	126.61	-14.746
60.33	102.21	-2.545	122	131.37	-17.123
120	99.06	-0.970	185.3	130.49	-16.687
182	100.43	-1.653	246	134.42	-18.649
240	97.10	0.011	306	130.39	-16.634
300	97.65	-0.265			

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ Sludge char, ASC_H₃PO₄_1:1 และ ASC_H₃PO₄_3:1

Sludge char		ASC_H ₃ PO ₄ _1:1		ASC_H ₃ PO ₄ _3:1	
Time (minute)	q _t (mg/g)	Time (minute)	q _t (mg/g)	Time (minute)	q _t (mg/g)
0.23	7.63	0.32	6.15	1.11	11.99
1.5	7.79	1.16	6.97	1.5	12.28
2.23	8.02	2.55	6.19	3.07	13.16
3.4	8.61	6.25	6.92	5.38	13.36
8.12	9.16	10.03	6.48	10.14	14.14
14	10.52	20.4	6.84	19.52	14.28
18.4	8.72	30.15	7.46	29.49	16.30
27.43	9.75	72	7.48	60	16.16
65	10.22	120	7.39	137	17.23
121	10.52	180	7.74	183	16.04
190	10.18	240	7.13	240	16.54
240	10.59	300	7.73	300	16.09

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_ZnCl₂_1:1 และ ASC_ZnCl₂_3:1

ASC_ZnCl ₂ _1:1		ASC_ZnCl ₂ _3:1	
Time (minute)	qt (mg/g)	Time (minute)	qt (mg/g)
0.2	7.19	0.37	10.07
1.03	10.51	1.1	15.85
1.41	12.22	1.3	18.14
3.04	13.49	3.3	19.74
5.04	14.73	5	21.60
9.44	15.99	10.03	23.01
20.1	17.28	20.1	17.80
27.05	17.31	29.53	24.15
50.1	18.65	56	24.92
128	18.46	132	24.28
180	18.61	186	24.04
240	18.40	240	25.02
300	18.85	300	24.11

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_1:1 และ ASC_KOH_3:1

ASC_KOH_1:1		ASC_KOH_3:1	
Time (min)	qt (mg/g)	Time (min)	qt (mg/g)
0.3	9.49	0.3	18.92
0.54	13.91	1.13	24.97
1.38	15.55	4	37.85
3.07	18.30	5.03	39.25
5.04	21.37	9.56	43.19
10.14	25.28	20	44.66
19.52	27.37	29.28	45.14
29.49	27.43	70	45.48
60	29.06	120	45.86
137	29.90	180	46.36
183	29.99	240	46.89
240	29.90	300	46.50
300	28.09		

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม 0_DW_Composite
5_DW_Composite และ 10_DW_Composite

0_DW_Composite		5_DW_Composite		10_DW_Composite	
Time (min)	q_t (mg/g)	Time (min)	q_t (mg/g)	Time (min)	q_t (mg/g)
1	49.28	1.2	45.00	1	37.11
5.27	50.46	5	46.38	5	40.72
10.02	51.84	9.5	47.17	10	40.00
19.5	52.04	19.27	46.45	20	40.86
30.17	52.04	29.57	47.11	29	40.92
65	52.43	65	47.63	63	41.18
120	52.96	120	47.30	120	41.38
180	53.29	180	48.42	180	41.58
240	53.49	240	48.68	240	42.83
300	53.75	300	49.14	300	41.91

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม Sludge char ASC_H₃PO₄_1:1 และ ASC_H₃PO₄_3:1

Sludge char			ASC_H ₃ PO ₄ _1:1			ASC_H ₃ PO ₄ _3:1		
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
19.92	14.08	2.92	19.25	5.63	6.81	19.25	6.35	6.45
41.75	33.26	4.24	42.40	22.89	9.75	42.40	24.53	8.93
52.30	44.12	4.09	52.91	32.96	9.98	52.91	32.90	10.01
81.76	71.63	5.06	78.86	59.54	9.66	78.86	59.51	9.67
99.28	88.07	5.61	96.81	75.12	10.85	96.81	76.22	10.30
202.15	184.22	8.96	198.49	176.04	11.22	198.49	174.04	12.22

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ASC_ZnCl₂_1:1 และ ASC_ZnCl₂_3:1

ASC_ZnCl ₂ _1:1			ASC_ZnCl ₂ _3:1		
C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)	C _i (mg/L)	C _e (mg/L)	q _e (mg/g)
21.13	2.55	9.29	21.13	1.28	9.92
43.14	12.75	15.19	43.14	9.36	16.89
54.28	19.28	17.50	54.28	16.36	18.96
82.87	41.78	20.54	82.87	35.06	23.90
98.66	58.49	20.09	98.66	49.83	24.41
199.55	143.70	27.93	199.55	126.09	36.73

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม ASC_KOH_1:1 และ ASC_KOH_3:1

ASC_KOH_1:1			ASC_KOH_3:1		
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
21.13	3.81	8.66	19.92	0.03	9.94
43.14	10.39	16.38	41.75	2.89	19.43
54.28	16.55	18.87	52.30	5.22	23.54
82.87	36.23	23.32	81.76	15.33	33.22
98.66	50.76	23.95	99.28	28.20	35.54
199.55	131.69	33.93	202.15	90.00	56.07

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับวัสดุผสม 0_DW_Composite 5_DW_Composite และ 10_DW_Composite

Sludge char			ASC_H ₃ PO ₄ _1:1			ASC_H ₃ PO ₄ _3:1		
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
39.84	0.82	19.51	39.84	1.72	19.06	39.84	2.99	18.43
50.17	3.73	23.22	50.17	4.63	22.77	50.17	5.60	22.29
80.50	17.16	31.67	80.50	17.69	31.41	80.50	21.42	29.54
99.05	27.24	35.91	99.05	30.00	34.53	99.05	31.94	33.56
200.00	99.85	50.07	200.00	101.57	49.22	200.00	112.99	43.51

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับฟีนอลของตัวดูดซับ ASC_KOH_3:1 ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส

25 °C			40 °C			55 °C		
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
20.36	2.42	17.94	20.36	3.07	17.29	20.36	5.74	14.62
42.13	13.89	28.24	42.13	13.16	28.96	42.13	16.24	25.89
52.99	18.72	34.27	52.99	19.33	33.66	52.99	24.65	28.34
80.87	42.08	38.78	80.87	43.15	37.72	80.87	45.77	35.10
97.92	53.13	44.79	97.92	57.04	40.87	97.92	62.13	35.79
199.70	146.96	52.75	199.70	148.25	51.45	199.70	150.46	49.24

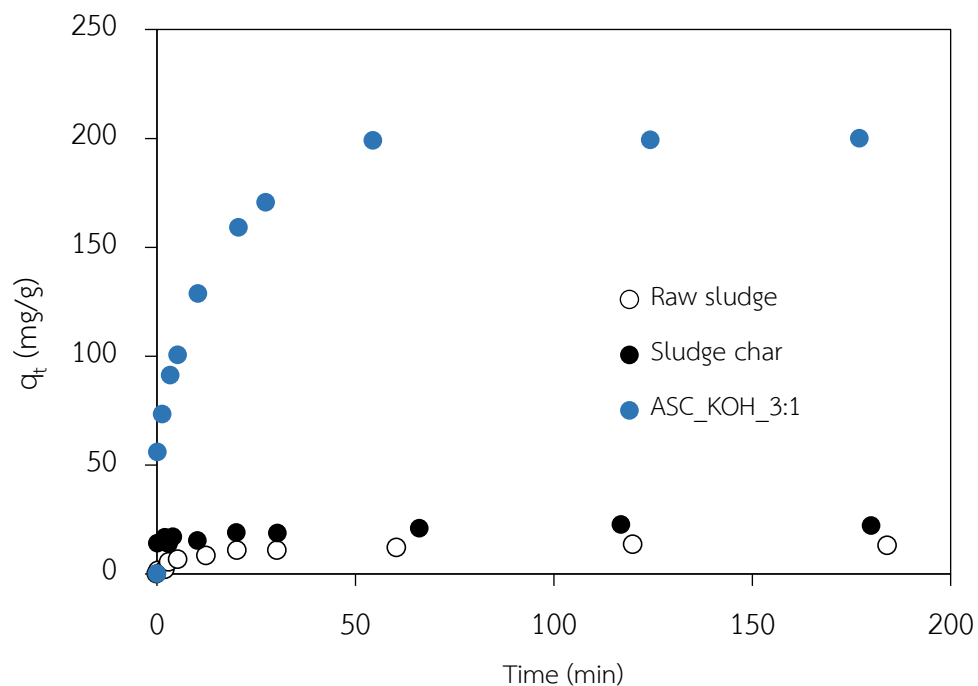
ภาคผนวก ค

การศึกษาซ้ำเพิ่มเติม การดูดซับสีย้อม Rhodamine b



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ ค.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Rhodamine b ของตัวดูดซับ Raw sludge, Sludge char และ ASC_KOH_3:1

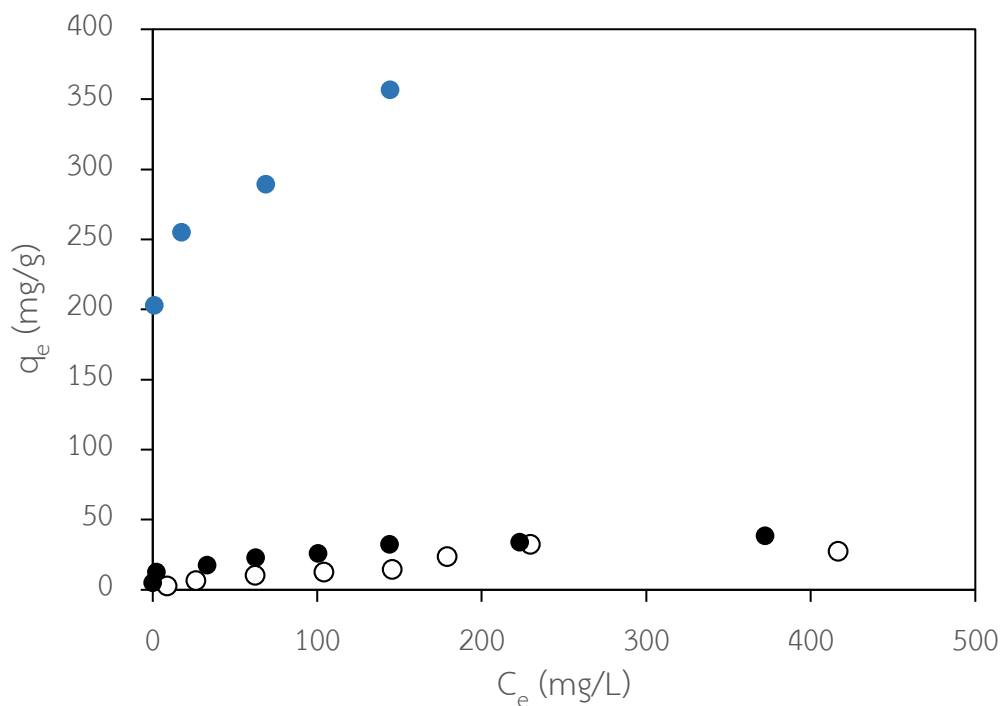


ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน และอันดับสองเสมือน ของการดูดซับสีย้อม Rhodamine b

Kinetic parameters	Raw sludge	Sludge char	ASC_KOH_3:1
$q_{e \text{ exp}} \text{ (mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{)}$	13.4	22.59	199.86
<i>Pseudo-first order</i>			
$q_{e \text{ cal}} \text{ (mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{)}$	9.663	9.099	148.627
$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	3.52×10^{-2}	2.72×10^{-2}	6.20×10^{-2}
R^2	0.843	0.689	0.958
<i>Pseudo-second order</i>			
$q_{e \text{ cal}} \text{ (mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{)}$	13.568	22.472	204.082
$k_2 \text{ (g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}\text{)}$	1.08×10^{-2}	1.67×10^{-2}	1.45×10^{-3}
R^2	0.997	0.999	0.992

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม Rhodamine b ของตัวดูดซับ Raw sludge, Sludge char และ ASC_KOH_3:1

Raw sludge		Sludge char		ASC_KOH_3:1	
Time (min)	qt (mg/g)	Time (min)	qt (mg/g)	Time (min)	qt (mg/g)
0.30	1.33	0.20	13.88	0.28	40.37
2.14	1.96	2.03	16.77	3.27	68.19
3.00	5.19	3.04	13.79	5.20	84.43
5.30	6.58	4.03	17.03	7.45	99.63
12.40	8.09	10.29	15.26	10.48	104.91
20.32	10.73	20.02	18.83	19.58	107.13
30.37	10.63	30.40	18.58	30.20	107.13
60.40	11.82	66.16	20.89	60.00	107.13
120.00	13.40	117.00	22.59	121.00	107.13
184.15	12.91	180.00	22.10	180.00	107.13



รูปที่ ค.2 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม Rhodamine b ของตัวดูดซับ Raw sludge, Sludge char และ ASC_KOH_3:1

ตารางที่ ค.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดลิช ของการดูดซับสีย้อม Rhodamine b

ตัวดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	q_m (mg·g ⁻¹)	B (L·mg ⁻¹)	R ²	K_F mg·g ⁻¹ ·(L·mg ⁻¹) ^{1/n}	n	R ²
Raw sludge	25.44	0.014	0.9844	0.739	1.577	0.9495
Sludge char	27.55	0.339	0.7569	9.209	4.292	0.9397
ASC_KOH_3:1	303.03	2.200	0.7707	198.34	9.719	0.9309

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม Rhodamine b ของตัวดูดซับ Raw sludge, Sludge char และ ASC_KOH_3:1

Raw Sludge			Sludge char			ASC_KOH_3:1		
C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_i (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)
19.86	8.72	2.78	19.86	0.02	4.96	203.94	0.96	202.98
51.58	26.21	6.34	51.58	2.32	12.32	272.82	17.65	255.17
102.92	62.51	10.10	102.92	33.28	17.41	358.11	68.75	289.36
154.01	104.15	12.46	154.01	62.61	22.85	500.78	144.32	356.46
203.94	145.83	14.53	203.94	100.66	25.82			
272.82	179.04	23.45	272.82	144.03	32.20			
358.11	229.55	32.14	358.11	223.07	33.76			
526.14	416.86	27.32	526.14	372.35	38.45			



บรรณานุกรม

- Abramian, L., El-Rassy, H. 2009. Adsorption kinetics and thermodynamics of azo-dye Orange II onto highly porous titania aerogel. *Chemical Engineering Journal*, **150**(2), 403-410.
- Ahmaruzzaman, M. 2008. Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **143**(1), 48-67.
- Aivalioti, M., Papoulias, P., Kousaiti, A., Gidarakos, E. 2012. Adsorption of BTEX, MTBE and TAME on natural and modified diatomite. *Journal of Hazardous Materials*, **207-208**, 117-127.
- Akgerman, A., Zardkoohi, M. 1996. Adsorption of Phenolic Compounds on Fly Ash. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **41**(2), 185-187.
- Al-Malack, M.H., Dauda, M. 2017. Competitive adsorption of cadmium and phenol on activated carbon produced from municipal sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**(3), 2718-2729.
- Al-Qodah, Z., Lafi, W.K., Al-Anber, Z., Al-Shannag, M., Harahsheh, A. 2007. Adsorption of methylene blue by acid and heat treated diatomaceous silica. *Desalination*, **217**(1), 212-224.
- Anku, W.W., Mamo, M.A., Govender, P.P. 2017. Phenolic Compounds in Water: Sources, Reactivity, Toxicity and Treatment Methods. in: *Phenolic Compounds - Natural Sources, Importance and Applications*, (Eds.) M. Soto-Hernandez, M. Palma-Tenango, M.d.R. Garcia-Mateos, InTech. Rijeka, pp. Ch. 17.
- Arik, H. 2003. Synthesis of Si₃N₄ by the carbo-thermal reduction and nitridation of diatomite. *Journal of the European Ceramic Society*, **23**(12), 2005-2014.
- Babel, S., Kurniawan, T.A. 2003. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*, **97**(1), 219-243.
- Bakr, H. 2010. Diatomite: its characterization, modifications and applications. *Asian journal of materials science*, **2**(3), 121-136.
- Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Rodklum, C., Chaikwan, T., Kumphan, N. 2012. Continuous Process for Biodiesel Production in Packed Bed Reactor from Waste

- Frying Oil Using Potassium Hydroxide Supported on *Jatropha curcas* Fruit Shell as Solid Catalyst. *Applied Sciences*, **2**(3), 641.
- Calace, N., Nardi, E., Petronio, B.M., Pietroletti, M. 2002. Adsorption of phenols by papermill sludges. *Environmental Pollution*, **118**(3), 315-319.
- Caliskan, N., Kul, A.R., Alkan, S., Sogut, E.G., Alacabey, İ. 2011. Adsorption of Zinc(II) on diatomite and manganese-oxide-modified diatomite: A kinetic and equilibrium study. *Journal of Hazardous Materials*, **193**, 27-36.
- Chan, Y.J., Chong, M.F., Law, C.L., Hassell, D.G. 2009. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **155**(1), 1-18.
- Chanaka Udayanga, W.D., Veksha, A., Giannis, A., Lim, T.-T. 2019. Pyrolysis derived char from municipal and industrial sludge: Impact of organic decomposition and inorganic accumulation on the fuel characteristics of char. *Waste Management*, **83**, 131-141.
- Cheng, F., Luo, H., Hu, L., Yu, B., Luo, Z., Fidalgo de Cortalezzi, M. 2016. Sludge carbonization and activation: From hazardous waste to functional materials for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **4**(4, Part A), 4574-4586.
- Cooney, D.O. 1999. *Adsorption design for wastewater treatment*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. .
- da Silva Lacerda, V., López-Sotelo, J.B., Correa-Guimarães, A., Hernández-Navarro, S., Sánchez-Báscones, M., Navas-Gracia, L.M., Martín-Ramos, P., Martín-Gil, J. 2015. Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. *Journal of Environmental Management*, **155**, 67-76.
- David, E. 2015. *Mechanical strength and reliability of the porous materials used as adsorbents/ catalysts and the new development trends*.
- Devi, P., Saroha, A.K. 2016. Improvement in performance of sludge-based adsorbents by controlling key parameters by activation/modification: A critical review. *Critical reviews in environmental science and technology*, **46**(21-22), 1704-1743.
- Dobor, J., Perényi, K., Varga, I., Varga, M. 2015. A new carbon-diatomite earth composite adsorbent for removal of heavy metals from aqueous solutions and a novel

- application idea. *Microporous and Mesoporous Materials*, **217**, 63-70.
- Du, Y., Wang, X., Wu, J., Qi, C., Li, Y. 2018. Adsorption and photoreduction of Cr(VI) via diatomite modified by Nb₂O₅ nanorods. *Particuology*, **40**, 123-130.
- Dursun, A.Y., Kalayci, Ç.S. 2005. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of phenol onto chitin. *Journal of Hazardous Materials*, **123**(1), 151-157.
- Ediz, N., Bentli, İ., Tatar, İ. 2010. Improvement in filtration characteristics of diatomite by calcination. *International Journal of Mineral Processing*, **94**(3), 129-134.
- ElShafei, G.M.S., ElSherbiny, I.M.A., Darwish, A.S., Philip, C.A. 2017. Artichoke as a non-conventional precursor for activated carbon: Role of the activation process. *Journal of Taibah University for Science*, **11**(5), 677-688.
- Fan, S., Wang, Y., Wang, Z., Tang, J., Tang, J., Li, X. 2017. Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**(1), 601-611.
- Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P., Daufin, G. 2006. Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, **14**(5), 463-471.
- Folgueras, M.B., Díaz, R.M., Xiberta, J., Prieto, I. 2003. Volatilisation of trace elements for coal-sewage sludge blends during their combustion☆. *Fuel*, **82**(15-17), 1939-1948.
- Gao, B., Jiang, P., An, F., Zhao, S., Ge, Z. 2005. Studies on the surface modification of diatomite with polyethyleneimine and trapping effect of the modified diatomite for phenol. *Applied Surface Science*, **250**(1), 273-279.
- Gulnaz, O., Kaya, A., Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. *Journal of Hazardous Materials*, **134**(1), 190-196.
- Hadjar, H., Hamdi, B., Ania, C.O. 2011. Adsorption of p-cresol on novel diatomite/carbon composites. *Journal of Hazardous Materials*, **188**(1), 304-310.
- Hameed, B.H., Rahman, A.A. 2008. Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from biomass material. *Journal of*

Hazardous Materials, **160**(2), 576-581.

Harza, M.W., Crittenden, J. 2005. *Water treatment principles and design*. New York : Wiley, c2005.

2nd ed.

Hwang, H.-R., Choi, W.-J., Kim, T.-J., Kim, J.-S., Oh, K.-J. 2008. The preparation of an adsorbent from mixtures of sewage sludge and coal-tar pitch using an alkaline hydroxide activation agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **83**(2), 220-226.

Ilija, I., Stamatakis, M., S. Perraki, T. 2009. *Mineralogy and technical properties of clayey diatomites from north and central Greece*.

Iliescu, M., Farago, M., Popa, M., Cristea, M. 2009. Reuse of residual Kieselguhr from beer filtration as a fertiliser. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, **10**(1), 156-162.

Khraisheh, M.A.M., Al-degs, Y.S., McMinn, W.A.M. 2004. Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite. *Chemical Engineering Journal*, **99**(2), 177-184.

LaGrega, M.D. 1994. *Hazardous waste management / Michael D. LaGrega, Phillip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans*. McGraw-Hill, New York.

Li, G., Feng, Y., Zhu, W., Zhang, X. 2015a. *Enhanced adsorptive performance of tetracycline antibiotics on lanthanum modified diatomite*.

Li, X., Li, W.-g., Wang, G.-z., Wang, P., Gong, X.-j. 2015b. Preparation, characterization, and application of sludge with additive scrap iron-based activated carbons. *Desalination and Water Treatment*, **54**(4-5), 1194-1203.

Lin, Q.H., Cheng, H., Chen, G.Y. 2012. Preparation and characterization of carbonaceous adsorbents from sewage sludge using a pilot-scale microwave heating equipment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **93**, 113-119.

Martinovic, S., Vlahovic, M., Boljanac, T., Pavlovic, L. 2006. Preparation of filter aids based on diatomites. *International Journal of Mineral Processing*, **80**(2), 255-260.

Méndez, A., Barriga, S., Saa, A., Gascó, G. 2010. Removal of malachite green by adsorbents from paper industry waste materials. *Journal of Thermal Analysis*

and Calorimetry, **99**(3), 993-998.

- Monsalvo, V.M., Mohedano, A.F., Rodriguez, J.J. 2011. Activated carbons from sewage sludge: Application to aqueous-phase adsorption of 4-chlorophenol. *Desalination*, **277**(1), 377-382.
- Nuilerd, T., Pongyeela, P., Chungsiriporn, J. 2018. Pellet activated carbon production using parawood charcoal from gasifier by KOH activation for adsorption of iron in water. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, **40**(2), 264-270.
- Orlandi, G., Cavasotto, J., Machado, F.R.S., Colpani, G.L., Magro, J.D., Dalcanton, F., Mello, J.M.M., Fiori, M.A. 2017. An adsorbent with a high adsorption capacity obtained from the cellulose sludge of industrial residues. *Chemosphere*, **169**, 171-180.
- Otero, M., Rozada, F., Calvo, L.F., García, A.I., Morán, A. 2003. Elimination of organic water pollutants using adsorbents obtained from sewage sludge. *Dyes and Pigments*, **57**(1), 55-65.
- Piyasin, S. 1978. Geological report of petroleum drillhole IL-3 (15). *Lampang Basin project, Division of Exploration and Production, Defence Energy Department, Ministry of Defence, Bangkok*, 98.
- Ren, Z., Gao, H., Zhang, H., Liu, X. 2014. Effects of fluxes on the structure and filtration properties of diatomite filter aids. *International Journal of Mineral Processing*, **130**, 28-33.
- Robinson, L.N. 2008. *Water resources research progress*. Nova Science Publishers.
- Ros, A., Lillo-Ródenas, M.A., Fuente, E., Montes-Morán, M.A., Martín, M.J., Linares-Solano, A. 2006. High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors. *Chemosphere*, **65**(1), 132-140.
- Rozada, F., Otero, M., Morán, A., García, A.I. 2005. Activated carbons from sewage sludge and discarded tyres: Production and optimization. *Journal of Hazardous Materials*, **124**(1), 181-191.
- Samolada, M.C., Zabaniotou, A.A. 2014. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*, **34**(2), 411-420.
- Sellaoui, L., Kehili, M., Lima, E.C., Thue, P.S., Bonilla-Petriciolet, A., Lamine, A.B., Dotto,

- G.L., Erto, A. 2019. Adsorption of phenol on microwave-assisted activated carbons: Modelling and interpretation. *Journal of Molecular Liquids*, **274**, 309-314.
- Shen, Y., Fu, Y. 2018. KOH-activated rice husk char via CO₂ pyrolysis for phenol adsorption. *Materials Today Energy*, **9**, 397-405.
- Sheng, G., Johnston, C.T., Teppen, B.J., Boyd, S.A. 2002. Adsorption of dinitrophenol herbicides from water by montmorillonites. *Clays and Clay Minerals*, **50**(1), 25-34.
- Shesterenko, Y.A., Sevast'yanov, O.V., Romanovskaya, I.I. 2012. Removal of phenols from aqueous solutions using tyrosinase immobilized on polymer carriers and inorganic coagulants. *Journal of Water Chemistry and Technology*, **34**(2), 107-111.
- Shichi, T., Takagi, K. 2000. Clay minerals as photochemical reaction fields. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, **1**(2), 113-130.
- Silva, T.L., Ronix, A., Pezoti, O., Souza, L.S., Leandro, P.K.T., Bedin, K.C., Beltrame, K.K., Cazetta, A.L., Almeida, V.C. 2016. Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. *Chemical Engineering Journal*, **303**, 467-476.
- Smith, K.M., Fowler, G.D., Pullket, S., Graham, N.J.D. 2009. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Research*, **43**(10), 2569-2594.
- Streat, M., Patrick, J.W., Perez, M.J.C. 1995. Sorption of phenol and para-chlorophenol from water using conventional and novel activated carbons. *Water Research*, **29**(2), 467-472.
- Teng, W.L., Khor, E., Tan, T.K., Lim, L.Y., Tan, S.C. 2001. Concurrent production of chitin from shrimp shells and fungi. *Carbohydrate Research*, **332**(3), 305-316.
- Tocharoen, S., Atong, D., Sricharoenchaikul, V. 2019. Utilization of Sewage Sludge from Beverage Industry as Dye Adsorption Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. pp. 012015.
- Tran, H.N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharai, A., Chao, H.-P. 2017. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A

- critical review. *Water Research*, **120**, 88-116.
- Wang, X., Liang, X., Wang, Y., Wang, X., Liu, M., Yin, D., Xia, S., Zhao, J., Zhang, Y. 2011. Adsorption of Copper (II) onto activated carbons from sewage sludge by microwave-induced phosphoric acid and zinc chloride activation. *Desalination*, **278**(1), 231-237.
- Weber, W.J., Smith, E.H. 1987. Simulation and design models for adsorption processes. *Environmental Science & Technology*, **21**(11), 1040-1050.
- Wong, S., Yac'cob, N.A.N., Ngadi, N., Hassan, O., Inuwa, I.M. 2017. From pollutant to solution of wastewater pollution: Synthesis of activated carbon from textile sludge for dye adsorption. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.
- Wong, S., Yac'cob, N.A.N., Ngadi, N., Hassan, O., Inuwa, I.M. 2018. From pollutant to solution of wastewater pollution: Synthesis of activated carbon from textile sludge for dye adsorption. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **26**(4), 870-878.
- Worch, E. 2012. *Adsorption Technology in Water Treatment : Fundamentals, Processes, and Modeling*. De Gruyter, Berlin.
- Wu, W.-L., Chen, Z. 2017. Modified-diatomite reinforced rubbers. *Materials Letters*, **209**, 159-162.
- Xu, G., Yang, X., Spinoso, L. 2015. Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *Journal of Environmental Management*, **151**, 221-232.
- Yang, X., Jiang, Y., Su, R., Yang, G., Xue, B., Li, F. 2016. Effects of cellulose carbonization on biomass carbon and diatomite composite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **509**, 314-322.
- Yuan, P., Wu, D., He, H., Lin, Z. 2004. The hydroxyl species and acid sites on diatomite surface: a combined IR and Raman study. *Applied Surface Science*, **227**(1-4), 30-39.
- Zhang, H., Ma, X., Kang, H., Hong, L., Wang, R. 2013a. The enantioselective formal synthesis of rhynchophylline and isorhynchophylline. *Chemistry - An Asian Journal*, **8**(3), 542-545.
- Zhang, J., Ping, Q., Niu, M., Shi, H., Li, N. 2013b. Kinetics and equilibrium studies from

the methylene blue adsorption on diatomite treated with sodium hydroxide. *Applied Clay Science*, **83-84**, 12-16.

Zheng, R., Ren, Z., Gao, H., Zhang, A., Bian, Z. 2018. Effects of calcination on silica phase transition in diatomite. *Journal of Alloys and Compounds*, **757**, 364-371.

Zou, J., Dai, Y., Wang, X., Ren, Z., Tian, C., Pan, K., Li, S., Abuobeidah, M., Fu, H. 2013. Structure and adsorption properties of sewage sludge-derived carbon with removal of inorganic impurities and high porosity. *Bioresource Technology*, **142**, 209-217.

เชิดศักดิ์ อรรถอรุณ. 2544. การสำรวจและวิจัยคุณสมบัติของดินเบาลำปางเพื่องานด้านสิ่งแวดล้อม. กองเศรษฐศาสตร์วิทยา กรมทรัพยากรธรณี.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิรภาพ โตเจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	1 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ชีววิทยา)
ที่อยู่ปัจจุบัน	16 ม.5 ต.แปลงยาว อ.แปลงยาว จ.ฉะเชิงเทรา 24190



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY