

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน

REMOVAL OF PHENOL SOLUTION BY SLUDGE FROM MUNICIPAL
WASTEWATER TREATMENT PLANT



เกศินี พุกานนท์

KAESINEE PAKULANONT

จน
ก ๗๗๓ ก
๒๕๔๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

60534

- 3 ก.ศ. 2549

b.....11๕๘๗๒๓๔.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๔๘

ISBN 974-15-1458-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**REMOVAL OF PHENOL SOLUTION BY SLUDGE FROM MUNICIPAL
WASTEWATER TREATMENT PLANT**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1458-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน
นักศึกษา	นางสาวเกศิณี พุกถานนท์
รหัสประจำตัว	45064504
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ประโยชน์ของสลัดจ์ชุมชนในการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยได้ทำการศึกษาสมบัติของสลัดจ์ สภาพที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ไอโซเทอร์ม การคายซับ จลนพลศาสตร์ อิทธิพลของทองแดงและสังกะสีต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล และกลไกของกระบวนการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ ผลการศึกษาพบว่า สลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความชื้น 11.26% พีเอช 6.83 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 44.52 m²/g มีสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 25.60 mgC/g และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน(CEC) 38.18 meq/100g ซึ่งสารละลายสลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองยังมีเซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ ทั้งนี้ส่วนประกอบหลักของสลัดจ์คือซิลิการ้อยละ 35.80 มีทองแดงและสังกะสีจะละลายออกมาจากสลัดจ์ โดยสภาพที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารละลายฟีนอลคือสลัดจ์ขนาดเล็กกว่า 75 µm ปริมาณสลัดจ์ 0.05 กรัม ฟีนอลความเข้มข้น 125 mg/l ที่พีเอช 6 เวลาที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที และเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยภายใต้สภาพที่เหมาะสม ฟีนอลถูกกำจัดไปร้อยละ 97.37 สมดุลการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช การคายซับของฟีนอลในสลัดจ์ที่ผ่านการดูดซับมาแล้วมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 9 ในทุกระยะเวลาการดูดซับ จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดฟีนอลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบอันดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามพบว่าทองแดงและสังกะสีมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ทั้งนี้ทองแดงมีผลขัดขวางการกำจัดสารละลายฟีนอลมากกว่าสังกะสี นอกจากนี้การศึกษากลไกของกระบวนการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์พบว่า สลัดจ์ที่เซลล์มีชีวิตมีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมากกว่าสลัดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว ในทุกความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล

คำสำคัญ: ตัวดูดซับสารอินทรีย์ สลัดจ์ ฟีนอล การดูดซับ การดูดซับทางชีวภาพ

Thesis Title	Removal of Phenol Solution by Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant
Student	Ms. Kaesine Pakulanont
Student ID	45064504
Degree	Master of Science
Programme	Environmental Chemistry
Year	2005
Thesis Advisor	Dr. Usarat Thawornchaisit

ABSTRACT

This research studied the application of sewage sludge on removal of phenol from aqueous solution. The study included properties of sludge, optimal conditions on removal of phenol solution. Isotherm, desorption, kinetic, influence of copper and zinc on removal of phenol solution, and the mechanism of phenol removal process by sludge were also investigated. The results showed that sludge used in this study had the moisture content of 11.26%, pH of 6.83, specific surface area of 44.52 m²/g, total organic carbon of 25.60 mgC/g, and the cation exchange capacity(CEC) of 38.18 meq/100g. In addition, sludge solution used in this experiment contained viable microorganism cells. A major component of this sludge was silicon (35.80%). IT was found that copper and zinc were leached from sludge. The results showed that the optimal conditions for phenol removal by this sludge were particle size of sludge less than 75 µm, sludge dosage of 0.05 g, phenol concentration of 125 mg/l, at pH 6, shaking at 125 rpm, and incubation for 24 hours under the optimum conditions, phenol was removed 97.37(±3.05)%. The adsorption equilibrium can be described by Freundlich isotherm. Desorption of phenol from sludge was less than 9% in every adsorption time. The kinetic of phenol removal reaction could be well described by the first-order equation. However, copper and zinc had significant influence on removal of phenol solution, in which copper had a greater obstacle on removal of phenol than zinc. Furthermore, the study on mechanism of phenol removal process by sludge was found that sludge containing viable cells were able to remove phenol solution more than sludge containing dead cells in every phenol concentrations.

Keywords: Organic sorbents, Sludge, Phenol, Adsorption, Biosorption

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา คร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนท ไชยรักษ์ และ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวช หัวหน้าภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำ ความถูกต้อง และเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณอนุชา และคุณปริยดา ตลอดจนเจ้าหน้าที่โรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม-เกษิเจริญ-ราษฎร์บูรณะ ที่อนุเคราะห์ข้อมูล และตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ ที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องปั้นเหยียงความเร็วสูง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี ตลอดจนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า และครอบครัววงษ์พันธุ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และเป็นกำลังใจตลอดมา

เกศิณี พุกถานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฟีนอล.....	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี.....	4
2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม.....	5
2.1.3 การย่อยสลายและการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ.....	6
2.1.4 ความเป็นพิษ.....	8
2.2 การบำบัดฟีนอลในน้ำ.....	9
2.2.1 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ.....	9
2.2.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	10
2.2.3 การดูดซับ.....	10
2.3 มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	10
2.4 สลัดจ์.....	11
2.4.1 ประเภทของสลัดจ์.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสตัคจ์.....	12
2.4.3 จุลชีววิทยาของสตัคจ์.....	13
2.4.4 กระบวนการบำบัดสตัคจ์.....	14
2.4.5 การใช้ประโยชน์ของสตัคจ์.....	17
2.4.6 มาตรการและกฎหมายเกี่ยวกับสตัคจ์.....	20
2.5 กระบวนการดูดซับ.....	20
2.5.1 ประเภทของตัวดูดซับ.....	20
2.5.2 กลไกของกระบวนการดูดซับ.....	21
2.5.3 แรงเหวี่ยงนำที่เกี่ยวกับการดูดซับ.....	21
2.5.4 ประเภทของการดูดซับ.....	22
2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ.....	23
2.5.6 การดูดซับทางชีวภาพ.....	24
2.5.7 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	26
2.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	30
2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับศูนย์.....	31
2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง.....	32
2.6.3 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง.....	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	36
3.1.1 อุปกรณ์.....	36
3.1.2 สารเคมี.....	37
3.2 การเตรียมสารเคมี.....	37
3.3 แหล่งที่มาของสตัคจ์.....	38
3.4 การเตรียมสารละลายสตัคจ์.....	39
3.5 การศึกษาสมบัติของสตัคจ์.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	40
3.6.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสัณฐาน.....	40
3.6.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า.....	40
3.6.3 ศึกษาผลของพีเอช.....	40
3.6.4 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส.....	41
3.6.5 ศึกษาผลของปริมาณสัณฐานและความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล.....	41
3.7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	42
3.8 การศึกษาการคายซับ (desorption)	42
3.9 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic).....	42
3.10 การศึกษาอิทธิพลโลหะชะละลายจากสัณฐานต่อการกำจัดฟีนอล.....	43
3.11 การศึกษาสัดส่วนของกลไกการดูดซับฟีนอลด้วยสัณฐานที่เซนต์คายแล้ว.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
4.1 ลักษณะและสมบัติของสัณฐาน.....	44
4.1.1 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคสัณฐาน.....	45
4.1.2 ลักษณะของสัณฐาน.....	45
4.1.3 สมบัติของสัณฐาน.....	46
4.2 สภาพที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัณฐาน.....	49
4.2.1 ขนาดอนุภาคของสัณฐาน.....	49
4.2.2 ความเร็วรอบสัมผัส.....	50
4.2.3 ค่าพีเอช.....	52
4.2.4 ระยะเวลาสัมผัส.....	53
4.2.5 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลและปริมาณสัณฐาน.....	55
4.2.6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการกำจัด.....	57
4.3 การคายซับของสัณฐานที่ผ่านการดูดซับฟีนอล.....	58
4.4 จลนพลศาสตร์ของการกำจัด.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 อิทธิพลของโลหะหนักต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	60
4.5.1 อิทธิพลของการปนเปื้อนโลหะ 1 ชนิด	60
4.5.2 อิทธิพลของการปนเปื้อนโลหะผสม.....	64
4.6 สัดส่วนของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัคคิง.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองด้านลักษณะและสมบัติของสัคคิง.....	78
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองของการใช้สัคคิงกำจัดสารละลายฟีนอล.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.6 ปริมาณโลหะทั้งหมดและโลหะชะละลายในสลัดจ์.....	80
ข.1 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ขนาดต่างๆ.....	81
ข.2 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	81
ข.3 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	82
ข.4 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	82
ข.5 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ปริมาณต่างๆ.....	83
ข.6 สมดุลไอโซเทอร์มแบบฟรุนคลิช.....	85
ข.7 การคายฟีนอลหลังจากศึกษาการกำจัดที่ระยะเวลาต่างๆ.....	85
ข.8 จลนพลศาสตร์การใช้สลัดจ์กำจัดสารละลายฟีนอล.....	85
ข.9 อิทธิพลของทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์.....	86
ข.10 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงด้วยสลัดจ์.....	86
ข.11 อิทธิพลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์.....	87
ข.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีด้วยสลัดจ์.....	87
ข.13 อิทธิพลของโลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	88
ข.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีของสลัดจ์.....	88
ข.15 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสลัดจ์.....	88
ข.16 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลความเข้มข้นต่างๆด้วยสลัดจ์ที่มีเซลล์มีชีวิต.....	89
ข.17 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลความเข้มข้นต่างๆด้วยสลัดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

รูปที่	หน้า
2.1 การแตกตัวของฟีนอลในน้ำ.....	5
2.2 การกระจายตัวของฟีนอล.....	6
2.3 กระบวนการย่อยสลายฟีนอล โดยจุลินทรีย์	7
2.4 ขั้นตอนการบำบัดสลัดจ์.....	15
2.5 กลไกของการเคลื่อนตัวในกระบวนการดูดซับ.....	21
2.6 ลักษณะเส้น ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ.....	27
2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	29
2.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	30
2.9 อันดับของปฏิกิริยาเป็นศูนย์.....	32
2.10 อันดับของปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง.....	33
2.11 อันดับของปฏิกิริยาเป็นสอง.....	34
4.1 ลักษณะทั่วไปของสลัดจ์.....	44
4.2 สลัดจ์ที่ผ่าน(ก) การอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ(ข) การบดให้ละเอียด.....	45
4.3 ลักษณะทางกายภาพของสลัดจ์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	46
4.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคสลัดจ์ต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	50
4.5 อิทธิพลของความเร็วรอบสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	51
4.6 อิทธิพลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	52
4.7 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล.....	54
4.8 อิทธิพลของความเข้มข้นฟีนอลต่อความสามารถในการกำจัด เมื่อใช้สลัดจ์ปริมาณต่างๆ..	55
4.9 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการใช้สลัดจ์กำจัดสารละลายฟีนอล.....	57
4.10 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์.....	59
4.11 อิทธิพลของโลหะทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลของสลัดจ์.....	60
4.12 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและโลหะทองแดงของสลัดจ์.....	61
4.13 อิทธิพลของโลหะสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลของสลัดจ์.....	63
4.14 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและโลหะสังกะสีของสลัดจ์.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 อิทธิพลของโลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล	65
4.16 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและโลหะผสมสังกะสีและทองแดงของสลัดจ์.....	66
4.17 สัดส่วนของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
LD ₅₀	(Lethal Dose) หมายถึง ปริมาณสารพิษที่ทำให้สัตว์ทดลองตายร้อยละ 50
EC ₅₀	(Effective Concentration) หมายถึง ความเป็นพิษระดับหนึ่งของสารพิษ ที่มีผลต่อสัตว์ทดลองร้อยละ 50 ในลักษณะอื่นๆ เช่น ยับยั้งการเจริญเติบโต และยับยั้งกระบวนการหายใจ เป็นต้น
%ThOD	(Theoretical Oxygen Demand) หมายถึง ความต้องการออกซิเจนที่คำนวณจากสมการเคมีระหว่างออกซิเจน กับสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ทราบสูตร โมเลกุลแน่นอน
%TS	(% Total Solid) ของแข็งทั้งหมดในหน่วยร้อยละ
%dry basis	น้ำหนักแห้งในหน่วยร้อยละ
q	ปริมาณสารที่ถูกกำจัดต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C ₀	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)
C _t	ความเข้มข้นหลังผ่านกระบวนการกำจัดที่ระยะเวลาต่างๆ (mg/l)
mm	มิลลิเมตร
mg	มิลลิกรัม
μg/g	ไมโครกรัมต่อกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
ml	มิลลิลิตร
μg/l	ไมโครกรัมต่อลิตร
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
g/l	กรัมต่อลิตร
g/mol	กรัมต่อโมล
mg/m ³	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
kg/m ²	กิโลกรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ฟีนอลจัดเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ฟีนอลเป็นสาเหตุสำคัญในการก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและรสที่ไม่พึงประสงค์ในแหล่งน้ำ การปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นเพียง 0.15 mg/l สามารถทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและรสในแหล่งน้ำได้ [1] วิธีที่นิยมใช้กำจัดฟีนอลในปัจจุบันคือ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อจำกัดด้านราคา และต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration process) ข่ากข้อจำกัดนี้เอง จึงเกิดแนวความคิดที่จะศึกษาเพื่อหาวิธีกำจัดประเภทอื่นที่มีราคาถูกกว่า หาได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียงหรือเทียบเท่าถ่านกัมมันต์มาใช้ในการกำจัดสารฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ

สลัดจ์ (Sludge) เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย จัดเป็นของเสียที่ต้องนำไปกำจัดก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม [2] โดยกองจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร คาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2563 สลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียจะมีปริมาณสูงถึง 1.83 ล้านตันต่อปี โดยน้ำหนักแห้ง หรือคิดเป็น 9.62 กรัมสลัดจ์แห้งต่อคนต่อวัน [3] ปัจจุบันจึงมีความพยายามนำสลัดจ์จำนวนมากนี้ไปใช้ประโยชน์ เช่น การนำสลัดจ์ไปทำปุ๋ยอินทรีย์ นำไปเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ แต่การกระทำดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านเชื้อโรค ปริมาณโลหะ และสารพิษปนเปื้อน ที่อาจปนเปื้อน และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอื่น

คณะวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำสลัดจ์มาเป็นตัวกำจัดสารชนิดต่างๆที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น Aksu [4] ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์สลัดจ์ในการดูดซับสี้อมประเภทรีแอคทีฟพบว่า สลัดจ์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟเยลโล 2 (Reactive yellow 2) และรีแอคทีฟบลู 2 (Reactive blue 2) ได้สูงสุด 333.3 และ 250.0 mg/g ตามลำดับ และ Gulnaz *et al.* [5] ศึกษาการนำสลัดจ์มาใช้ในการดูดซับสี้อมประเภทเบสิกพบว่า สลัดจ์มีความสามารถในการดูดซับสี้อมเบสิกเรด 18 (Basic red 18) และเบสิคบลู 9 (Basic blue 9) ได้สูงที่สุด 285.71 และ 256.41 mg/g ตามลำดับ Aksu and Yener [6] ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ สลัดจ์ และถ่านลอย ในการดูดซับอนุพันธ์ฟีนอลพบว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือสลัดจ์ และถ่านลอยกำจัดได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการใช้สลัดจ์ในการกำจัดโลหะคั่งด้วยอย่างเช่น Kim *et al.* [7] เปรียบเทียบการกำจัดนิเกิล ทองแดง และแคดเมียม ด้วยสลัดจ์พบว่า กำจัดทองแดง แคดเมียม และนิเกิล ได้สูงที่สุด 33 18 และ 2.5 mg/g ตามลำดับ และ Hammaini *et al.* [8] ศึกษาการใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศสเปน ในการดูดซับโลหะ ทองแดง แคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมระหว่างโลหะทองแดงกับแคดเมียม ทองแดงกับสังกะสี และแคดเมียมกับสังกะสีพบว่า สลัดจ์มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงสูงที่สุด รองลงมาคือแคดเมียม และสังกะสี ตามลำดับ

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสลัดจ์ในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้สลัดจ์มากำจัดฟีนอล รวมถึงสลัดจ์มีปริมาณมาก หาได้ง่าย และยังคงต้องการการศึกษาถึงแนวทางการใช้ประโยชน์ ดังนั้นการนำสลัดจ์มากำจัดสารละลายฟีนอลจึงเป็นทางเลือกที่ควรพิจารณา เพื่อประยุกต์ใช้สลัดจ์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติและลักษณะของสลัดจ์
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์
3. ศึกษาการคายซับ (desorption) ของสลัดจ์ที่ผ่านการดูดซับฟีนอล
4. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์
5. ศึกษาอิทธิพลของโลหะที่จะละลายจากสลัดจ์ต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล
6. ศึกษาสัดส่วนของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่มีเซลล์จุลินทรีย์มีชีวิต และสลัดจ์ที่เซลล์จุลินทรีย์ตายแล้ว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสมบัติและลักษณะของสลัดจ์ ได้แก่ ความชื้น ค่าพีเอช พื้นที่ผิว ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด โลหะหนักจะละลาย และ โลหะหนักทั้งหมด
2. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ โดยใช้วิธีการกำจัดแบบแบทช์ ป้อนที่ศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของสลัดจ์ ความเร็วรอบสัมผัส ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณสลัดจ์ และความเข้มข้นฟีนอล โดยใช้สารละลายฟีนอลสังเคราะห์
3. ศึกษาการคายซับของฟีนอลจากสลัดจ์ที่ผ่านการดูดซับฟีนอลมาแล้ว ในระยะเวลาการดูดซับต่างๆ คือ 1 2 4 6 24 และ 48 ชั่วโมง
4. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการใช้สลัดจ์กำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 50 mg/l ในสภาวะที่เหมาะสม ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาอิทธิพลของโลหะที่ชะละลายจากสลักด์ต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ แบบแรกศึกษาอิทธิพลของโลหะ 1 ชนิดได้แก่ ทองแดงและสังกะสี แบบที่สองศึกษาอิทธิพลของโลหะผสมทองแดงและสังกะสี
6. ศึกษาสัดส่วนของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลักด์ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างสลักด์ที่มีเซลล์จูลินทรีย์มีชีวิตและสลักด์ที่เซลล์จูลินทรีย์ตายแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความเป็นไปได้ในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลักด์
2. ทราบกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลักด์
3. เป็นทางเลือกในการกำจัดฟีนอลด้วยต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพ
4. เป็นแนวทางการใช้ประโยชน์สลักด์ และเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า โดยนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลของโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟีนอล

ฟีนอลเป็นสารเคมีที่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของยาฆ่าเชื้อ (Disinfectant) ใช้สังเคราะห์สารเรซิน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยารักษาโรค ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น สามารถพบฟีนอลได้ในโรงงานผลิตกระดาษ โรงงานฟอกเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตเหล็ก โรงงานฟอกหนัง โรงงานอลูมิเนียม โรงหล่อโลหะ การผลิตสี การผลิตตัวทำละลาย และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม การปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนฟีนอลของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนฟีนอลลงสู่แหล่งน้ำ [9] ซึ่งการปล่อยฟีนอลทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5-500 mg/l [10] นอกจากนี้ฟีนอลยังสามารถพบได้ในของเสียจากสัตว์ และการย่อยสลายน้ำเสียของจุลินทรีย์ โดยพบว่าฟีนอลสามารถกำจัดออกจากร่างกายมนุษย์ทั้งทางปัสสาวะ และอุจจาระในปริมาณ 0.2-6.6 และ 0-3 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักคน 1 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ สำหรับหญิงถึงแม้ว่าจะมีปริมาณน้อย แต่ก็มีฟีนอลในปริมาณ 2-8 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร [1]

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and chemical properties)

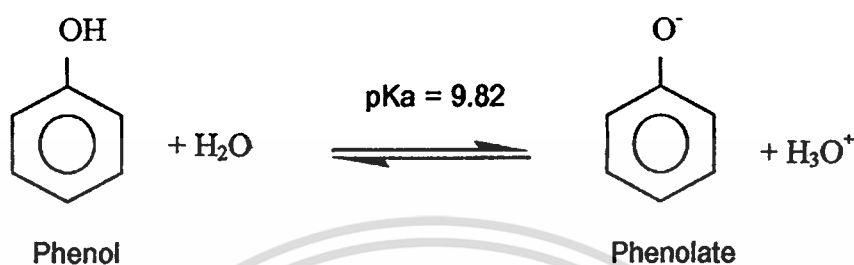
ฟีนอลมีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสีหรือสีขาว มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว สามารถดูดความชื้นและละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน อาจเรียกว่ากรดคาร์โบลิก (Carbolic acid) [9] ละลายได้ดีในเอทานอล ไดเอทิลอีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม สมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของฟีนอลสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอล [11]

สมบัติ	ค่า
สูตรเคมี	C_6H_6O
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	94
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	181.9
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	40.6
ความดันไอ (P° ; atm)	2.6×10^{-4} (ของแข็งที่ $20^{\circ}C$)
ความสามารถในการละลายน้ำ (C_w ; g/l)	83.66 (ที่ $25^{\circ}C$)
ค่าแตกตัวของกรดอ่อน (pKa)	9.82 (ที่ $20-25^{\circ}C$)

2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม

ฟีนอลที่พบในสิ่งแวดล้อมสามารถเปลี่ยนรูปได้ตามค่าพีเอชของสารละลาย เนื่องจากสมบัติทางเคมีของฟีนอลที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนสามารถแตกตัวให้โปรตอน (H^+) เปลี่ยนรูปกลายเป็นฟีนอลเลต ($C_6H_5O^-$) เมื่อค่าพีเอชมากกว่าค่า pK_a ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแตกตัวของของฟีนอลในน้ำ [11]

สัดส่วนการกระจายตัวระหว่างฟีนอลและฟีนอลเลตในสารละลาย ณ พีเอชต่างๆ-สามารถแสดงในรูปของค่าสัดส่วนของการแตกตัว (Ionization fractions, α) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงสัดส่วนการกระจายตัวของสปีชีส์สารอินทรีย์ภายใต้สภาวะต่างๆ ค่า α สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 ดังนี้

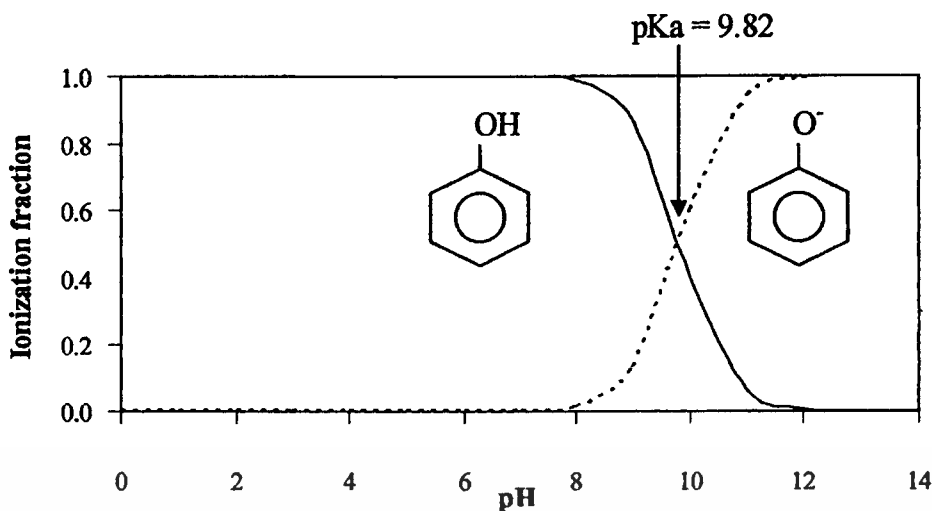
$$\text{สัดส่วนของการแตกตัว} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสปีชีส์}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \quad (2.1)$$

ฟีนอลจัดเป็นกรดโมโนโปรติก (Monoprotic acid) สามารถแตกตัวให้โปรตอน (H^+) ได้เพียงครั้งเดียว สัดส่วนของฟีนอลและฟีนอลเลตในสารละลายที่ pH ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 ซึ่งมีรูปแบบการกระจายตัวของฟีนอลที่ค่าพีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

$$\alpha_0 = \frac{[H^+]}{[H^+] + K_a} \quad \text{และ} \quad \alpha_1 = \frac{K_a}{[H^+] + K_a} \quad (2.2)$$

เมื่อ α_0 = ใช้สำหรับสปีชีส์ที่ไม่มีการเสีย H^+ ในที่นี้เป็นฟีนอล

α_1 = ใช้สำหรับอนุพลที่มีการเสีย H^+ ในที่นี้เป็นฟีนอลเลต

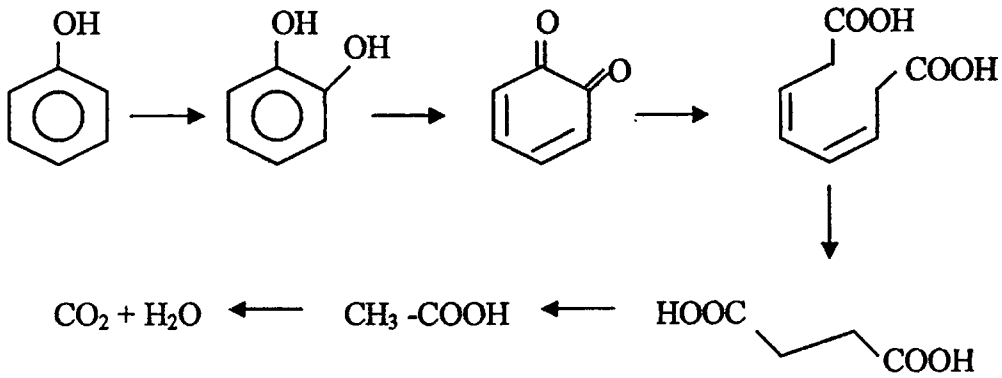


รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของฟีนอล

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อสารละลายฟีนอลมีค่า pH น้อยกว่าค่า pKa สารละลายจะประกอบด้วยสปีชีส์ของฟีนอลเป็นหลัก แต่เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 8 สัดส่วนของสปีชีส์ฟีนอลที่พบในสารละลายมีปริมาณน้อยลง ในขณะที่เดียวกันปริมาณของ สัดส่วนฟีนอลเลดที่พบในสารละลายมีมากขึ้น จนกระทั่งพีเอชของสารละลายฟีนอลมีค่าเท่ากับ pKa (pH = 9.82) ปริมาณของฟีนอลและฟีนอลเลดที่พบในสารละลายมีจำนวนเท่ากัน เมื่อ สารละลายมีค่า pH มากกว่า pKa จะพบสปีชีส์ของฟีนอลเลดในสารละลายเป็นส่วนใหญ่

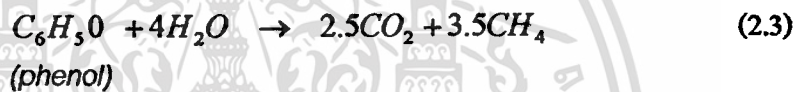
2.1.3 การย่อยสลายและการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ (Biodegradation and Biotransformation)

ฟีนอลเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) และ ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถใช้ ฟีนอลเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ในกรณีของการย่อยสลายฟีนอลแบบใช้ออกซิเจน ดัง รูปที่ 2.3 อาจเกิดได้ทั้งในระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) หรือระบบ ไพรयरกรอง (Trickling Filters) โดยเชื้อแบคทีเรียและรา ปฏิกริยาการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ภายใน 2 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 mg/l [9]



รูปที่ 2.3 กระบวนการย่อยสลายฟีนอลโดยจุลินทรีย์ [1]

ในสถานะที่ไร้ออกซิเจน ฟีนอลจะถูกย่อยสลายได้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน ดังสมการ 2.3



จากการศึกษาของ Boyd *et al.* [12] พบว่าในระบบบำบัดสลัดจ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน สลัดจ์สามารถย่อยสลายสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 50 mg/l ได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์

การย่อยสลายทางชีวภาพของฟีนอลในแหล่งน้ำธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับสถานะการปนเปื้อนสารเคมีของแหล่งน้ำ [9] หากแหล่งน้ำเคยมีการปนเปื้อนของสารเคมีมาก่อน จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำนั้นจะปรับตัว และสามารถใช้สารเคมีนั้นเป็นแหล่งพลังงานได้ ดังเช่น Banerjee *et al.* [13] ได้ทำการการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของฟีนอลที่ความเข้มข้นเท่ากันในแม่น้ำสองสายคือ แม่น้ำ Seneca รัฐนิวยอร์ก และ แม่น้ำ Jamesville จากรัฐนอร์ธแคโรไลนา ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า จุลินทรีย์ในแม่น้ำ Seneca มีศักยภาพในการย่อยสลายฟีนอลได้ดีกว่าศักยภาพของจุลินทรีย์ในแม่น้ำ Jameville ทั้งที่แม่น้ำ Jamesville มีปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำมากกว่าแม่น้ำ Seneca โดยให้เหตุผลว่า แม่น้ำ Seneca เป็นแม่น้ำที่ได้รับน้ำทั้งจากชุมชนและอุตสาหกรรม ทำให้จุลินทรีย์ในแม่น้ำปรับตัวจนสามารถย่อยสลายสารเคมีต่างๆรวมทั้งฟีนอลได้เป็นอย่างดี ในขณะที่แม่น้ำ Jamesville เป็นแม่น้ำที่ค่อนข้างสะอาด โดยไม่ได้รับน้ำทั้งจากอุตสาหกรรม ทำให้จุลินทรีย์ในน้ำไม่มีการปรับตัวในการย่อยสลายสารเคมีต่างๆ ทำให้อัตราการย่อยสลายฟีนอลต่ำ

2.1.4 ความเป็นพิษ

2.1.4.1 ความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

ประสิทธิภาพของฟีนอลและสารประกอบฟีนอลในการยับยั้งเจริญเติบโตของแบคทีเรีย หรือการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่ใช้ (ตารางที่ 2.2) ฟีนอลในระดับความเข้มข้นต่ำหรือเจือจางมากๆ จะมีผลเพียงยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ในขณะที่เพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้นเป็นร้อยละ 2-5 จะมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคในทันที แต่ไม่สามารถทำลายสปอร์และไวรัสได้ ถ้าความเข้มข้นฟีนอลเพิ่มในระดับปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้เซลล์จุลินทรีย์แตก โปรตีนในเซลล์ตกตะกอน ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้กรโคอะมิโนรัวออกจากเซลล์ และทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การผ่านเข้าออกของสารในเซลล์ผิดปกติ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เซลล์จุลินทรีย์ตาย [14] เช่นเดียวกับ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย [9] ที่กล่าวว่า ฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 0.2 มีฤทธิ์เพียงยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย แต่เมื่อมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 1.0 และ 1.3 ฟีนอลจะมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และฆ่าเชื้อราได้ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อของฟีนอลสามารถทำได้เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น [14]

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของฟีนอลต่อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ [1]

จุลินทรีย์	ระยะเวลา	ความเข้มข้น (mg/l)
จุลินทรีย์ในสลัดจ์	30 นาที มีผลต่อการหายใจ	EC ₅₀ = 280-340
แบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i>	12 ชั่วโมง ยับยั้งการเจริญเติบโต	EC ₅₀ = 462
<i>Escherichia coli</i>	12 ชั่วโมง มีผลต่อการหายใจ	EC ₅₀ = 299

หมายเหตุ : EC (Effective Concentration)

2.1.4.2 ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

ในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติจะพบฟีนอลอยู่ในปริมาณต่ำ ช่วง 0.5-6.5 µg/l เท่านั้น เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 5.3-56.5 ชั่วโมง [9] อย่างไรก็ตามการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นจนสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำได้ ความเป็นพิษที่เกิดขึ้นมีทั้งแบบพิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรังขึ้นกับระดับความเข้มข้นของฟีนอล โดยปลาชนิดต่างๆมีค่า LD₅₀ (Lethal Dose) อยู่ในช่วง 5.2-49.86 mg/l ซึ่งมาตรฐานแหล่งน้ำติดตามธรรมชาติที่ปลอดภัยสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำเฉลี่ย 24 ชั่วโมง เท่ากับ 2.56 mg/l (Fresh chronic criteria) และที่เวลาใดๆ ไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 10.2 mg/l (Fresh acute criteria) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.3 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ฟีนอลสามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลันในทุกส่วนของร่างกายของมนุษย์ เมื่อได้รับฟีนอลทั้งทางอาหาร การหายใจ หรือสัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากฟีนอลมีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่ออย่างรุนแรง และฟีนอลจะถูกดูดซึมทางผิวหนังได้อย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดการระคายเคือง เกิดแผลไฟไหม้ ผิวหนังจะมีสีซีดขาวแต่ไม่เจ็บปวดในระยะแรก เนื่องจากปลายประสาทตาย ต่อมาจะเริ่มมีอาการเจ็บปวดมาก และทำให้เนื้อผิวหนังบริเวณที่สัมผัสตาย หากได้รับการสัมผัสเป็นบริเวณกว้างมากกว่า 60 ตารางนิ้ว อาจเสี่ยงต่อการเสียชีวิต เมื่อศึกษาในคนที่ได้รับฟีนอลโดยการสูดดม ฟีนอลปริมาณ 6-20 mg/m³ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือได้รับสัมผัสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณการดูดซึมสูงถึงร้อยละ 70-80 ของขนาดที่ได้รับ [9] อีกทั้งการรับประทานฟีนอลในปริมาณ 1 กรัม อาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ [1]

2.2 การบำบัดฟีนอลในน้ำ

2.2.1 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

Verschuieren [1] พบว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายฟีนอลในน้ำที่ความเข้มข้น 25 และ 220 mg/l เป็นเวลา 5 วัน ได้ร้อยละ 76 และ 57 (%ThOD) ตามลำดับ เมื่อศึกษาการย่อยสลายฟีนอลในระบบบำบัดสลัดจ์แบบใช้ออกซิเจนของโรงงานปิโตรเคมี โดยระบบมีฟีนอลปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 380 mg/kg และในสลัดจ์ 0.5-2.5 กรัมมีจุลินทรีย์อยู่ 1 กรัม พบว่าจุลินทรีย์ในสลัดจ์มีประสิทธิภาพย่อยสลายฟีนอลให้เหลือน้อยกว่า 2.5 mg/kg เมื่อใช้ระยะเวลาเวลา 90 วัน เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกระบวนการย่อยสลายฟีนอลของจุลินทรีย์ โดยทดลองในช่วงฤดูหนาว และฤดูร้อน ที่อุณหภูมิ 10 และ 24 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ใช้สารละลายฟีนอลความเข้มข้น 25 µg/l พบว่าจุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายฟีนอล ในฤดูร้อนสั้นกว่าในฤดูหนาวอย่างชัดเจน (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการสังเคราะห์แสงและย่อยสลายฟีนอลของจุลินทรีย์ที่ฤดูต่างๆ [1]

น้ำ	ครึ่งชีวิต(ชั่วโมง)	การย่อยสลายกลายเป็นธาตุ	
		ฤดูหนาว (ชั่วโมง)	ฤดูร้อน (ชั่วโมง)
น้ำกลั่น		169	16
น้ำกร่อยปนเปื้อน		110	16
น้ำกร่อย		73	7
น้ำกร่อยตอนกลางคืน		136	2
น้ำกร่อยตอนกลางวัน		136	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลายพบว่า มีตัวทำละลายหลายชนิดสามารถสกัดฟีนอลได้มากกว่าร้อยละ 90 (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการสกัดฟีนอลด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ [1]

ชนิดตัวทำละลาย	ความเข้มข้นเริ่มต้น(mg/l)	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/l)	การกำจัด (%)
75% aromatic	200	0.2	99.9
aliphatic ester	4,000	60	98.5
benzene	750	34	95.5
light cycle oil	>300	30	90.0
light oil	3,000	35	98-99.5
tricresylphosphate	3,000	150-300	90-95

2.2.3 การดูดซับ

การดูดซับเป็นวิธีการบำบัดฟีนอลที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีศักยภาพในการบำบัดสูง สามารถดำเนินการได้ง่าย โดยเฉพาะการดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้ และมีประสิทธิภาพสูง โดยพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดฟีนอลที่ความเข้มข้น 1,000 mg/l ได้ 161 mg/g หรือประมาณร้อยละ 81 [1] แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูง และมีค่าใช้จ่ายสูงในด้านการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) จึงมีงานวิจัยเพื่อฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีต่างๆพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียม โคเคคซิลซัลเฟตมีความสามารถดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 89.40-97.00 เมื่อใช้เวลาเพียง 165 นาที [15] และถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 90 ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ใหม่ซึ่งดูดซับได้ร้อยละ 92.05 [16]

2.3 มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ

ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของฟีนอลในแหล่งน้ำประเภทต่างๆ ได้แก่ พระราชบัญญัติโรงงาน กำหนดให้น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน มีสารประกอบฟีนอล (phenol compounds) ไม่เกิน 1 mg/l และพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 เพื่อการอนุรักษ์สัตว์น้ำ เพื่อการประมง กิจกรรมและกีฬาทางน้ำ ต้องมีฟีนอลไม่เกินกว่า 0.005 mg/l [9]

สำหรับต่างประเทศก็มีการกำหนดความเข้มข้นของฟีนอลในแหล่งน้ำเช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างดังนี้ ประเทศประชาคมยุโรป (EEC) ออกกฎหมายกำหนดให้น้ำที่ใช้อุปโภคหรือน้ำที่ใช้ชำระร่างกายต้องมีฟีนอลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 mg/l [9]

ประเทศญี่ปุ่นออกกฎหมายกำหนดให้น้ำดื่มต้องมีความเข้มข้นของฟีนอลไม่เกิน 0.005 mg/l และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีสารประกอบฟีนอลไม่มากกว่า 5 mg/l [9]

ประเทศเม็กซิโกออกกฎหมายกำหนดให้น้ำทะเลชายฝั่งและน้ำบริเวณปากแม่น้ำ มีสารประกอบฟีนอลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 และ 0.01 mg/l ตามลำดับ และกำหนดความเข้มข้นสูงสุดในแหล่งน้ำที่ใช้ผลิตน้ำดื่มเท่ากับ 0.001 mg/l และแหล่งน้ำสำหรับพักผ่อน แหล่งน้ำสรงวน สำหรับสัตว์และพืชน้ำเท่ากับ 1.0 mg/l [9]

2.4 สลัดจ์ (Sludge)

สลัดจ์ (Sludge) หรือของแข็งชีวภาพ (Biosolids) เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ [2] เป็นแหล่งสะสมของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆตามแหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่เข้ามามันสามารถแบ่งประเภทของสลัดจ์ได้ดังนี้

2.4.1 ประเภทของสลัดจ์

2.4.1.1 สลัดจ์ขั้นต้น (Primary Sludge)

หมายถึงกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้นเช่น ตะแกรงคัดขยะ ถังตกตะกอนหนัก และถังปรับ pH โดยองค์ประกอบหลักของสลัดจ์ขั้นต้นเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 25 มิลลิเมตร มีน้ำหนักมากจำพวกกรวดทราย รวมถึงอาหาร เศษผักผลไม้ และน้ำมันที่ลอยอยู่ สลัดจ์มีลักษณะเป็นโคลนสีเทา มีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 มีของแข็งอยู่ร้อยละ 3.0-7.0 (% TS) และมีปริมาณสารอินทรีย์ร้อยละ 60-80 (% dry basis) [17]

2.4.1.2 สลัดจ์ขั้นสอง (Secondary Sludge)

หมายถึงตะกอนชีวภาพส่วนเกินจากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้จุลชีพในการกำจัดสารอินทรีย์ ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน และทั้งระบบจุลชีพแขวนลอย (เช่น ระบบตะกอนเร่ง) หรือติดอยู่กับตัวกลาง (เช่น ระบบ ไพรยกรอง) สลัดจ์มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีน้ำมาก สีน้ำตาลปนดำ มีกลิ่นคล้ายโคลน อาจพบหนอนและแมลงบ้าง สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีค่าพีเอชประมาณ 7.0 โดยทั่วไปสลัดจ์ขั้นสองมีของแข็งอยู่ร้อยละ 0.5-2.0 (% TS) และมีปริมาณสารอินทรีย์ร้อยละ 50-60 (% dry basis) [17]

2.4.1.3 สลัดจ์ขั้นสูง (Advanced Sludge)

หมายถึงกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสูงเช่น ระบบตกตะกอนด้วยสารเคมีและการกรองขั้นสุดท้าย โดยทั่วไปสลัดจ์ขั้นสูงมีของแข็งประมาณร้อยละ 0.2-1.5 (% TS) และมีปริมาณสารอินทรีย์ร้อยละ 35-50 (% dry basis) [17] สามารถสรุปปริมาณสลัดจ์แห้งของสลัดจ์แต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสลัดจ์ประเภทต่างๆ [17]

ประเภท	หน่วย	ของแข็ง (%TS)	ปริมาณสลัดจ์แห้ง	
			ถูกบาศก์ตันต่อล้านลิตร	ตันต่อล้านแกลลอน
สลัดจ์ขั้นต้น		3.0-7.0	0.1-0.15	0.42-0.55
สลัดจ์ขั้นสอง		0.5-2.0	0.2-0.3	0.8-1.2
สลัดจ์ขั้นสูง		0.2-1.5	0.02-0.15	0.08-0.6

2.4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์

สมบัติและลักษณะของสลัดจ์ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัด โดยลักษณะและสมบัติทั่วไปของสลัดจ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6-2.8

ตารางที่ 2.6 ลักษณะสลัดจ์ [17]

ชนิด	สลัดจ์ขั้นต้น	สลัดจ์ขั้นสอง
ของแข็งทั้งหมด (TS %)	3.0-7.0	0.5-2.0
ของแข็งระเหย (VS: % of TS)	60-80	50-60
ไนโตรเจน (N: % of TS)	1.5-4.0	2.4-5.0
ฟอสฟอรัส (P_2O_5 : % of TS)	0.8-2.8	0.5-0.7
โพแทสเซียม (K_2O : % of TS)	0-1.0	0.5-0.7
พลังงาน (BTU/lb: dry basis)	10,000-12,500	8,000-10,000
ค่าพีเอช (pH)	5.0-8.0	6.5-8.0
ความเป็นด่าง (mg/l as $CaCO_3$)	500-1,500	580-1,100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 สารอาหาร และประจุในสลัดจ์ [17]

ธาตุสารอาหาร	รูปของประจุ หรือ โมเลกุล	ธาตุสารอาหาร	รูปของประจุ หรือ โมเลกุล
ไนโตรเจน (N)	NO_3^- , NH_4^+	แมกนีเซียม (Mg)	Mg^{2+}
โพแทสเซียม (K)	K^+	แมงกานีส (Mn)	Mn^{2+}
ฟอสฟอรัส (P)	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} (ฟอสเฟต)	ทองแดง (Cu)	Cu^{2+}
ซัลเฟอร์ (S)	SO_4^{2-} (ซัลเฟต)	สังกะสี (Zn)	Zn^{2+}
แคลเซียม (Ca)	Ca^{2+}	โมลิบดีนัม (Mo)	MoO_4^- (โมลิบเดรต)
เหล็ก (Fe)	Fe^{2+} , Fe^{3+} (เฟอร์ไรต์, เฟอร์ริก)	โบรอน (B)	H_3BO_3 , H_2BO_3^- , $\text{B}(\text{OH})_4^-$

ตารางที่ 2.8 โลหะชนิดต่างๆในสลัดจ์ [2]

โลหะ	สลัดจ์แห้ง (mg/kg)		โลหะ	สลัดจ์แห้ง (mg/kg)	
	ระหว่าง	เฉลี่ย		ระหว่าง	เฉลี่ย
สารหนู	1.1-230	10	นิกเกิล	2-5,300	80
แคดเมียม	1-3,410	10	ซิงค์	1.7-17.2	5
โครเมียม	10-99,000	500	สังกะสี	101-49,000	1,700
ทองแดง	84-17,000	800	เหล็ก	1,000-154,000	17,000
ตะกั่ว	13-26,000	500	โคบอลต์	11.3-2,490	30
ปรอท	0.6-56	6	ดีบุก	2.6-329	14
โมลิบดีนัม	0.1-214	4	แมงกานีส	32-9,870	260

2.4.3 จุลชีววิทยาของสลัดจ์

นอกจากสลัดจ์จะเป็นแหล่งสะสมของสารต่างๆแล้ว สลัดจ์ยังมีจุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์อีกด้วย โดยจุลินทรีย์ที่พบอยู่ในสลัดจ์มีอยู่หลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย (Bacteria) แอคทิโนไมซีต (Actinomycetes) โปรโตซัว (Protozoa) เชื้อรา (Fungi) โรติเฟอร์ (Rotifers) แบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform bacteria) และไวรัส (Viruses) เป็นต้น แต่ที่พบในสลัดจ์เป็นจำนวนมากคือ แบคทีเรียและ โปรโตซัว [17] ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีบทบาทและหน้าที่แตกต่างกันไปดังนี้คือ

- แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสลัดจ์
- แอคทิโนไมซีต ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก จำพวกสารไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ สารประกอบเชิงซ้อนอะโรมาติก และสารฆ่าแมลง
- โปรโตซัวในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นตัวช่วยให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ราช่วยย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิตในสภาวะที่มีออกซิเจน สามารถเจริญเติบโตในที่มีอาหารน้อย ทีเอช และความชื้นต่ำ สามารถดูดซับความชื้นได้จากอากาศเมื่ออาศัยอยู่ในสลักด์จ์ที่ทำให้แห้งแล้ว
- โรติเฟอร์เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากเป็นตัวบริโภคแบคทีเรีย และคอลลอยด์ที่เมื่อสลักด์จ์ผ่านระบบบำบัดแล้ว ทำให้ค่า BOD ลดลง
- แบคทีเรียโคลิฟอร์ม และไวรัสที่เป็นตัวแสดงถึงการปนเปื้อนเชื้อโรคและสิ่งสกปรก ปริมาณค่าเฉลี่ยของโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่พบในสลักด์จ์และแหล่งอื่นๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าเฉลี่ยโคลิฟอร์มแบคทีเรียในสลักด์จ์และอื่นๆ [17]

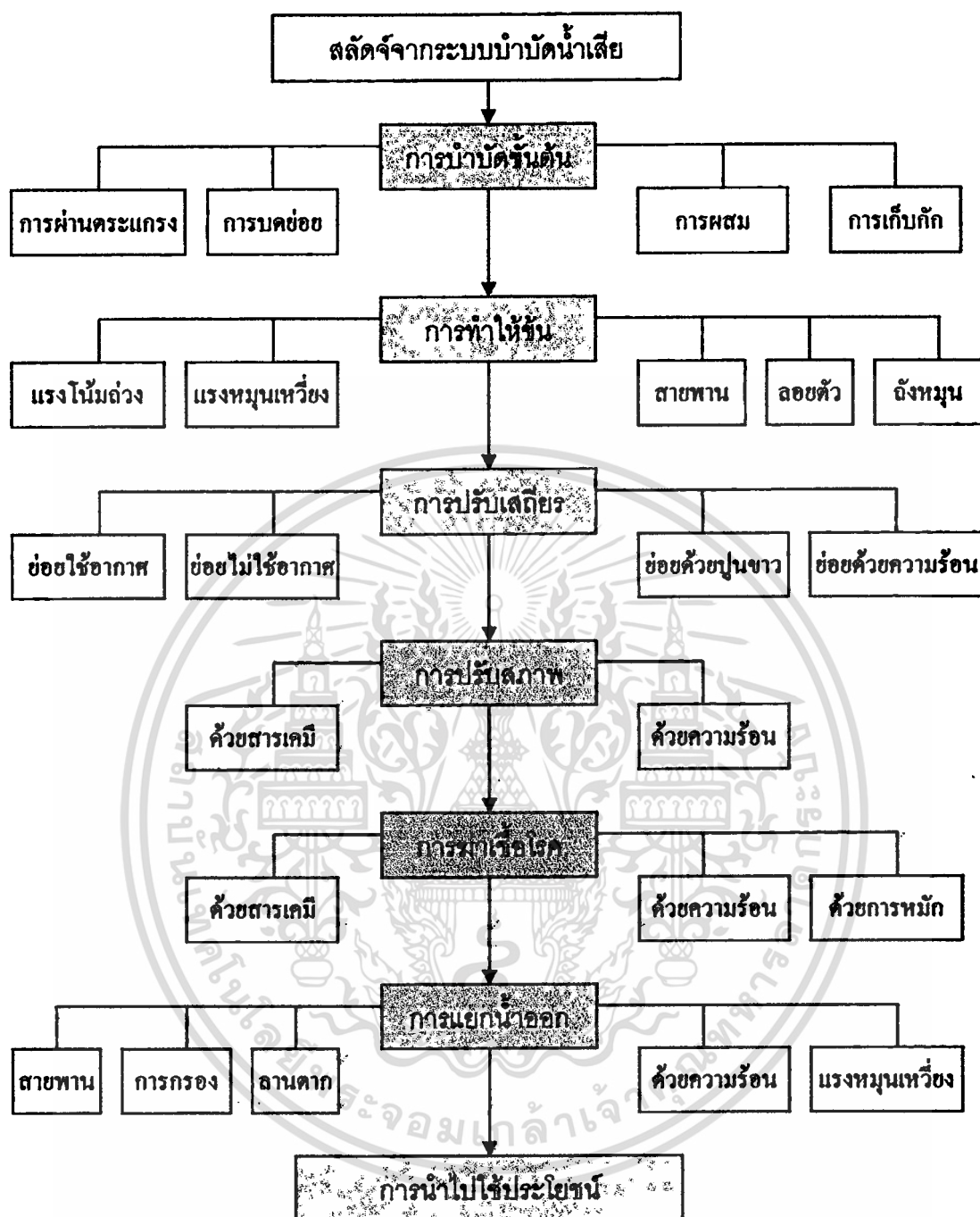
ชนิด	จำนวนจุลินทรีย์ต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง)
สลักด์จ์ที่ยังไม่ได้ปรับเสถียร	1×10^9
สลักด์จ์ที่ถูกย่อยแบบใช้อากาศแล้ว	$3 \times 10^4 - 6 \times 10^6$
อุจจาระของคน	5×10^{10}
น้ำทิ้งที่ฆ่าเชื้อโรคแล้ว	1×10^2
น้ำเสีย	8×10^6

2.4.4 กระบวนการบำบัดสลักด์จ์

กระบวนการบำบัดสลักด์จ์มีอยู่หลายขั้นตอน กล่าวคือเมื่อรวบรวมสลักด์จ์ทั้งหมดได้ ต้องผ่านระบบบำบัดขั้นต้นก่อน จากนั้นไปทำให้ขึ้นขึ้น แล้วไปปรับเสถียร ปรับสภาพ การฆ่าเชื้อโรค และรีดน้ำออกเป็นลำดับสุดท้าย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.4)

2.4.4.1 ขั้นตอนการบำบัดสลักด์จ์ขั้นต้น (Preliminary Operation)

เป็นขั้นตอนการเตรียมสลักด์จ์ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัด โดยเริ่มจากการรวบรวมสลักด์จ์ของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีน้ำและปริมาณสลักด์จ์มาก นำมาผ่านตะแกรงการบด และการคัดเดือน เพื่อลดครกทราย ลดขนาดสลักด์จ์ และเอาวัตถุที่มีน้ำหนักมากออก ในกรณีที่ต้องรับสลักด์จ์เพิ่มเติมจากแหล่งอื่น ต้องมีระบบผสม เพื่อให้สลักด์จ์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงเข้าสู่ถังเก็บกักสลักด์จ์ เพื่อช่วยรับสลักด์จ์ที่แต่ละวันมีปริมาณไม่คงที่ ให้ป้อนเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ ควรใช้ด่าง หรือปูนขาว เพิ่มค่า pH ป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซไข่เน่า [18]



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการบำบัดสลัดจ์ [2]

2.4.4.2 ขั้นตอนการทำสลัดจ์ให้ข้น (Thickening)

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อแยกน้ำออก และทำให้ปริมาตรสลัดจ์ลดลง ซึ่งการบำบัดสลัดจ์ในขั้นตอนนี้ต่อไปจะดำเนินการได้ง่ายขึ้น โดยวิธีการที่ใช้ได้แก่ การหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Thickening) การลอยตัว (Flotation Thickening) ใช้ถังหมุน (Rotary Drum Thickening) และค้ำยแรงโน้มถ่วง (Gravity Thickening) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3 ขั้นตอนการปรับเสถียร (Sludge stabilization)

ขั้นตอนการปรับเสถียรสลัดจ์ หรือการย่อยสลายสลัดจ์ เป็นขั้นตอนที่ออกแบบมาเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์และลดปริมาตรสลัดจ์ เป็นผลให้ลดเชื้อโรคและลดกลิ่นเหม็นของสลัดจ์ตามไปด้วย สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การย่อยสลายด้วยกระบวนการเคมีโดยการเติมสารจำพวกปูนขาว การย่อยสลายด้วยความร้อน และกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น

2.4.4.4 ขั้นตอนการปรับสภาพสลัดจ์ (Sludge conditioning)

เป็นขั้นตอนการปรับสภาพให้สลัดจ์มีลักษณะที่สามารถแยกน้ำออกได้ง่าย ซึ่งวิธีที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นวิธีการปรับสภาพด้วยสารเคมี (Chemical conditioning) และวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อน (Heat treatment)

2.4.4.5 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคสลัดจ์ (Sludge disinfection)

มีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคไปสู่สิ่งแวดล้อมอื่นๆเมื่อนำสลัดจ์ไปใช้ประโยชน์หรือนำสลัดจ์ไปทิ้ง โดยการฆ่าเชื้อโรคสามารถทำได้หลายรูปแบบเช่น การฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อน และการใช้สารเคมีฆ่าเชื้อโรค การเก็บกักสลัดจ์ที่ถูกย่อยแล้วเอาไว้หลายๆวัน การหมักสลัดจ์ที่อุณหภูมิสูง รวมถึงการปรับให้ค่า pH ของสลัดจ์ให้สูงมากกว่า 12 เป็นต้น

2.4.4.6 ขั้นตอนแยกน้ำออกจากสลัดจ์

การแยกน้ำออกจากสลัดจ์เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการบำบัดสลัดจ์ มีวัตถุประสงค์ในการลดความชื้น หรือลดน้ำในสลัดจ์ให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการจัดการ การขนส่ง และการกำจัดสลัดจ์ลดลง โดยมีวิธีการแยกน้ำออกจากสลัดจ์อยู่หลายแบบ เช่น วิธีการกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum filtration) การหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) การใช้สายพานรีดน้ำ (Belt filter press) การอัดแผ่นกรอง (Filter presses) การตากแห้ง (Sludge drying beds) และการทำให้แห้งด้วยความร้อน (Heat drying) เป็นต้น

สลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดจะมีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดิน ความชื้นน้อย ไม่มีกลิ่น ในกรณีที่ได้รับการตรวจสอบแล้วว่าไม่มีสารพิษ หรือเชื้อโรคปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรม แต่ถ้ามีปริมาณสารพิษมากเกินไปจะต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสม

2.4.5 การใช้ประโยชน์ของสลัดจ์

ปัจจุบันการใช้ประโยชน์สลัดจ์เป็นที่นิยอย่างกว้างขวาง ทั้งในประเทศอเมริกา (ตารางที่ 2.10) และในทวีปยุโรป (ตารางที่ 2.11) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้คือ การนำไปใช้ประโยชน์บนพื้นดิน การใช้พลังงานจากสลัดจ์โดยการเผา และการนำไปทำเป็นก้อนแข็ง

ตารางที่ 2.10 การใช้ประโยชน์สลัดจ์ในประเทศอเมริกา [17]

วิธีการกำจัด	ลูกบาศก์ตัน (น้ำหนักแห้ง)	ร้อยละ (%)
กำจัดร่วมกับขยะชุมชน (Co-disposal in MSW landfills)	1,818,700	34.0
ใช้ประโยชน์ในพื้นที่ (Land application)	1,785,300	33.3
เผา (Incineration)	846,700	16.1
ถมที่ (Surface disposal)	553,700	10.3
ทิ้งทะเล (Ocean disposal) ยกเลิกในปี 1992	335,500	6.3
รวม	5,357,900	100

ตารางที่ 2.11 การใช้ประโยชน์สลัดจ์ในทวีปยุโรป [17]

ประเทศ	การเกษตร (%)	ฝังกลบ (%)	เผา (%)	ทิ้งทะเล (%)	อื่นๆ (%)	ผลผลิตประจำปี (dry metric tons/year)x1,000
เยอรมันนี	27	54	14	-	5	2,700
อังกฤษ	42	8	14	30	13	1,107
ฝรั่งเศส	60	203	20	-	-	852
อิตาลี	33	55	4	-	8	816
สเปน	50	35	5	10	-	350
เนเธอร์แลนด์	26	50	3	2	19	323
เดนมาร์ก	54	20	24	-	2	170
เบลเยียม	29	55	15	-	1	200
กรีซ	10	90	-	-	-	48
ไอร์แลนด์	12	45	-	35	8	37
โปรตุเกศ	11	29	-	60	-	25
ลักซิมเบออร์ก	12	88	-	-	-	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.1 การใช้ประโยชน์สลัดจ์บนพื้นดิน (Land application)

สลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว สามารถนำมาใช้ประโยชน์บนพื้นดินได้ทั้งในรูปแบบของเหลว และในรูปของแข็ง แล้วแต่ความเหมาะสมของพื้นที่ เช่น การนำไปถมที่ นำมาคลุมหลุมฝังขยะ การปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร หรือการนำไปทำปุ๋ย สลัดจ์ที่ทิ้งบนพื้นดินย่อมเกิดกระบวนการย่อยสลาย ดูดซับ และดูดซึม ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายและแลกเปลี่ยนของสารต่างๆที่อยู่ในสลัดจ์ลงสู่พื้นดิน ดังนั้นก่อนที่จะนำสลัดจ์ไปประยุกต์ใช้ด้วยวิธีนี้ ควรคำนึงถึงแนวโน้มของการเกิดปัญหาจากสารต่างๆ เช่น จากเชื้อโรค สารพิษ และโลหะต่างๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดิน น้ำใต้ดิน พืช และสัตว์ ตลอดจนห่วงโซ่อาหาร จึงมีข้อกำหนดการใช้ประโยชน์พื้นที่ดังตารางที่ 2.12 - 2.14

ตารางที่ 2.12 ข้อกำหนดการปนเปื้อนเชื้อโรคในสลัดจ์ [2]

ประเภท	ข้อกำหนด
Class A	Salmonella sp น้อยกว่า 3 MPN ต่อสลัดจ์แห้ง 4 กรัม fecal coliform น้อยกว่า 1,000 MPN ต่อสลัดจ์แห้ง 1 กรัม เป็นสลัดจ์ที่สะอาด สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกพื้นที่
Class B	fecal coliform น้อยกว่า 2 ล้าน MPN หรือ CFU ต่อสลัดจ์แห้ง 1 กรัม ห้ามนำไปขาย และใช้ประโยชน์ในสนามหญ้า และสวนสาธารณะ

หมายเหตุ : MPN (Most Probable Number), CFU (colony-forming units)

ตารางที่ 2.13 ข้อกำหนดปริมาณ โลหะหนักที่ปนเปื้อนสลัดจ์ [17]

สารปนเปื้อน	ความเข้มข้นน้อยกว่า (mg/kg)
สารหนู	41
แคดเมียม	39
โครเมียม	1,200
ทองแดง	1,500
ตะกั่ว	300
ปรอท	17
นิกเกิล	420
ซีลีเนียม	36
สังกะสี	2,800

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.14 ข้อกำหนดการทิ้งหรือใช้ประโยชน์ในพื้นที่ต่างๆ [18]

พื้นที่ต่างๆ	ระยะเวลาในการทิ้ง	อัตราการทิ้ง (kg/m ²)
เกษตรกรรม	รอบปี	0.2-7
ป่าไม้	ครั้งเดียว หรือทุก 3-5 ปี	0.9-22
ปรับสภาพพื้นที่เพื่อใช้ประโยชน์	ครั้งเดียว	0.7-45
พื้นที่จัดเตรียมไว้เฉพาะการทิ้ง	รอบปี	22-90

2.4.5.2 การใช้เป็นแหล่งพลังงาน

เผาสลัดจ์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้ประโยชน์สลัดจ์ เนื่องจากสลัดจ์ให้ค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2.15) แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดด้านความชื้น สลัดจ์ที่เหมาะสมต่อการเผาต้องเป็นสลัดจ์ที่แห้งมากๆ อาจไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับเสถียรเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนก็ได้ แต่ต้องเป็นของแข็งที่ผ่านกระบวนการรีดน้ำ หรือทำให้แห้งมาแล้ว

ตารางที่ 2.15 ค่าความร้อนของสลัดจ์ชนิดต่างๆ [18]

ชนิดสลัดจ์	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัมของสลัดจ์แห้ง)	
	ค่าทั่วไป	ช่วง
สลัดจ์ขั้นต้น	25,600	23,000-29,000
สลัดจ์ขั้นสอง (AS)	20,900	23,200-16,300
สลัดจ์ขั้นต้นที่ถูกปรับเสถียรแบบไร้อากาศ	11,600	9,300-14,000
สลัดจ์ขั้นต้นที่ผสมกับสารเคมี	16,300	14,000-18,600
สลัดจ์จากระบบไปรยกรอง (RBC)	19,800	16,300-23,200

2.4.5.3 การทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification)

การทำเป็นก้อนแข็ง เป็นการประยุกต์เพื่อใช้ประโยชน์สลัดจ์โดยนำมาผสมกับสารทำเป็นก้อนแข็ง เช่น ซิเมนต์ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) และปูนขาว เป็นต้น มีการเติมทราย น้ำ และเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยสามารถทำเป็นตัวแทนทางเท้า อิฐ ซิเมนต์บล็อก พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น อีกทั้งสารจำพวกซิเมนต์ ทำให้ค่า pH ของก้อนแข็งสูงขึ้น ช่วยลดการชะละลายของโลหะต่างๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาการชะละลายของสารปนเปื้อนที่เป็นอันตราย และสมบัติการรับแรงของคอนกรีต [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 มาตรการและกฎหมายเกี่ยวกับสัลดัจ

หน่วยงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency) กำหนดมาตรฐานในการใช้ประโยชน์และกำจัดสัลดัจจากในและนอกประเทศ (40 CFR หัวข้อ 503) เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์สัลดัจบนพื้นที่ มาตรฐานของสารพิษ และเชื้อโรค ดังแสดงในตารางที่ 2.12 - 2.14 ในหัวข้อ 2.4.5.1 [17]

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารเคมี (Mass transfer) ที่สามารถละลายน้ำได้ ไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น พื้นผิวที่ดูดซับสารปนเปื้อนเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วน โมเลกุลของสารปนเปื้อนที่มาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) กระบวนการดูดซับเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็ก ได้จนถึงขั้น โมเลกุล และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อน ได้ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตกตะกอน กระบวนการนี้อาศัยความสามารถเฉพาะตัวของตัวดูดซับในการดึง โมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะติดที่ผิว เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือ โลหะหนักจากกระบวนการฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

2.5.1 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) [19]

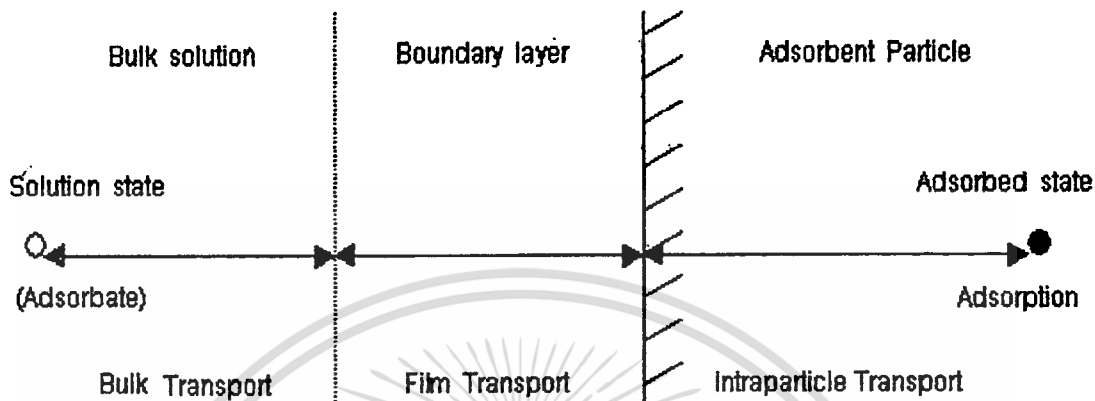
2.5.1.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ ถ่านกระดูก (Bond char) แอกทิเวทเตดซิลิกา (Activated silica) เป็นวัสดุธรรมชาติที่มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่มีข้อจำกัดคือ สามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้น้อยชนิด

2.5.1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ เนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง เพื่อเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 450 - 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10 - 10,000 อังสตรอม จึงมีประสิทธิภาพดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น

2.5.1.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อน ส่วนมากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม จัดว่ามีพื้นที่ผิวดำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่าคือ กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration process) ทำได้ง่ายกว่า และใช้สารรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.5.2 กลไกของกระบวนการดูดซับ [20]

การเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ ไปยึดติดกับตัวดูดซับมีกลไกการดูดซับที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนย่อยดังนี้คือ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 กลไกของการเคลื่อนตัวในกระบวนการดูดซับ

ขั้นตอน Bulk transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับในสารละลาย (Bulk solution) เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวฟิล์ม หรือ โมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอน Film transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแพร่ข้ามฟิล์มน้ำผ่านไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอน Intraparticle transport หรือ Pore transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแทรกผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอน Adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณ active site บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพ หรือแรงดึงดูดทางเคมี หรือทั้งสองแรงพร้อมกัน

2.5.3 แรงเหนี่ยวนำที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ [20]

การดูดซับของสารเคมีใดๆ บนผิวของตัวดูดซับ จะต้องมีแรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลที่ทำให้เกิดการยึดติดของ โมเลกุลของสารเคมีนั้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แรงเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลทั้งสอง อาจเป็นแรงเหนี่ยวนำทางกายภาพ (Physical force) แรงเหนี่ยวนำทางเคมี (Chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงเหนี่ยวนำทั้งสองประเภท ซึ่งมีรายละเอียดของแรงเหนี่ยวนำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.1 แรงเหนี่ยวนำทางกายภาพ (Physical force)

1) Induced dipole-induced dipole หรือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Force) เป็นแรงเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar molecules) เกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้นตลอดเวลา ทำให้ในช่วงขณะหนึ่งความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่สม่ำเสมอทั่วกัน (Dispersion effect) มีผลทำให้เกิดสภาพขั้ว หรือ โดโพลชั่วขณะ โดโพลชั่วขณะที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำ (Induction effect) โมเลกุลข้างเคียงที่สัมผัสกัน และเกิดการดูดซับ ซึ่งเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของโมเลกุลที่สัมผัสกัน และใช้พลังงานในการดูดซับต่ำ แรงเหนี่ยวนำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโมเลกุล ซึ่งสัมพันธ์กับรูปร่างและขนาดของโมเลกุล เมื่อเป็นการดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ การคายซับ (Desorption) จึงเกิดขึ้นได้ง่าย แต่กลับเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

2) Dipole-induced dipole เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากความเป็นโดโพลชนิดถาวร ในโมเลกุลที่มีขั้ว เหนี่ยวนำให้เกิดสภาพโดโพลชั่วขณะในโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

3) Dipole-dipole เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ซึ่งมีสภาพโดโพลชนิดถาวรในโมเลกุล เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) โดยที่ขั้วบวกของโมเลกุลหนึ่งยึดกับขั้วลบของอีกโมเลกุลที่อยู่ถัดไป ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน

2.5.3.2 แรงเหนี่ยวนำทางเคมี (Chemical force) เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับแล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้ เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน การให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งแรงเหนี่ยวนำประเภทนี้จะมีค่าแข็งแรงสูงกว่าแรงทางกายภาพ เกิดปฏิกิริยาจับกันเป็นสารประกอบทางเคมี จะมีผลทำให้ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการดูดซับแบบผันกลับไม่ได้ จึงไม่มีการคายซับ (Desorption)

2.5.4 ประเภทของการดูดซับ

2.5.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption or Physisorption) เป็นกระบวนการดูดซับ โดยอาศัยแรงเหนี่ยวนำทางกายภาพ ซึ่งเป็นแรงค่อนข้างอ่อน ทั้งนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลสารปนเปื้อน ดังนั้น โมเลกุลของสารจะเกาะและยึดติดบนพื้นที่ผิวทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง สารปนเปื้อนจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากเกิดการผันกลับทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนออกจากตัวดูดซับ (Desorption) [20]

2.5.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน เกี่ยวข้องกับแรงของพันธะเคมีระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ กล่าวคือ การดูดซับทางเคมีจะต้องมีการสร้างพันธะเคมี และมีการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มอิเล็กตรอน อาจต้องการพลังงานภายนอกเข้าช่วย ทำให้โมเลกุลของสารเคมีที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิว เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง ทำให้ต้องการพื้นที่ในการดูดซับลดลง และเนื่องจากการดูดซับเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวบางแห่ง ทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ (Desorption) เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติ จะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งสามารถสรุปข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีได้ดังนี้ [20]

1) การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้

2) การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วไป บนพื้นผิวตัวดูดซับ ไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น

3) ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

2.5.5.1 ปัจจัยทางธรรมชาติของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface area) โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) และขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent size) พบว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากย่อมเกิดการดูดซับได้มาก และเมื่อรูพรุนมีขนาด โครงสร้างใหญ่เพียงพอที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปได้ ก็ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น สำหรับขนาดตัวดูดซับ มักจะใช้พิจารณาในกรณีของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน อนุภาคขนาดเล็กย่อมมีบริเวณพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีขนาด

ใหญ่และรูพรุนมาก พื้นที่ผิวของการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนเป็นหลัก ขนาดของตัวดูดซับจึงไม่เข้ามา มีอิทธิพลต่อการดูดซับ [20]

2.5.5.2 ปัจจัยทางธรรมชาติของตัวดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล สภาพความมีขี้ของโมเลกุล ความสามารถในการละลายน้ำ และความเข้มข้น กล่าวคือในขั้นตอนของการดูดซับ โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวตัวดูดซับ เมื่อตัวดูดซับมี โมเลกุลขนาดเล็ก สภาพความมีขี้สูง เป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำสูง ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวดูดซับบางประเภทที่ละลายน้ำได้น้อย แต่เกาะติดผิวตัวดูดซับได้ยาก รวมถึงเมื่อตัวดูดซับมีความเข้มข้นสูง มีจำนวน โมเลกุลมาก จะเพิ่ม โอกาสในการสัมผัสกับตัวดูดซับ [20]

2.5.5.3 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ อัตราการปั่นกววน อุณหภูมิ อิทธิพลของเวลาสัมผัส ค่าพีเอช ความเข้มข้นของเกลือและตัวถูกละลายอื่นๆ รายละเอียดดังนี้ [20]

1) อิทธิพลของอัตราการปั่นกววน มีผลในการลดความห่างระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับ ทำให้โอกาสในการสัมผัสกันเพิ่มขึ้น ทั้งในบริเวณของ ขั้นตอน Bulk transport ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ ไปยังบริเวณผิวฟิล์ม โมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ และขั้นตอน Film transport ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวดูดซับแพร่ข้ามฟิล์ม โมเลกุลน้ำที่เคลือบอยู่บริเวณผิว ผ่านไปยังผิวของตัวดูดซับ แต่ถ้ามีอัตราการปั่นกววนมากเกินไปอาจทำให้เกิดการชน กระแทก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

2) อิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้น และทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3) อิทธิพลของเวลาสัมผัส (Contact time) เวลาสัมผัสมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับด้วย

4) อิทธิพลของค่าพีเอช (pH) เป็นปัจจัยสำคัญต่อความมีขี้ของสาร ทั้งตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ในกรณีของตัวดูดซับ โดยเฉพาะจำพวกกรดและเบสที่สามารถแตกตัวให้ไอออนได้ เมื่อมีสภาพขี้จะละลายได้ดีใน โมเลกุลของน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ในกรณีของตัวดูดซับ โดยเฉพาะจำพวกสินแร่ที่สามารถแลกเปลี่ยน โปรตอนกับสารละลาย (ทำหน้าที่คล้ายกรดหรือเบส) ทำให้เกิดความมีขี้บริเวณผิว (ทั้งขี้บวกและขี้ลบ) จับกับตัวถูกละลายที่มีประจุตรงกันข้าม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.5.6 การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

การดูดซับทางชีวภาพ เป็นการใช้อินทรีย์ทั้งในรูปของเซลล์ที่มีชีวิต (Active cell) และเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (Inactive cell) มาใช้ในการดูดซับสารประกอบหรือสารเคมีที่อยู่ในสารละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียมีความสามารถพิเศษในการดูดซับสารอินทรีย์ เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีกรด โพลีแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบหลัก [21] นอกจากนี้ผนังเซลล์ยังมีกลุ่มอะมิโน ฟอสเฟต และซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ รวมถึงในโตรเจนและออกซิเจนของพันธะเปปไทด์ ที่สามารถเกิดพันธะร่วมกับไอออนของโลหะจำพวก ทองแดง(II) นิกเกิล(II) และโครเมียม(III) ได้ [22]

กลไกของการดูดซับสารเคมีด้วยเซลล์จุลินทรีย์สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ กลไกของการดูดซับด้วยจุลินทรีย์ที่เซลล์มีชีวิต และกลไกของการดูดซับด้วยเซลล์ที่ไม่มีชีวิต ซึ่งลักษณะกลไกการดูดซับของเซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิต (Active cell) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นขั้นตอนการดูดซับสารเคมีไว้ที่ผนังเซลล์ โดยอาศัยกระบวนการดูดซับทางกายภาพ และการแลกเปลี่ยนประจุบริเวณผนังเซลล์ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่ใช้พลังงาน ช่วงที่สองเป็นขั้นตอนการนำสารเคมีเข้าสู่เซลล์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดหรือลดความเป็นพิษของสารเคมี ซึ่งในขั้นตอนนี้สารเคมีหรือ โมเลกุลของสารละลายจะถูกเคลื่อนย้ายเข้าสู่เซลล์ด้วยกระบวนการแพร่ และแอกทีฟทรานสปอร์ต จนกระทั่งสารเคมีเข้าร่วมตัวกับ โปรตีนไขมันและองค์ประกอบอื่น แล้วสารเคมีจึงถูกส่งไปกำจัดด้วยกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์จุลินทรีย์ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานาน และต้องใช้พลังงานในการนำสารเข้าสู่เซลล์ อย่างไรก็ตามการดูดซับด้วยเซลล์ที่มีชีวิตมีข้อจำกัดหลายด้าน จึงควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น การปนเปื้อนสารเคมีที่มีความเป็นพิษ และความเข้มข้นของสารเคมีที่อาจเป็นพิษต่อเซลล์

สำหรับลักษณะกลไกการดูดซับของเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (Inactive cell) เป็นกระบวนการสะสมสารเคมีไว้ภายนอกเซลล์ โดยไม่ใช้พลังงาน จะอาศัยกลไกการดูดซับทางกายภาพ เพื่อทำการดูดซับสารเคมีไว้ที่บริเวณ โครงสร้างของผนังเซลล์ ทั้งนี้บริเวณ โครงสร้างของผนังเซลล์ประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดเช่น โคติน กรดโพลีแซคคาไรด์ ไขมัน กรดอะมิโน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการส่งผ่านสารเคมีเข้าสู่พื้นที่ผิวของผนังเซลล์ นอกจากนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพของเซลล์ที่ไม่มีชีวิตแล้ว สารเคมีบางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional) ของผนังเซลล์ที่ไม่มีชีวิต จนกระทั่งเกิดการสะสมและตกตะกอนบริเวณผนังเซลล์ โดยผ่านกลไกต่างๆ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุบวก การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การเกิดคีเลต และการตกตะกอน เป็นต้น ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เซลล์ที่ไม่มีชีวิตในฐานะตัวดูดซับได้แก่ พื้นที่ผิว และหมู่ฟังก์ชัน นอกจากนี้กลไกการดูดซับประเภทนี้สามารถใช้กับสารเคมีที่มีความเป็นพิษ และความเข้มข้นสูงได้ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีระหว่างเซลล์ที่ไม่มีชีวิตและเซลล์ที่มีชีวิตพบว่า ในกรณีของ โลหะหนักเซลล์ที่ไม่มีชีวิตมีความสามารถในการดูดซับ โลหะ ได้เทียบเท่าหรือมากกว่าเซลล์ที่มีชีวิต [23] และในกรณีของการดูดซับสารอินทรีย์พบว่า สัตว์ที่เซลล์ที่ไม่มีชีวิตมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอลน้อยกว่าสัตว์ที่เซลล์ที่มีชีวิตประมาณร้อยละ 28 [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

สมดุลการดูดซับเป็นการพิจารณากระบวนการดูดซับแบบผันกลับได้ กล่าวคือเมื่อจำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเท่ากับจำนวนโมเลกุลของสารที่คายการดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับจะเข้าสู่สถานะสมดุล (Equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่สถานะสมดุลนี้จะมีโมเลกุลสารจำนวนหนึ่งที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณผิวของตัวดูดซับ (q หรือ $\frac{x}{M}$) และมีโมเลกุลอีกจำนวนหนึ่งที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) ถ้าหากระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับเนื่องจากกระบวนการอื่นๆ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด ปกติปริมาณสารที่ถูกดูดซับ q จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย [20] สามารถเขียนเป็นสมการแสดงสมดุลการดูดซับ ได้ดังสมการ 2.4

$$qW = V(C_0 - C_e) \quad (2.4)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับค่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (mg/g หรือ mol/g)
 W = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบ (g)
 V = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (l)
 C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลาย (mg/l หรือ mol/l)
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สถานะสมดุล (mg/l หรือ mol/l)

ในแต่ละสมดุลการดูดซับ จะมีค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_d) เป็นตัวบ่งบอกถึงสัดส่วนการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับที่ยึดติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับกับ ตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ จุดสมดุล ดังสมการ 2.5

$$K_d = \frac{q}{C_e} \quad (2.5)$$

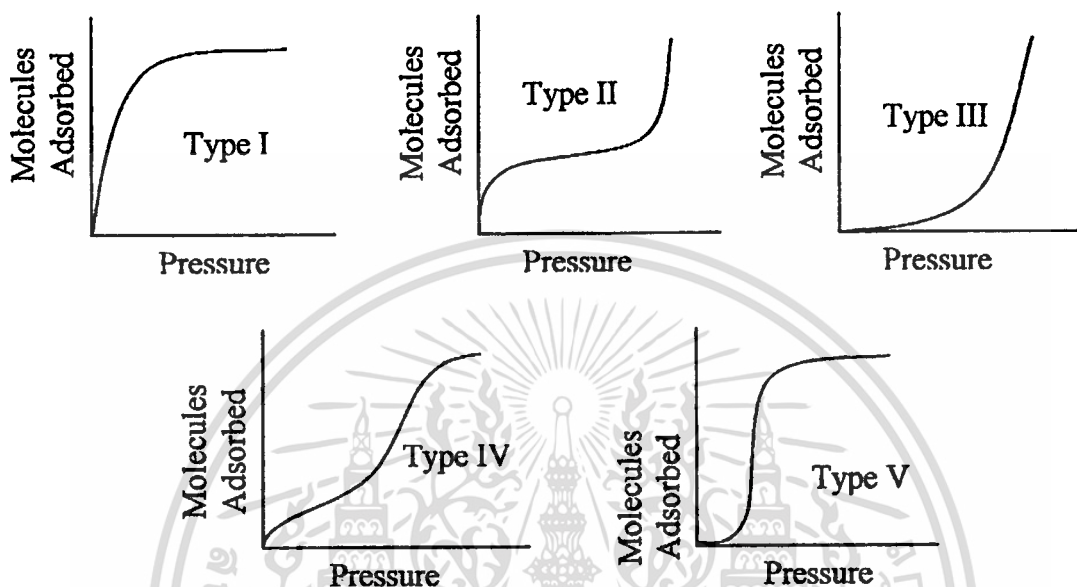
เมื่อ K_d = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของตัวถูกดูดซับใดๆ

ระบบที่เข้าสู่สมดุล จะมีค่า q และ C_e แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ปริมาตรของสารละลาย และน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ ซึ่งในการศึกษากระบวนการดูดซับของสารเคมีใดๆที่สถานะสมดุล โดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 แบบคือ การแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเคมีให้แตกต่างกัน แต่น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากัน และการแปรน้ำหนักของตัวดูดซับให้แตกต่างกัน แต่ความเข้มข้นของสารเคมีเท่ากัน เมื่อนำค่า q และ C_e ของแต่ละความเข้มข้นมาสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่จุดสมดุล (C_e) ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งโดยทั่วไปพบอยู่ 5 ลักษณะตามรูป ความโค้งของเส้นไอโซเทอร์ม ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ [25]

Type I เป็นรูปที่พบมากที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับแบบ Monomolecular layer โดยมีชั้นของ โมเลกุลที่ถูกดูดซับปกคลุมบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ ได้หนาหนึ่ง โมเลกุล (Single layer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี จะเป็นปรากฏการณ์ดูดซับของ Microporous powers ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ (Relative pressure) และที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง จะเกิดการดูดซับเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่า ตัวดูดซับมีรูพรุนเป็น Microporous (1.5 นาโนเมตร) และมีพื้นผิวรูพรุน ปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นผิวภายนอกของตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีการจัดเรียงตัว เพียงชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ (Monomolecular layer) เป็น Monolayer อย่างสมบูรณ์

Type II เป็นปรากฏการณ์ดูดซับแบบ Multilayer โดยในช่วงการดูดซับบนพื้นผิว ชั้นแรกเกือบสมบูรณ์ และจะเกิดชั้นของตัวถูกดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นอนันต์) การดูดซับเกิด โดย Nonporous power ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า Microporous ถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ทำให้เกิดการดูดซับที่ผิวมากกว่า 1 ชั้น

Type III เป็นการดูดซับคล้าย Type II แต่ในช่วงการดูดซับของชั้นแรกจะเกิด ความร้อนออกมา (Heat of adsorption) ซึ่งความร้อนที่เกิดจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบแน่นหรือรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (The adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะเกิดจากที่ตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นแรกของตัวถูกดูดซับมากกว่า การดูดซับบริเวณผิวของตัวดูดซับ

Type IV เป็นการดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ในชั้นแรกๆจะอึดตัว เนื่องจากความจุของรูพรุนเต็มหมดแล้ว แต่เมื่อเพิ่มความดันสัมพัทธ์ ทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้อีก การดูดซับประเภทนี้มักเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม

Type V เป็นการดูดซับคล้าย Type III ในช่วงของตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำๆ แต่การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เช่นเดียวกับ Type IV โดยเป็นการดูดซับที่อาศัยอิทธิพลของแรงเหนี่ยวนำของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับที่มีค่าน้อยๆ

ทั้งนี้ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถอธิบายได้หลายสมการ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 สมการ คือ

2.5.6.1. ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับภายใต้ สมมติฐานว่า

- 1) การดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับ โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (Monomolecular layer) อีออนหรือ โมเลกุลไม่มีการซ้อนทับกัน จึงทำให้ความหนาของชั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับเท่ากันหมด
- 2) พื้นที่ของการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน มีตำแหน่ง และกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น Homogeneous surface ในทุกบริเวณ จึงทำให้พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากัน ในทุกบริเวณเช่นเดียวกัน
- 3) เมื่อเกิดการดูดซับแล้ว ไม่มีการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ ซึ่ง Langmuir isotherm สามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการ 2.6

$$q = \frac{q_m K_d C_e}{1 + K_d C_e} \quad (2.6)$$

โดย q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ที่สภาวะอึดตัว (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l)

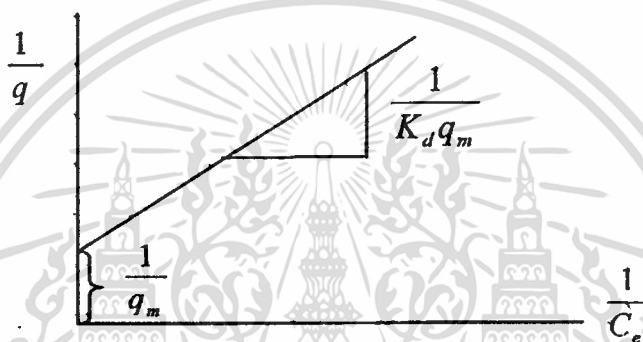
K_d = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการ 2.7

$$\frac{I}{q} = \frac{I}{q_m} + \frac{I}{K_d q_m C_e} \quad (2.7)$$

ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{K_d q_m}$ และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ [20]

2.5.6.2. Freundlich isotherm

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich นี้ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว และการดูดซับเกิดขึ้นแบบไม่มีขีดจำกัด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.8

$$q = K_d C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.8)$$

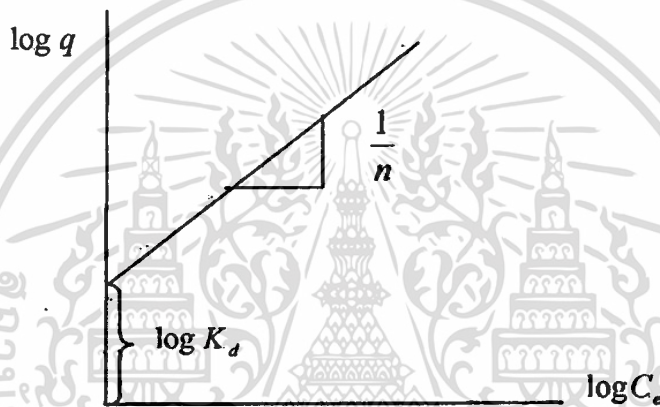
- เมื่อ
- q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)
 - C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, mol/l)
 - K_d = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 - $\frac{1}{n}$ = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลาย
- (Concentration dependence)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยการใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างได้เป็นสมการที่ 2.9

$$\log \frac{x}{M} = \log q = \log K_d + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.9)$$

เมื่อนำค่า $\log q$ กับ $\log C_e$ จากการทดลองใดๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q$ เป็นแกน y และ $\log C_e$ เป็นแกน x จะสามารถหาค่า $\frac{1}{n}$ คือความชันของกราฟ และ $\log K_d$ คือจุดตัดแกน y ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนลิช [20]

เมื่อสร้างกราฟแล้ว พบว่าค่า $\frac{1}{n}$ มีค่า < 1 แสดงว่าปริมาณพื้นที่การดูดซับบนตัวดูดซับมีจำกัด แต่ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ แสดงว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น

2.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetics)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราการดูดซับ (Adsorption rate) โดยจะพบว่าในขณะที่ปฏิกิริยาการดูดซับดำเนินไปอยู่นั้น ปริมาณของสารตั้งต้นจะลดลง ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงหาได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหน่วยเวลา กล่าวคือสามารถหาได้จากการหายไปของสารตั้งต้นในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้จากกฎอัตราของปฏิกิริยา [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎอัตราของปฏิกิริยา (Rate law) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งอันดับของปฏิกิริยาอาจเป็นได้ทั้งเลขจำนวนเต็ม หรือเศษส่วน และเป็นค่าบวก หรือลบก็ได้ และเมื่อรวมเลขของอันดับปฏิกิริยาของสารตั้งต้น หรือเอ็กซ์โปเนนเชียลของสารที่ปรากฏในกฎของอัตรา เราเรียกว่า อันดับรวมของปฏิกิริยา (Order of reaction) ทั้งนี้กฎอัตราของปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.10

$$\text{อัตราเร็ว} = k[A]^a[B]^b \quad (2.10)$$

ซึ่ง $[A]$ และ $[B]$ เป็นความเข้มข้นหน่วยโมลต่อลิตร ของสารตั้งต้น A และ B

a และ b เป็นเลขยกกำลัง หรืออันดับของปฏิกิริยาของสาร A และ B ที่ได้จากการทดลอง k คือค่าคงที่อัตราเร็วที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ในกรณีที่ a หรือ b มีค่าเป็นศูนย์ อันดับของปฏิกิริยาจะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย แต่ในกรณีที่ a มีค่าเป็นหนึ่ง และ b มีค่าเป็นศูนย์ จะหมายถึงสารตั้งต้น A มีอันดับของปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง และสารตั้งต้น B มีอันดับปฏิกิริยาเป็นศูนย์ และอันดับรวมของปฏิกิริยามีค่าเป็นหนึ่ง

2.6.1 แบบจำลองการลดอันดับศูนย์ (Zero-order reaction)

อัตราของปฏิกิริยามีอันดับศูนย์ เมื่อเลขยกกำลัง a หรือ b มีค่าเป็นศูนย์ เป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยา โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราของปฏิกิริยาจะคงที่เสมอ ไม่ว่าสารตั้งต้นจะมีความเข้มข้นเท่าใด ซึ่งปกติอัตราปฏิกิริยาอันดับศูนย์ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นเช่น ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้แสงเป็นตัวเร่ง (Photochemical reaction) อัตราของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของแสง รวมถึงปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่ง อัตราของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณของเอนไซม์ เป็นต้น มีกฎอัตราอันดับศูนย์ ดังสมการ 2.11

$$\text{อัตรา} = \frac{d[A]}{dt} = -k \quad (2.11)$$

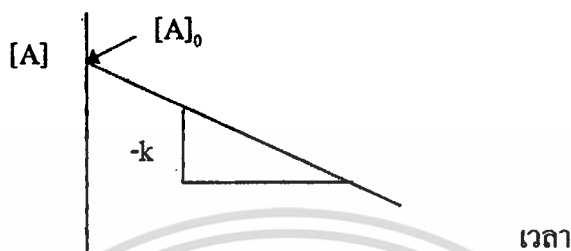
เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.11 จะได้สมการ 2.12 ดังนี้

$$[A]_0 - [A] = kt \quad (2.12)$$

$$\text{และถ้า } [A] = \frac{[A]_0}{2} \therefore t_{\frac{1}{2}} = \frac{[A]_0/2}{k} = \frac{0.5[A]_0}{k} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.13 จะพบว่า $t_{1/2}$ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น กล่าวคือ ในเวลาครึ่งชีวิต ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์มีหน่วยเป็นความเข้มข้นต่อเวลา (moles/L-sec หรือ mg/L-s) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ($[A]$) กับเวลา (t) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อันดับของปฏิกิริยาเป็นศูนย์ [26]

2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (First-order reaction)

เมื่อเลขยกกำลัง a หรือ b รวมกันแล้วมีค่าเป็นหนึ่ง อัตราของปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง กล่าวคือ เป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยา โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงตามของความเข้มข้นสารตั้งต้น เช่น สารตั้งต้น A มีอันดับปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสาร A เป็น 3 เท่า ทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่า (3¹) สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.14

$$\text{อัตรา} = \frac{d[A]}{dt} = -k[A] \quad (2.14)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.14 จะได้สมการ 2.15 และสมการ 2.16 ดังนี้

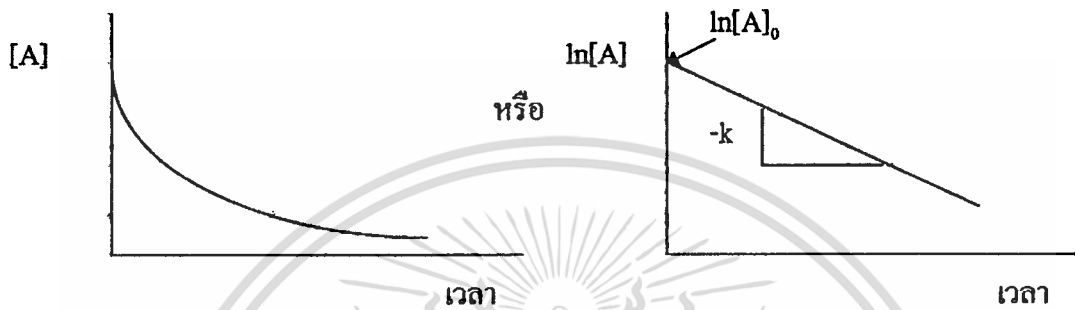
$$\ln[A] - \ln[A]_0 = -kt \quad (2.15)$$

$$\text{หรือ } [A] = [A]_0 e^{-kt} \quad \text{หรือ } 2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (2.16)$$

$$\text{และถ้า } [A] = \frac{[A]_0}{2} \quad \therefore t_{1/2} = \frac{2.303 \log 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.17 จะพบว่า $t_{1/2}$ ค่าครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น กล่าวคือ ไม่ว่าสารตั้งต้นจะมีค่าเป็นเท่าไรก็ตาม ในเวลาครึ่งชีวิตความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงแปรผกผันตามค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยา (k) ซึ่งมีหน่วยเป็นเศษส่วนของเวลา (sec^{-1}) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ($[A]$) กับเวลา (t) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อันดับของปฏิกิริยาเป็นหนึ่ง [26]

2.6.3 แบบจำลองการดูซับอันดับสอง (Second-order reaction)

เมื่อเลขยกกำลัง a หรือ b รวมกันแล้วมีค่าเป็นสอง อัตราของปฏิกิริยาจะเป็นอันดับสอง กล่าวคือ เป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยา โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงเป็นสองเท่าตามของความเข้มข้นสารตั้งต้นเช่น สารตั้งต้น A มีอันดับปฏิกิริยาเป็นที่สอง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสาร A เป็น 3 เท่า ทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็นเก้าเท่า (3^2) สมการแบบจำลองการดูซับอันดับหนึ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.18)

$$\text{อัตรา} = \frac{d[A]}{dt} = -k[A]^2 \quad \text{หรือ} \quad = -k[A][B] \quad (2.18)$$

$$\text{หรือ} \quad -\frac{d[A]}{[A]^2} = k dt$$

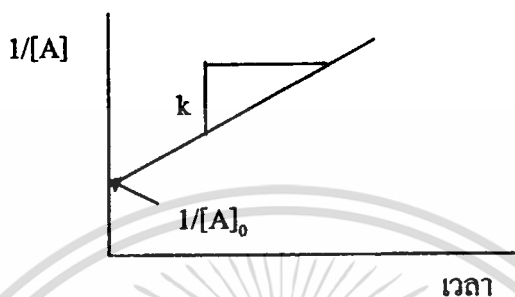
เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.18 จะได้สมการ 2.19 ดังนี้

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt \quad (2.19)$$

$$\text{และถ้า } [A] = \frac{[A]_0}{2} \quad \therefore t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.20 จะพบว่า $t_{1/2}$ ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสองแปรผกผันกับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น เช่นเดียวกับปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ซึ่งค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองมีหน่วยเป็นลิตรต่อโมล-เวลา (L/moles-sec หรือ L/mg-sec) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ($1/[A]$) กับเวลา (t) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อันดับของปฏิกิริยาเป็นสอง [26]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hammami *et al.* [8] ศึกษาการใช้สัจจจากระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศสเปน ในการดูดซับโลหะคือ ทองแดง แคดเมียม สังกะสี และสารละลายผสมระหว่างโลหะทองแดงกับแคดเมียม ทองแดงกับสังกะสี และแคดเมียมกับสังกะสีพบว่า สัจจจามีประสิทธิภาพดูดซับทองแดง > แคดเมียม > สังกะสี เมื่อสารละลายผสมมีทองแดงความเข้มข้นสูง ทำให้การดูดซับแคดเมียม และสังกะสี ลดลงร้อยละ 53 และ 67 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้สารละลายแคดเมียมความเข้มข้นสูงก็มีผลต่อการดูดซับทองแดงเช่นกัน และแคดเมียมยังทำให้การดูดซับสังกะสีลดลงร้อยละ 47 เมื่อทดลองเปรียบเทียบการดูดซับของสารละลายผสมพบว่า ทองแดงดูดซับร้อยละ 57 ของสารละลายผสมระหว่างทองแดงกับแคดเมียม และทองแดงดูดซับร้อยละ 83 ของสารละลายผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี รวมถึงแคดเมียมดูดซับร้อยละ 71 ของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมกับสังกะสี

Tsezos and Bell [24] เปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดเพนตะคลอโรฟีนอลระหว่างสัจจจที่มีเซลล์ที่มีชีวิตและสัจจจที่เซลล์ตายแล้ว ซึ่งถูกฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสพบว่า สัจจจที่มีเซลล์ที่มีชีวิตกำจัดเพนตะคลอโรฟีนอลได้สูงถึง 650 $\mu\text{g/g}$ ในขณะที่สัจจจที่เซลล์ตายแล้วสามารถดูดซับได้เพียง 180 $\mu\text{g/g}$ สัจจจที่เซลล์ตายแล้วมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลน้อยกว่าสัจจจที่ยังมีชีวิตประมาณร้อยละ 28 สันนิษฐานว่าเป็นผลเนื่องมาจากเกิดกระบวนการดูดซับและการย่อยสลายโดยแบคทีเรียในสัจจจที่มีชีวิต

Aksu and Yener [21] เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล ออ โทคลอโรฟีนอล และ พาราคลอโรฟีนอล (phenol : P *o*-chlorophenol : 2-CP *p*-chlorophenol : 4-CP) โดยใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและบอร์ด (Meteksan paper and board industry) ที่ประเทศตุรกีพบว่า สลัดจ์มีความสามารถในการดูดซับ 4-CP > 2-CP > P เป็น 116.3 102.4 และ 86.1 mg/g ตามลำดับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับอยู่ในช่วง 1-3 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในช่วง 25-500 mg/l ทำให้สลัดจ์ดูดซับ P 2-CP 4-CP เพิ่มขึ้นเป็น 37.1-210.3 36.2-239.1 38.9-247.3 mg/g ตามลำดับ

Aksu *et al.* [27] เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล นิกเกิล และสารละลายผสมระหว่างฟีนอลกับนิกเกิล โดยสลัดจ์จากการเลี้ยงเชื้อพบว่า สลัดจ์มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และนิกเกิลที่พีเอช 1 และ 4.5 ได้สูงสุด 166.6 และ 208.3 mg/g ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นเท่ากัน นิกเกิลมีผลขัดขวางกระบวนการดูดซับฟีนอล มากกว่าที่ฟีนอลจะขัดขวางกระบวนการดูดซับนิกเกิล

Jianlong *et al.* [28] ศึกษาการดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอล (PCP) ด้วยสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียของประเทศอังกฤษ สลัดจ์ถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับมีค่าระหว่าง 6-8 ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของ PCP ทำให้สลัดจ์มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองของฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาปริมาณของสลัดจ์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ 0.5-5 g/l ทำให้การดูดซับลดลงเหลือความเข้มข้น 2,560-1,120 µg/l

Brandt *et al.* [29] เลี้ยงเชื้อ *Mycobacterium* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่มักพบในสลัดจ์ เพื่อดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอล (PCP) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเชื้อลดลงจาก 0.5-0.1 g/l ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น 4 เท่า ที่พีเอช 5.4 โดยให้เหตุผลว่า อาจเกิดจากการที่มีปริมาณเชื้อในสารละลายมากเกินไป ทั้งเซลล์ที่มีพื้นผิวน้อยและเซลล์ที่มีพื้นผิวมาก ทำให้เซลล์ที่มีพื้นผิวน้อยเข้าไปปิดบังเซลล์ที่มีพื้นผิวดูดซับมาก เป็นผลให้ดูดซับ PCP ได้น้อย

Rao and Viraraghavan [30] เลี้ยง *Aspergillus niger* ซึ่งเป็นเชื้อราที่มักพบในสลัดจ์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล ระหว่างเชื้อราที่ตายแล้วกับเชื้อราที่นำไปบำบัดด้วยวิธีต่างๆพบว่า การดูดซับฟีนอลที่ความเข้มข้น 1 mg/l พีเอช 5.1 มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเชื้อราถูกบำบัดด้วยกรดกำมะถัน (50%) > สารซัลฟัด (42%) > โซเดียมไฮดรอกไซด์ (39.9%) > เชื้อที่ตายแล้ว (26.8%) > กรดไนตริก (20.6%) ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น 6405 บริษัท Jenway
- 2) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AA680 บริษัท Shimadzu
- 3) เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence) รุ่น SRS 3400 บริษัท Bruker A.G.
- 4) เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning Electron Microscopy) รุ่น 1450VP บริษัท Leo
- 5) เครื่องวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอน (Total Organic Carbon Analyzer : TGA) รุ่น TOC-V_{CSH} บริษัท SHIMADZU
- 6) เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Laboratory System) บริษัท Milestone
- 7) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น MSB020 บริษัท Sanyo
- 8) เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) รุ่น DIAX 900 บริษัท Heidolph
- 9) เครื่องเขย่า (Rotary Shaker) รุ่น SGM-300 บริษัท Gallenkamp
- 10) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter) รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument Company
- 11) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single Pan Balance) รุ่น TC-254 บริษัท Denver- Instrument Company
- 12) ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (High Performance Lab Oven) รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher scientific
- 13) ตู้เย็นควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerator) รุ่น SF-48 บริษัท Sigma
- 14) ตะแกรงขนาด 12 เมช (1.700 mm.) 35 เมช (0.500 mm.) 70 เมช (0.212 mm.) 100 เมช (0.150 mm.) และ 200 เมช (0.075 mm.) (Laboratory Test Sieve ASTM E11) บริษัท Endecotts
- 15) เครื่องแก้ว (Glassware)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

- 1) สลัดจ์ (Activated sludge) จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งของ กรุงเทพมหานคร
- 2) ฟีนอล (Phenol : C_6H_5OH) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 3) 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-Aminoantipyrin) เกรควิเคราะห์ บริษัท Fluka
- 4) โพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide : $K_3Fe(CN)_6$) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 5) ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Dipotassium hydrogen phosphate : K_2HPO_4) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 6) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate : KH_2PO_4) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 7) เมททิลีนบลู (Methylene blue) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 8) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide : NaOH) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 9) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide : NH_4OH) เกรควิเคราะห์ บริษัท Fisher Chemical
- 10) สารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น (Sulfuric acid : H_2SO_4) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 11) สารละลายกรดดินประสิวเข้มข้น (Nitric acid : HNO_3) เกรควิเคราะห์ บริษัท Labscan
- 12) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCl) เกรควิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific

3.2 การเตรียมสารเคมี

3.2.1 สารละลายฟีนอลเข้มข้น 1,000 mg/l (Stock solution)

นำฟีนอล 1 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

3.2.2 สารละลายฟีนอลเข้มข้น 100 mg/l (Intermediate phenol solution)

เปิดสารละลายฟีนอลเข้มข้น 1,000 mg/l มา 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เตรียมใหม่ทุกวัน

3.2.3 สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 6.8

นำโคโพแทสเซียมไฮโครเจนฟอสเฟต 104.5 กรัม และ โพแทสเซียมไดไฮโครเจนฟอสเฟต 72.3 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร จะได้ค่าพีเอชเป็น 6.8 เก็บสารละลายในตู้เย็น

3.2.4 สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 0.5 นอร์มอล

ปิเปตสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มา 35 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร

3.2.5 สารละลายเมทิลีนบลู 1,000 mg/l

นำเมทิลีนบลู 1 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

3.2.6 สารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ (เตรียมใหม่ทุกสัปดาห์)

นำโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ 4 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร เก็บในขวดแก้วสีชา

3.2.7 สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน (เตรียมใหม่ทุกวัน)

นำ 4-อะมิโนแอนติไพรีน 1 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

3.3 แหล่งที่มาของสลัดจ์

สลัดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ถูกเก็บรวบรวมมาจาก บริเวณสถานตากสลัดจ์ของระบบจัดการกากตะกอนชีวภาพ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร โดยสลัดจ์ได้ผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆคือ การผสม การเก็บกัก การทำให้ชื้น การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เติมน้ำพอลิเมอร์ และรีดน้ำออกด้วยสายพาน สลัดจ์ที่ได้จะมีปริมาณของแข็งร้อยละ 20 (%DS)

ระบบจัดการกากตะกอนชีวภาพของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งนี้ นอกจากจะรองรับสลัดจ์ภายในโรงบำบัดแล้ว (ร้อยละ 60) ยังได้รองรับตะกอนส่วนเกินจากโรงบำบัดน้ำเสียอื่นๆภายนอกโรงบำบัด ที่อยู่ภายใต้การควบคุมของ กองจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร โดยระบบจัดการกากตะกอนชีวภาพ มีความสามารถบำบัดสลัดจ์ได้ 500 ลูกบาศก์เมตร (%20 DS) ต่อวัน

สลัดจ์ที่ผ่านระบบจัดการกากตะกอนชีวภาพแล้ว จะถูกนำมาบริเวณสถานตากตะกอน ซึ่งปัจจุบันมีหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนรับไปใช้ประโยชน์เช่น เทศบาลจังหวัดระยอง และชุมชนฉัตรชัยเสริมโชค เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร เป็นต้น

3.4 การเตรียมสารละลายสลัดจ์

- 1) นำสลัดจ์น้ำเสี้ยวชุมชน มาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 2) นำส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง แล้วนำสลัดจ์มาล้างด้วยน้ำกลั่น
- 3) ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 4) นำส่วนที่เป็นสารละลายทิ้ง แล้วนำสลัดจ์มาล้างแบบเดียวกันอีก 2 ซ้ำ
- 5) นำสลัดจ์ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) นำสลัดจ์มาบด และคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อน 12 เมช (เล็กกว่า 1.700 mm), 12-35 เมช (ระหว่าง 1.700-0.500 mm), 35-70 เมช (ระหว่าง 0.500-0.212 mm) 70-100 เมช (ระหว่าง 0.212-0.150 mm), 100-200 เมช (ระหว่าง 0.150-0.075 mm) และ 200 เมช (เล็กกว่า 0.075 mm)
- 7) ชั่งสลัดจ์แต่ละขนาดมา 5 กรัม ผสมน้ำกลั่น 100 ml ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml
- 8) ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องไฮโมจิไนเซอร์ ที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ดังนั้นสารละลายสลัดจ์ที่ได้จะมีปริมาณสลัดจ์อยู่ 5 g/100 ml โดยสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณสลัดจ์ได้
- 9) เก็บรักษาสารละลายสลัดจ์ในตู้เย็น อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.5 การศึกษาสมบัติของสลัดจ์

ทำการศึกษสมบัติต่างๆของสลัดจ์ได้โดยใช้วิธี และเครื่องมือต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของสลัดจ์

ปัจจัย	วิธี	เครื่องมือ
1) ลักษณะโครงสร้าง	Scanning Electron Microscopy	Scanning Electron Microscope
2) ส่วนประกอบอนินทรีย์	X-Ray Fluorescence spectroscopy	X-Ray Fluorescence Spectrometer
3) ความชื้น	Total Solids Dried at 103-105 °C [31]	High Performance Lab Oven
4) ค่าพีเอช	Electrometric Method [31]	pH Meter
5) พื้นที่ผิว	Methylene blue Adsorption [32]	UV-Visible Spectrophotometer
6) ปริมาณสารอินทรีย์	Combustion-Infrared Method [31]	Total Organic Carbon Analyzer
7) ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium Saturation Method [33]	Glassware
8) ทดสอบการชะละลาย	Leachate Extraction Procedure [34] Toxicity Characteristic Leaching Procedure [35]	Glassware Glassware
9) การย่อยโลหะหนัก	Microwave-Assisted Digestion [31]	Microwave
10) วิเคราะห์โลหะหนัก	Direct Air-Acetylene Flame [31]	Flame Atomic Absorption Spectrophotometer

3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล

3.6.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสลัดจ์

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด

Duran ขนาด 100 ml

- 2) เติมสารละลายสลัดจ์ขนาดอนุภาคต่างๆ ปริมาณ 5 g/100 ml ปริมาตร 10 ml

จากการเตรียมในหัวข้อที่ 3.4

- 3) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 5) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31]

โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ

- 6) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.6.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด

Duran ขนาด 100 ml.

- 2) เติมสารละลายสลัดจ์ขนาดที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.1

3) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบ 0 100 125 150 200 250 และ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- 4) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 5) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31]

โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ

- 6) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.6.3 ศึกษาผลของพีเอช

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด

Duran ขนาด 100 ml.

- 2) เติมสารละลายสลัดจ์ขนาดที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 3.6.1

3) ปรับค่า pH ของสารละลายฟีนอล ให้ได้ 2 4 6 8 10 และ 12 ด้วยสารละลายกรดกำมะถัน หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์

4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.6.4 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

- 1) ปิเปิดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml.
- 2) เติมสารละลายสลัดจ์ขนาดที่เหมาะสมจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.1
- 3) ปรับค่า pH ของสารละลายฟีนอล ให้ได้ตามผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.3
- 4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมตามการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลา 1 2 4 6 24 และ 48 ชั่วโมง
- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.6.5 ศึกษาผลของปริมาณสลัดจ์และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล

- 1) ปิเปิดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 10 25 50 100 และ 125 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml
- 2) เติมสารละลายสลัดจ์ขนาดที่เหมาะสมตามผลการทดลองจากหัวข้อที่ 3.6.1 ที่ปริมาณสลัดจ์ 0.5 1.0 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 g/100 ml ปริมาตร 10 ml จากการเตรียมสารละลายสลัดจ์ในหัวข้อที่ 3.4
- 3) ปรับค่า pH ของสารละลายฟีนอล ให้เหมาะสมตามผลในหัวข้อที่ 3.6.3
- 4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4
- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 125 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml.
- 2) ใส่สารละลายสัณฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 ml
- 3) ปรับค่า pH ของสารละลายฟีนอล ให้ได้ตามผลจากข้อที่ 3.6.3
- 4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลาที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4
- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสัณฐาน

3.8 การศึกษาการคายซับ (Desorption)

- 1) ปิเปตน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml มาใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml
- 2) ใส่สัณฐานที่ได้จากการทดลองดูดซับในระยะเวลาสัมผัสต่างๆ จากหัวข้อที่ 3.6.4
- 3) เขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 5) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 6) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสัณฐาน

3.9 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic)

- 1) ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 50 mg/l ปริมาตร 90 ml ใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml.
- 2) ใส่สารละลายสัณฐานที่เหมาะสมจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6 ปริมาตร 10 ml
- 3) ปรับค่า pH ของสารละลายฟีนอล ให้ได้ตามผลการทดลองหัวข้อที่ 3.6.3
- 4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นระยะเวลาต่างๆ
- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสัณฐาน

3.10 การศึกษาอิทธิพลของโลหะละลายจากสลัดจ์ต่อการกำจัดฟีนอล

- 1) ปิเปตสารละลายผสมระหว่างฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 mg/l และทองแดงหรือสังกะสีความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 90 ml มาใส่ในขวด Duran ขนาด 100 ml
- 2) ใส่สารละลายสลัดจ์ที่เหมาะสมจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6 ปริมาตร 10 ml
- 3) ปรับค่า pH ของสารละลายผสมให้ได้ตามผลการทดลองจากหัวข้อที่ 3.6.3
- 4) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลาที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.4
- 5) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอล และ โลหะทองแดงหรือสังกะสี [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 7) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

3.11 การศึกษาสัดส่วนของกลไกการดูดซับฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว

- 1) เตรียมสารละลายสลัดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว 5 g/100 ml ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อ 3.6.1 มาทำการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 Psi ระยะเวลา 20 นาที เป็นเวลา 3 วัน [25]
- 2) นำสารละลายสลัดจ์มา 10 ml ผสมกับสารละลายฟีนอลความเข้มข้นต่างคือ 25 50 100 125 175 225 250 และ 300 mg/l ปริมาตร 90 ml แล้วนำมาปรับค่า pH ให้ได้ตามผลการทดลองจากหัวข้อที่ 3.6.3
- 3) นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.2 เป็นเวลาดังผลจากหัวข้อที่ 3.6.4
- 4) นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที
- 5) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาฟีนอลด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน [31] โดยทำการทดลองแบบเดียวกัน 3 ซ้ำ
- 6) ทำการทดลองในสภาวะเดียวกับข้างต้น โดยไม่ใส่สารละลายสลัดจ์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์จาก โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วนดังนี้คือ (1) ศึกษาลักษณะและสมบัติของสลัดจ์ (2) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลของสลัดจ์ (3) ศึกษาการคายซับของสลัดจ์ที่ผ่านการดูดซับฟีนอล (4) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดฟีนอลด้วยสลัดจ์ (5) ศึกษาอิทธิพลของโลหะชะละลายจากสลัดจ์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล และ (6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลระหว่างสลัดจ์ที่เซลล์จุลินทรีย์ตายแล้วและสลัดจ์ที่เซลล์จุลินทรีย์มีชีวิต ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.1 ลักษณะและสมบัติของสลัดจ์

สลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาได้เก็บรวบรวมมาจากลานคอกะกอนของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ผ่านระบบการรีดน้ำมาแล้ว และมีปริมาณของแข็งร้อยละ 20 ค่อน้ำหนักสลัดจ์แห้ง มีสีดำ ลักษณะคล้ายดิน ดังรูปที่ 4.1 นำสลัดจ์ที่เก็บรวบรวมได้มาผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.2ก) และบดให้ละเอียด (รูปที่ 4.2ข) ก่อนนำไปใช้ในการศึกษาลักษณะและสมบัติของสลัดจ์



รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของสลัดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สลัดจ์ที่ผ่าน (ก) การอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ (ข) การบดให้ละเอียด

4.1.1 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคสลัดจ์

เมื่อนำสลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการบดให้ละเอียดมาหาสัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคสลัดจ์พบว่า สลัดจ์ที่ผ่านการบดประกอบด้วยอนุภาคสลัดจ์ขนาดต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีสัดส่วนของอนุภาคสลัดจ์ขนาดระหว่าง 0.500-1.700 mm ในปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือขนาดระหว่าง 0.212-0.500 mm ระหว่าง 0.075-0.150 mm และระหว่าง 0.150-0.212 mm ตามลำดับ และสัดส่วนขนาดอนุภาคที่มีปริมาณน้อยที่สุดคือ ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm

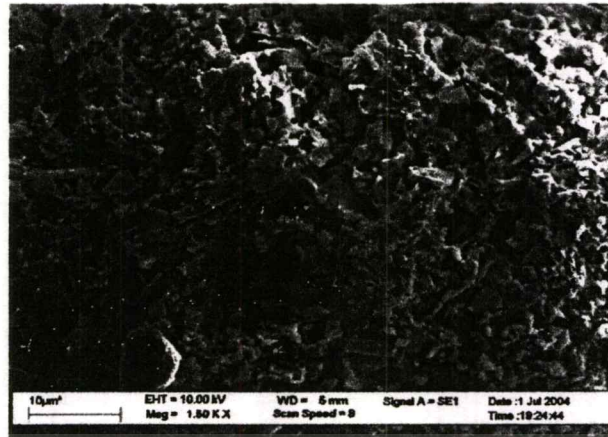
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคสลัดจ์

ขนาด	ร้อยละ
ไม่คัดขนาด	100
ระหว่าง 0.500-1.700 mm (ระหว่าง 35-12 เมช)	59.99
ระหว่าง 0.212-0.500 mm (ระหว่าง 70-35 เมช)	20.21
ระหว่าง 0.150-0.212 mm (ระหว่าง 100-75 เมช)	6.66
ระหว่าง 0.075-0.150 mm (ระหว่าง 200-100 เมช)	8.53
เล็กกว่า 0.075 mm (เล็กกว่า 200 เมช)	4.61

4.1.2 ลักษณะของสลัดจ์

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างความเป็นรูพรุนของสลัดจ์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่าพบว่า สลัดจ์มีลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของสัลดจ์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิว และ โครงสร้างความเป็นรูพรุนของสัลดจ์ที่ กำลังขยาย 1,500 เท่า (รูปที่ 4.3) พบว่าบริเวณพื้นผิวของสัลดจ์มีลักษณะขรุขระมาก และมีหลุมช่องว่างระหว่างผลึก ที่อาจทำให้สัลดจ์มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการยักจับสารเคมีได้ดี

4.1.3 สมบัติของสัลดจ์

จากการนำสัลดจ์ที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำกลั่น อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 24 ชั่วโมง บดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาดเล็กลงกว่า 0.075 มิลลิเมตร (200 เมช) มา ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของสัลดจ์ ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าพีเอช พื้นที่ผิว จำเพาะ ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน วิเคราะห์หา องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณโลหะทั้งหมด โลหะชะละลาย และการตรวจนับปริมาณจุลินทรีย์ ผล การวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2- 4.5

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสัลดจ์

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
ความชื้น (%)	11.26 (± 0.30)
ค่าพีเอช	6.83 (± 0.30)
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	44.52
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mgC/g)	25.60 (± 0.02)
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/100g)	38.18 (± 0.45)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสัลดจ์ (ตารางที่ 4.2) เมื่อนำผลการ ทดลองมาพิจารณาในด้านปริมาณความชื้นของสัลดจ์พบว่า สัลดจ์ที่ผ่านการอบมีความชื้นเหลืออยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 11.26 เมื่อทดสอบค่าพีเอชของสลัดจ์พบว่า สลัดจ์มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.82 จัดได้ว่าสลัดจ์มีค่าพีเอชเป็นกลาง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการมีชีวิตอยู่ของจุลินทรีย์ในสลัดจ์ โดย Metcalf and Eddy [2] รายงานว่าจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5-7.5

เมื่อทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของสลัดจ์ด้วยวิธีการดูดซับสีเมทิลีนบลู (Methylene blue adsorption) [32] พบว่าสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 44.52 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจัดได้ว่าเป็นปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะที่พบได้ในสลัดจ์ทั่วไป โดยสลัดจ์ทั่วไปมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 40-140 ตารางเมตรต่อกรัม [36] เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของสลัดจ์กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีเดียวกันพบว่า สลัดจ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ (80-300 ตารางเมตรต่อกรัม) [37] แสดงว่าสลัดจ์อาจมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารเคมีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ อาจมีความจำเป็นที่ต้องอาศัยกลไกการกำจัดรูปแบบอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องในการบำบัดสารเคมีด้วยสลัดจ์

เมื่อพิจารณาปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนของสลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองพบว่า สลัดจ์มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 25.60 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อกรัม โดยสารอินทรีย์ที่พบในสลัดจ์อาจมีแหล่งกำเนิดมาจากตะกอนของจุลินทรีย์ส่วนเกินที่ถูกกำจัดออกจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่ง Metcalf and Eddy [2] รายงานว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในสลัดจ์มีเป็น โปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก และมีส่วนประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนประมาณร้อยละ 53 ของเซลล์จุลินทรีย์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออนพบว่า สลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออนเท่ากับ 38.18 มิลลิอีควาเลนส์ต่อ 100 กรัม ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้มีค่ามากกว่าสลัดจ์จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ (Paper mill sludge) ที่มีค่าเท่ากับ 7.0 มิลลิอีควาเลนส์ต่อ 100 กรัม [38] ทั้งนี้แสดงว่าไอออนบริเวณผิวของสลัดจ์ที่นำมาศึกษามีความสามารถในแลกเปลี่ยนกับสารที่มีไอออนบวกได้ง่ายกว่าสลัดจ์ที่มาจากโรงงานเยื่อกระดาษ

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์

องค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้ (%)	องค์ประกอบ	ค่าที่วัดได้ (%)
SiO ₂	35.80	CuO	1.96
Fe ₂ O ₃	13.00	Cr ₂ O ₃	0.88
Al ₂ O ₃	12.40	TiO ₂	0.80
SO ₃	10.10	ZnO	0.67
P ₂ O ₅	9.78	MnO	0.50
CaO	9.36	As ₂ O ₃	0.50
MgO	1.98	อื่นๆ	0.88
K ₂ O	1.69		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (ตารางที่ 4.3) พบว่าสลัดจ์มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงที่สุด รองลงมาคือสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมิเนียม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของสลัดจ์พบว่า สลัดจ์ที่นำมาทดลองมีสารประกอบของทองแดงในปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ โครเมียม ไททาเนียม สังกะสี แมงกานีส สารหนู ตามลำดับ โดยโลหะเหล่านี้อาจมีแหล่งที่มาจากน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัด

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์ชุมชนที่นำมาศึกษาครั้งนี้กับผลการทดลองของ Calace *et al.* [39] ที่เป็นสลัดจ์จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษพบว่า สลัดจ์ทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน โดยสลัดจ์จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ (Paper mill sludge) มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 50 โดยการมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นการแสดงถึงแนวโน้มของการดูดซับสารละลายที่มีขั้วได้ดี เนื่องจากภายในโครงสร้างของสาร อนินทรีย์จำพวกซิลิกา (SiO_2) บริเวณพันธะระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน มีความแตกต่างของสภาพไฟฟ้าลบ (Electronegativity) สูง เป็นผลให้โครงสร้างกลายเป็นสารที่มีขั้ว (Ionic structure) สามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลที่มีขั้วได้ [6]

ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะทั้งหมดและโลหะชะละลายในสลัดจ์

วิธี	ทองแดง	สังกะสี	โครเมียม	นิกเกิล
ปริมาณโลหะทั้งหมด (mg/kg)	5,809(±205.06)	1,774(±14.14)	2,476(±67.88)	323.5(±24.79)
ปริมาณโลหะชะละลาย (mg/l)				
ชะด้วยกรดกำมะถัน [32]	26.93(±0.60)	10.00(±0.01)	0.10(±0.01)	3.49(±0.01)
ชะด้วยกรดอะซิติก [33]	4.94(±0.14)	0.31(±0.01)	0.07(±0.01)	0.15(±0.02)
ชะด้วยน้ำกลั่น	1.39(±0.05)	0.30(±0.00)	0.08(±0.01)	0.28(±0.07)
ชะด้วยกรดกำมะถัน ที่พีเอช 6	0.30(±0.04)	0.03 (±0.00)	-	-

เมื่อทำการศึกษาปริมาณโลหะทั้งหมดของสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน (ตารางที่ 4.4) พบว่ามีทองแดงปนเปื้อนในปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ ปริมาณโลหะที่พบในสลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณโลหะที่พบในสลัดจ์ทั่วไป [2] หากพิจารณาในแง่การใช้ประโยชน์ของสลัดจ์พบว่า สลัดจ์ดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์บนพื้นดิน เนื่องจากมีปริมาณของทองแดง สังกะสีและนิกเกิล เกินข้อกำหนดของการนำสลัดจ์ไปใช้ประโยชน์บนพื้นดิน ตามหน่วยงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศอเมริกา (US.EPA) [3] จึงควรทำการศึกษารูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆต่อไป และเมื่อพิจารณาปริมาณโลหะที่ชะละลายออกจากสลัดจ์ด้วยสารสกัด (Extraction fluid) ชนิดต่างๆพบว่า สลัดจ์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณโลหะจะละลายไม่เกินค่ามาตรฐานตามวิธีต่างๆ กล่าวคือสกัดจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนที่นำมาทดลอง ไม่จัดเป็นสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable substances) ตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม [34] และหน่วยงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศอเมริกา (US.EPA) [35] อีกทั้งยังพบว่า การปรับค่าพีเอชของสารละลายสกัดด้วยกรดกำมะถันให้เป็น 6 มีเพียงโลหะทองแดง และสังกะสีจะออกมาเท่านั้น โดยมีโลหะทองแดงจะออกมามากกว่าสังกะสีอยู่ 10 เท่า

ตารางที่ 4.5 ปริมาณจุลินทรีย์ในสารละลายสกัด

ชนิด	Colony Forming Units (CFU/ml)
จุลินทรีย์ทั้งหมด	2.8×10^7
แบคทีเรีย	1.0×10^6
รา	3.3×10^5
ยีสต์	ไม่พบ

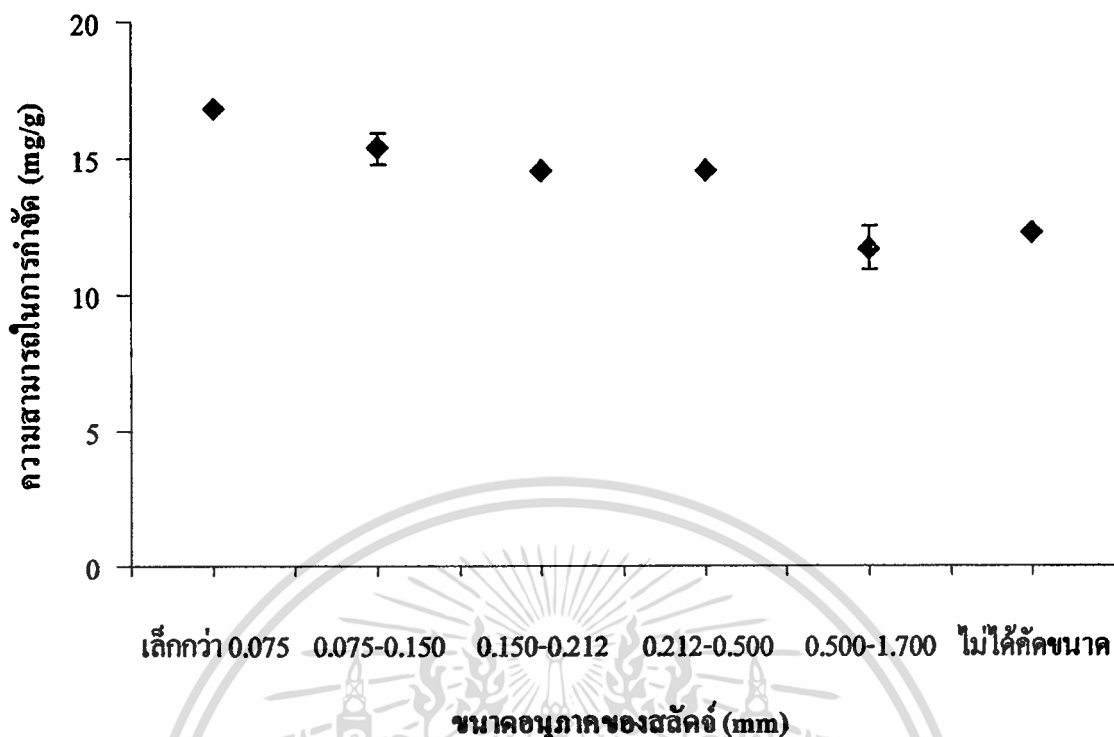
จากการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในสารละลายสกัดพบว่า สารละลายสกัดที่ใช้เป็นตัวดูดซับในการศึกษาครั้งนี้มี จุลินทรีย์หลายชนิดเป็นองค์ประกอบ (ตารางที่ 4.5) เช่น แบคทีเรีย และรา ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีศักยภาพในการกำจัดสารละลายฟีนอลได้ [10, 27-28, 38]

4.2 สภาวะที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสกัด

การศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอลของสกัด ได้ใช้วิธีการทดสอบแบบครั้ง (Batch) โดยสภาวะที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของสกัด ความเร็วรอบสัมผัส ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล และปริมาณสกัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ขนาดอนุภาคของสกัด

การศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาคของสกัดต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยใช้สกัดที่ทำ การร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างกัน 6 ช่วงคือ เล็กกว่า 0.075 mm (200 เมช) 0.075-0.150 mm (200-100 เมช) 0.150-0.212 mm (100-75 เมช) 0.212-0.500 mm (75-35 เมช) 0.500-1.700 mm (35-12 เมช) และไม่คัดขนาด มาเตรียมสารละลายสกัด (ดังหัวข้อที่ 3.3) เพื่อกำจัดสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 mg/l พบว่าขนาดของสกัดที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.4



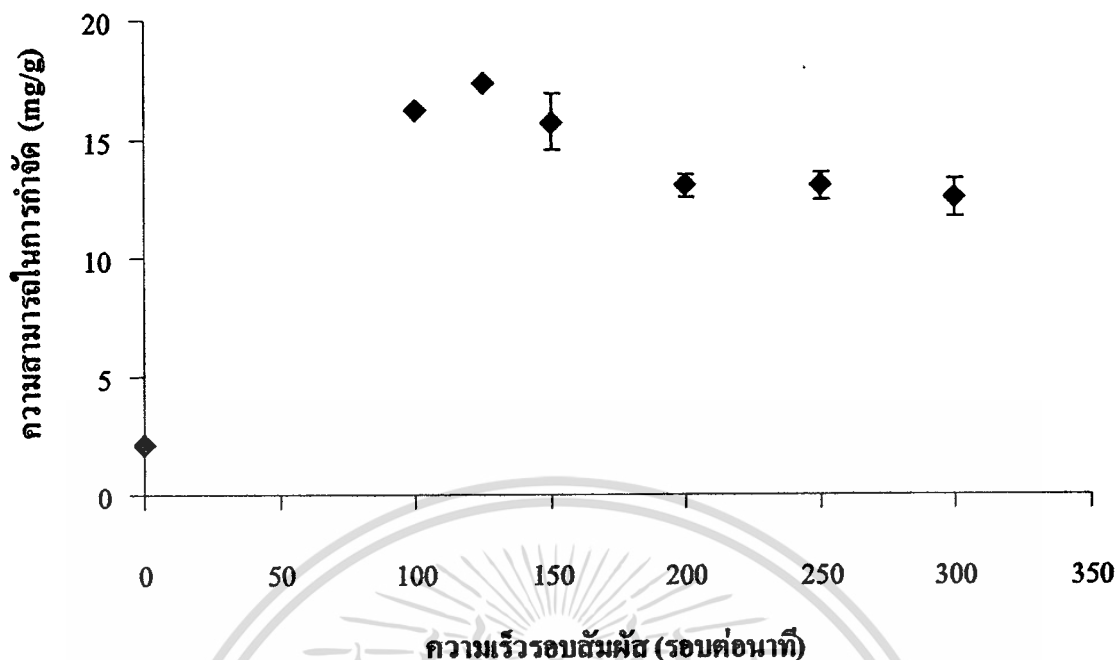
รูปที่ 4.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคสัลดจ์ต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาคของสัลดจ์ต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.4) พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของสัลดจ์เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลมีแนวโน้มลดลง เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อสัลดจ์มีขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของสัลดจ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของฟีนอลมีโอกาสสัมผัสกับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคสัลดจ์ได้มากขึ้น ดังนั้นความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลของอนุภาคสัลดจ์ขนาดเล็กจึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสัลดจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุดคือ 16.82 (±0.11) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 94.34 รองลงมาคือขนาด 0.075-0.150 0.150-0.212 0.212-0.500 ไม่ได้คัดขนาด และ 0.500-1.700 mm มีความสามารถในการกำจัด 15.35 (±0.58) 14.57 (±0.13) 14.53 (±0.43) 12.28 (±0.19) และ 11.68 (±0.79) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 86.10 81.75 81.52 68.93 และ 65.56 ตามลำดับ

4.2.2 ความเร็วรอบสัมผัส

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบสัมผัสต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล เมื่อใช้สัลดจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm กำจัดสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 mg/l โดยปรับระดับของเครื่องเขย่าให้มีความเร็วรอบสัมผัสต่างกัน 7 ระดับคือ 0 100 125 150 200 250 และ 300 รอบต่อนาที พบว่า ความเร็วรอบสัมผัสมีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

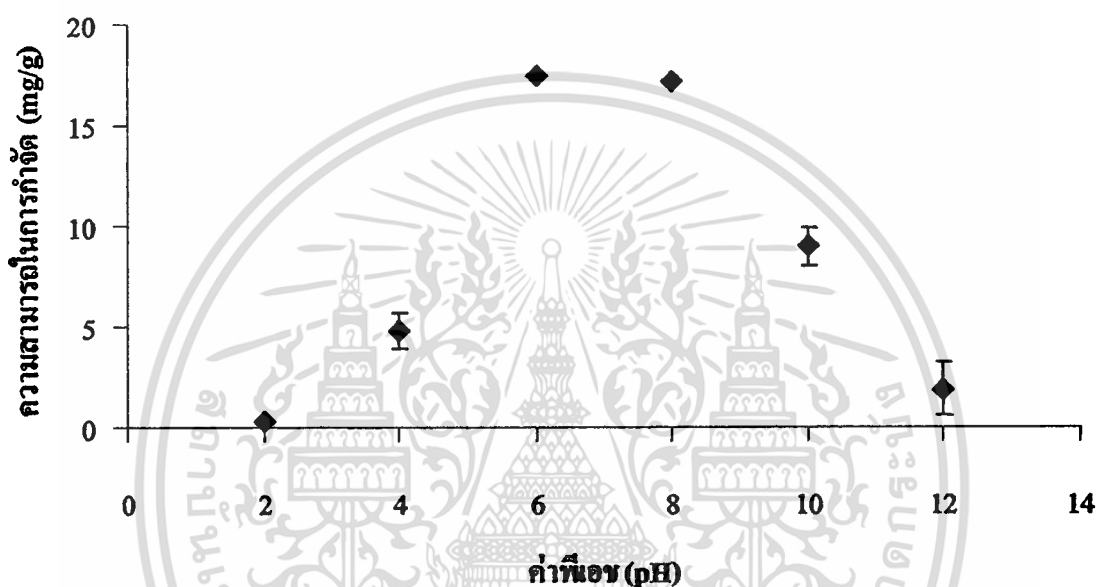


รูปที่ 4.5 อิทธิพลของความเร็วรอบสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.5) พบว่าเมื่อความเร็วรอบสัมผัสเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากเมื่ออัตราการปั่นกววนเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสตัคซ์สูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสการสัมผัสกันของอนุภาคสตัคซ์และ โมเลกุลของฟีนอลมีมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วในการเขย่าให้สูงกว่า 125 รอบต่อนาที ทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มอัตราการปั่นกววนมากขึ้น ทำให้อนุภาคของสตัคซ์และ โมเลกุลฟีนอลมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากเกินไป ลดโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาค อีกทั้งการเพิ่มอัตราการปั่นกววน อาจทำให้อุณหภูมิในระบบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองของ Gulanz *et al* [5] พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของระบบ ส่งผลให้สตัคซ์มีความสามารถในการกำจัดลดลง โดยการทดลองนี้สตัคซ์มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงสุดที่ความเร็วรอบสัมผัส 125 รอบต่อนาที มีความสามารถในการกำจัดสูงสุดที่ $17.33 (\pm 0.41)$ mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 95.10 รองลงมาคือความเร็วรอบ 100 150 200 250 300 และ 0 รอบต่อนาที มีความสามารถในการกำจัด $16.26 (\pm 0.28)$ $15.72 (\pm 1.21)$ $13.03 (\pm 0.50)$ $13.04 (\pm 0.57)$ $12.55 (\pm 0.81)$ และ $2.14 (\pm 0.17)$ mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 89.22 86.29 71.48 71.53 68.83 และ 11.71 ตามลำดับ

4.2.3 ค่าพีเอช

การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล เมื่อใช้สัณฐานขนาดเล็กกว่า 0.075 mm เพื่อกำจัดสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 mg/l โดยปรับค่าพีเอชต่างๆคือ 2 4 6 8 10 และ 12 ด้วยสารละลายกรดกำมะถัน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ เขย่าด้วยความเร็วรอบสัมผัส 125 รอบต่อนาทีพบว่า ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.6



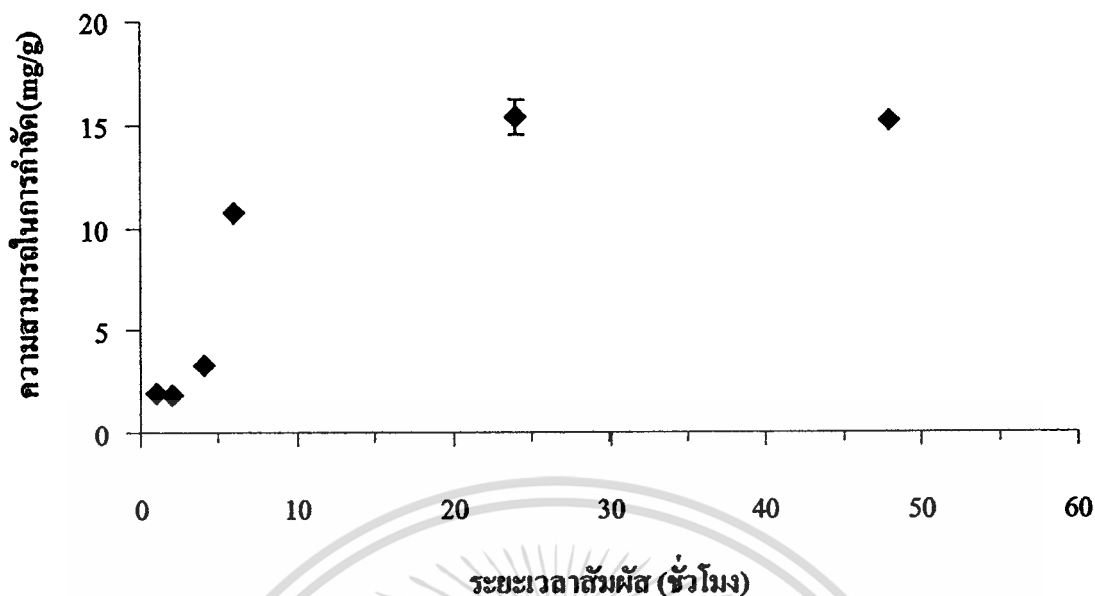
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.6) พบว่าเมื่อค่าพีเอชของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงเกินกว่า 6 ทำให้ความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง โดยที่พีเอช 6 มีความสามารถในการกำจัดสูงที่สุด 17.45 (±0.11) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 93.17 รองลงมาคือที่พีเอช 8 10 4 12 และ 2 มีความสามารถในการกำจัด 17.18 (±0.03) 8.98 (±0.92) 4.76 (±0.88) 1.91 (±1.36) และ 0.28 (±0.08) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 91.70 47.95 25.43 10.19 และ 1.50 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Jianlong *et al.* [28] ที่ใช้สัณฐานจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกำจัดสารละลายเพนตะคลอโรฟีนอลพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 6 โดยเมื่อลดค่าพีเอชจาก 8 เป็น 6 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายเพนตะคลอโรฟีนอลเพิ่มขึ้นจาก 2.01 เป็น 3.04 mg/l

ผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการใช้สัลดิจ์กำจัดสารละลายฟีนอลอาจสามารถอธิบายได้ 2 กรณีคือ ผลของค่าพีเอชต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และผลของค่าพีเอชต่อความมีประจุของสัลดิจ์และฟีนอล กรณีแรกพีเอชมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการอาศัยและมีชีวิตอยู่ของจุลินทรีย์ในสัลดิจ์พบว่าจุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ในช่วงพีเอช 4.0-9.5 และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง พีเอช 6.5-7.5 [2] ด้วยเหตุนี้เองจึงอาจเป็นสาเหตุหลักทำให้ความสามารถของสัลดิจ์ในการกำจัดสารละลายฟีนอลมีแนวโน้มลดลง เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า 4 และสูงกว่า 9.5 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และในกรณีที่สอง อาจเกิดเนื่องมาจากผลของพีเอชต่อการเกิดประจุของทั้งอนุภาคสัลดิจ์และ โมเลกุลฟีนอล เมื่อพิจารณาสัลดิจ์ในฐานะของตัวดูดซับพบว่า เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 3 บริเวณพื้นที่ผิวของสัลดิจ์มีแนวโน้มเป็นประจุบวก และจะเปลี่ยนเป็นประจุลบที่พีเอชสูงกว่า 3 [21] และเมื่อพิจารณาสารละลายฟีนอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าฟีนอลมีค่าการแตกตัวของกรดอ่อน (pKa) 9.82 กล่าวคือเมื่อสารละลายที่มีค่าพีเอชมากกว่า 9.82 ฟีนอลจะมีแนวโน้มเปลี่ยนรูปเป็นฟีนอลเลต หรือประจุลบ และเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 9.82 ฟีนอลจะอยู่ในรูปไม่มีประจุหรือเป็นกลาง ดังนั้นในกรณีของสภาวะกรดช่วงพีเอช 3-6 ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลายจะเข้าจับกับประจุลบของผิวสัลดิจ์ด้วยแรงเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrostatic attractions) ทำให้บริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคสัลดิจ์กลายเป็นประจุบวก สามารถจับกับฟีนอลได้ และในกรณีของสภาวะกลางช่วงพีเอช 6-8 ประจุลบของสัลดิจ์จะจับกับฟีนอลด้วยแรงเหนี่ยวนำทางกายภาพ ไดโพล-อินดิวิดูเอิล (Dipole-induced dipole) ทำให้ความสามารถในการกำจัดสูงสุด และเมื่อพิจารณาในกรณีสภาวะเบสช่วงพีเอช 8-12 ประจุลบของสัลดิจ์จะผลักรับประจุลบของฟีนอลเลต อีกทั้งฟีนอลเลตเป็น โมเลกุลที่มีขั้ว และมีประจุ จึงสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง

4.2.4 ระยะเวลาสัมผัส

การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล เมื่อใช้สัลดิจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm เพื่อกำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 100 mg/l ปรับค่าพีเอชเป็น 6 เขย่าด้วยความเร็ว 125 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาต่างๆคือ 1 2 4 6 24 และ 48 ชั่วโมงพบว่า ระยะเวลาสัมผัสมีอิทธิพลต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังแสดงในรูปที่ 4.7



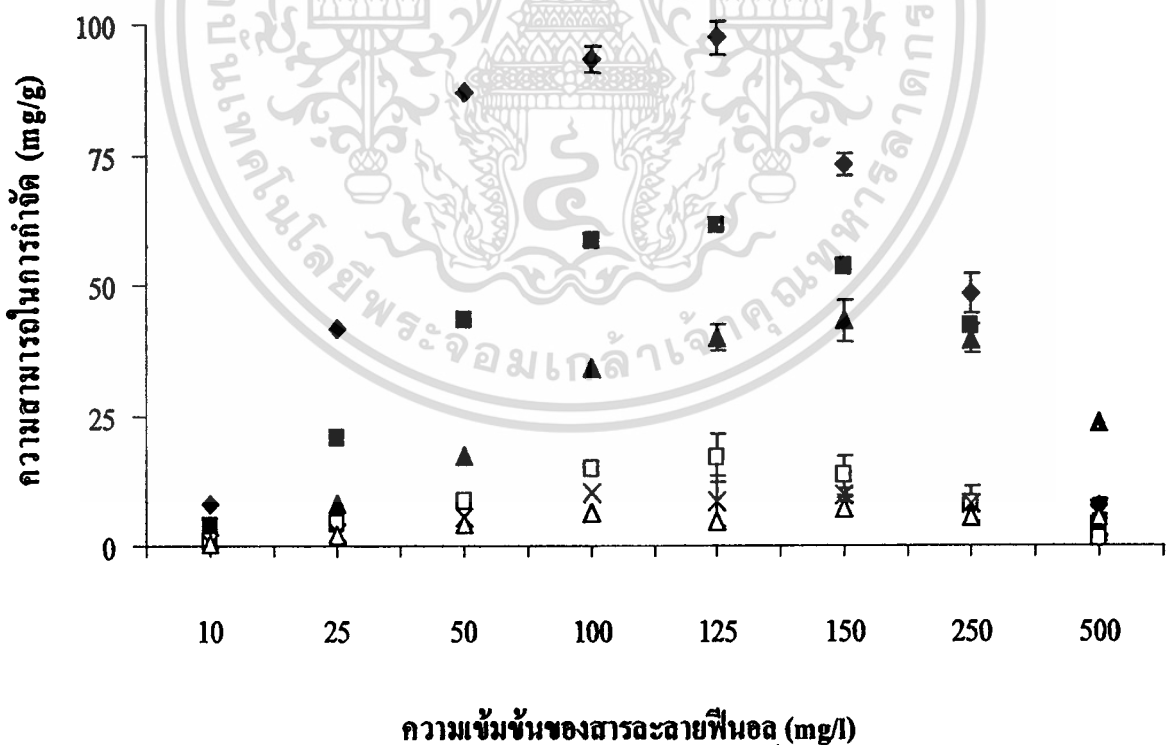
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.7) พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสขึ้นจนกระทั่ง 24 ชั่วโมง ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และภายหลัง 24 ชั่วโมง ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกจุลินทรีย์จะอยู่ในช่วงของการปรับตัวให้เข้ากับระบบใหม่ ทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ปฏิบัติการกำจัดสารละลายฟีนอลจึงจะเริ่มดำเนินอย่างชัดเจน จะเห็นได้จากปฏิบัติการกำจัดจะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งในช่วงนี้มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลประมาณร้อยละ 60 หลังจากนั้นปฏิบัติการจะดำเนินไปด้วยอัตราที่ช้าลง จนกระทั่งปฏิบัติการเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 24 ชั่วโมง ลักษณะของการกำจัดสารละลายฟีนอลมีรูปแบบคล้ายกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังปฏิบัติการแบบเบตซ์ ตั้งแต่เริ่มปรับตัวเมื่อได้รับสารอาหาร (Lag phase) และการเจริญเติบโต (Log phase) จนกระทั่งถึงช่วงคงตัว (Stationary phase) [2] โดยจุดสมดุลของปฏิบัติการมีความสามารถในการกำจัดสูงสุด $15.34 (\pm 0.89)$ mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 85.00 รองลงมาเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัส 48 6 4 1 และ 2 ชั่วโมง มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอล $15.13 (\pm 0.02)$ $10.69 (\pm 0.23)$ $3.27 (\pm 0.12)$ $1.93 (\pm 0.09)$ และ $1.85 (\pm 0.02)$ mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 83.81 59.19 18.12 10.70 และ 10.25 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของปฏิบัติการกำจัดฟีนอลด้วยสถิติ ระหว่างสถิติชุมชนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้กับสถิติจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ [21] พบว่าสถิติชุมชนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลมากกว่าสถิติจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสาเหตุมาจากแหล่งที่มาของสลัดจ์ โดยสลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองของ Aksu and Yener [21] เป็นสลัดจ์ที่เก็บรวบรวมมาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งมีการใช้ฟีนอลเป็นสารฟอกเยื่อกระดาษ ทำให้จุลินทรีย์ในสลัดจ์มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีฟีนอลเป็นส่วนประกอบ ปฏิบัติการกำจัดฟีนอลจึงดำเนินต่อไปได้โดยที่จุลินทรีย์ไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับตัวให้เข้ากับระบบใหม่ ซึ่งผลการทดลองของ Aksu and Yener [21] พบว่าปฏิบัติการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเพียง 4 ชั่วโมง

4.2.5 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลและปริมาณสลัดจ์

การศึกษาอิทธิพลด้านความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล และปริมาณสลัดจ์ต่อการกำจัด โดยใช้สลัดจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm ปริมาณ 0.05 0.10 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 กรัม จากสารละลายสลัดจ์ (ในหัวข้อที่ 3.3) มากำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้นต่างๆคือ 10 25 50 100 และ 125 mg/l ปรับค่าพีเอช 6 ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลและปริมาณสลัดจ์มีอิทธิพลต่อการกำจัดของสลัดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความเข้มข้นฟีนอลต่อความสามารถในการกำจัด เมื่อใช้สลัดจ์ปริมาณต่างๆ

(◆) 0.05 กรัม (■) 0.10 กรัม (▲) 0.25 กรัม (□) 0.50 กรัม (×) 0.75 กรัม และ (△) 1.00 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

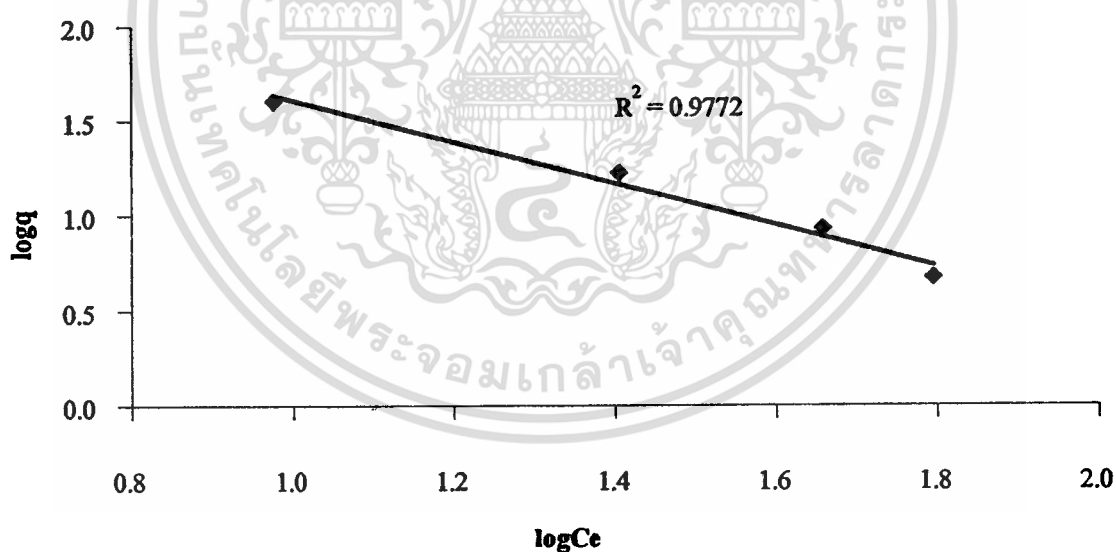
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นสารละลายฟีนอลต่อความสามารถในการกำจัดของสลัดจ์ (รูปที่ 4.8) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลจาก 10 mg/l เป็น 125 mg/l ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มการเพิ่มขึ้นสามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.05-0.25 กรัม ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Jianlong *et al.* [28] และ Aksu and Yener [21] โดยการทดลองของ Jianlong *et al.* [28] ใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในการกำจัดสารละลายเพนตะคลอโรฟีนอล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพนตะคลอโรฟีนอลขึ้น 0.025-0.5 mg/l ทำให้ความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และการทดลองของ Aksu and Yener [21] ที่ใช้สลัดจ์จากระบบบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษกำจัดสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 25-500 mg/l พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลทำให้ความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้น 37.1-210.3 mg/g ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของฟีนอลมากขึ้นทำให้โอกาสในการสัมผัสกันระหว่าง โมเลกุลฟีนอลกับอนุภาคสลัดจ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ฟีนอลให้มากกว่า 125 mg/l สลัดจ์มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง อาจเป็นผลเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนและฆ่าเชื้อ ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลของสลัดจ์ลดลง โดย Verschuereen [1] รายงานว่า สารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 64 mg/l สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดได้เมื่อได้รับระยะเวลาสัมผัสเพียง 16 ชั่วโมง ทั้งนี้ในกรณีผลการทดลองของสลัดจ์ 0.05 กรัม ที่ความเข้มข้นฟีนอล 125 mg/l มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุด 97.37 (± 3.05) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 44.49 รองลงมาคือความเข้มข้นฟีนอล 100 50 150 250 25 10 และ 500 mg/l มีความสามารถในการกำจัด 93.23 (± 2.57) 86.84 (± 0.05) 73.11 (± 2.14) 48.37 (± 3.62) 41.64 (± 0.01) 7.86 (± 0.05) และ 7.49 (± 1.50) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 53.22 -99.39 28.92 11.14 98.72 94.07 และ 0.84 ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาผลการทดลองของปริมาณสลัดจ์ (รูปที่ 4.8) พบว่าเมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง ในทุกระดับความเข้มข้นของฟีนอล โดยในกรณีผลการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล 125 mg/l สลัดจ์ปริมาณ 0.05 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสูงที่สุด 97.37 (± 3.05) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 44.49 รองลงมาคือ สลัดจ์ปริมาณ 0.10 0.25 0.5 0.75 และ 1.0 กรัม มีความสามารถในการกำจัด 61.46 (± 1.80) 39.99 (± 2.40) 16.80 (± 4.50) 8.52 (± 4.86) และ 4.71 (± 0.67) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 56.17 91.37 76.76 58.41 และ 43.05 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Jianlong *et al.* [28] พบว่า ความสามารถในการกำจัดสารละลายเพนตะคลอโรฟีนอลลดลงเมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์จาก 0.05-0.5 กรัม ทำให้ความสามารถลดลงจาก

2.560-1.120 mg/g ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัลดจ์ ส่งผลให้โลหะเข้าเย่งจับบริเวณพื้นผิวของสัลดจ์แทน โมเลกุลฟีนอล

4.2.6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการกำจัด

การศึกษาไอโซเทอร์มของการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยใช้สัลดจ์ในปริมาณต่างกันคือ 0.05 0.10 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 กรัม กำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 125 mg/l ปรับค่าพีเอชเป็น 6 เขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล นำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟีนอลที่ถูกกำจัดต่อปริมาณสัลดจ์ (q : mg/g) และความเข้มข้นฟีนอลที่เหลืออยู่ (C_e : mg/l) พบว่า ความสัมพันธ์ของการใช้สัลดจ์ในการกำจัดสารละลายฟีนอล สามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ดังรูปที่ 4.9 โดยได้สมการเส้นตรง $\log q = (-1.0957) \log C_e + 2.7056$ ($R^2=0.9772$) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_d) ได้เท่ากับ 0.4323 และค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ($\frac{1}{n}$) เท่ากับ 1.0957 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะของสัลดจ์ ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการใช้สัลดจ์กำจัดสารละลายฟีนอล

เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่สมดุลการดูดซับ และค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ($\frac{1}{n}$) ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับผลการทดลองของ Aksu and Yener [21] ที่ใช้สัลดจ์จากระบบบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในการดูดซับฟีนอล พบว่าสมดุลการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายฟีนอลของสตัคซ์จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีค่าคงที่การดูดซับ (K_d) เท่ากับ 15.1 และมีพื้นที่ผิวการดูดซับจำกัด ดังค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับ 0.45 แสดงให้เห็นว่าสตัคซ์จากระบบบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมากกว่าสตัคซ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ทำการศึกษา ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากแหล่งที่มาของสตัคซ์ โดยสตัคซ์ที่ใช้ในการทดลองของ Aksu and Yener [21] เป็นสตัคซ์ที่เก็บรวบรวมมาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งมีการใช้ฟีนอลเป็นสารฟอกเยื่อกระดาษ ทำให้จุลินทรีย์ในสตัคซ์มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่มีฟีนอลเป็นส่วนประกอบ

4.3 การคายซับของสตัคซ์ที่ผ่านการดูดซับฟีนอล

เมื่อนำสตัคซ์ที่ได้ผ่านการกำจัดสารละลายฟีนอลที่ระยะเวลา 1 2 4 6 24 และ 48 ชั่วโมง มาทำการศึกษาการคายซับของฟีนอลที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงด้วยน้ำกลั่นพบว่า สตัคซ์มีการคายฟีนอลในปริมาณต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การคายซับของสตัคซ์ที่ผ่านการกำจัดสารละลายฟีนอลที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

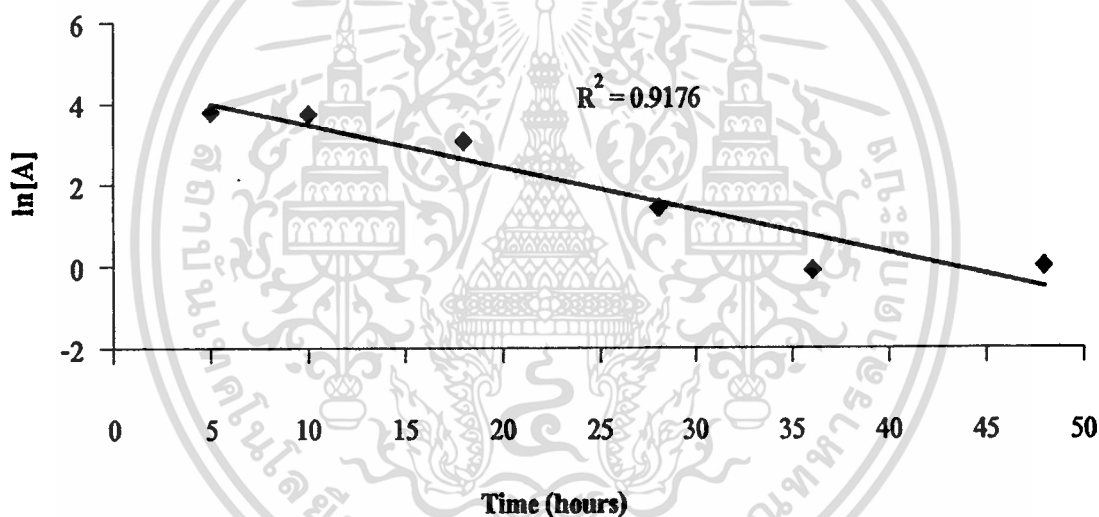
ระยะเวลาที่สตัคซ์ผ่านการดูดซับ (ชั่วโมง)	การคายฟีนอล (ร้อยละ) ของประสิทธิภาพการกำจัด
1	7.78 (± 0.01)
2	8.39 (± 0.11)
4	3.94 (± 0.07)
6	1.34 (± 0.03)
24	1.21 (± 0.05)
28	1.50 (± 0.04)

จากการศึกษาการคายซับของสตัคซ์ที่ผ่านการกำจัดสารละลายฟีนอลที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 4.6) พบว่าสตัคซ์มีการคายฟีนอลต่ำกว่าร้อยละ 9 ในทุกระยะเวลาการดูดซับ โดยเฉพาะที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่กระบวนการกำจัดสารละลายฟีนอลของสตัคซ์เข้าสู่สมดุล ทั้งการดูดซับทางกายภาพและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จึงมีการคายฟีนอลต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 1.21 เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการกำจัดอื่นๆ แสดงว่าในระยะเวลาอื่นๆ กลไกของกระบวนการกำจัดสารละลายฟีนอลอาจมีเพียงกลไกการดูดซับทางกายภาพ สตัคซ์จึงมีการคายฟีนอลได้มากกว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Rao and Viraraghavan [30] ที่ทำการทดลองใช้เชื้อรา *Aspergillus niger* ในการดูดซับสารละลายฟีนอล และศึกษาการคายซับด้วยน้ำกลั่น เขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงพบว่า เชื้อราดูดซับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายฟีนอลด้วยพันธะที่แข็งแรง และสารละลายฟีนอลถูกการคายซับออกมาสูงสุดเพียงร้อยละ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลฟีนอลถูกยึดติดบนพื้นผิวสตัดจ์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง จนทำให้น้ำกลั่นสามารถเข้าไปแย่งการดูดซับของอนุภาคสตัดจ์กับโมเลกุลฟีนอลได้เพียงเล็กน้อย

4.4 จลนพลศาสตร์ของการกำจัด

เมื่อศึกษาอัตราการกำจัดของสตัดจ์ต่อสารละลายฟีนอล ที่ทำการทดลองโดยใช้สตัดจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm ปริมาณ 0.5 กรัม กำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 50 mg/l ปรับค่าพีเอช 6 เขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาต่างๆ นำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เหลืออยู่ในระบบพบว่า การกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสตัดจ์ เป็นไปตามอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสตัดจ์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลากับความเข้มข้นฟีนอลที่เหลืออยู่ในระบบ (รูปที่ 4.10) แสดงให้เห็นว่าอัตราการกำจัดเป็นปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่ง ในกรณีที่ฟีนอลความเข้มข้น 50 mg/l ได้สมการเส้นตรง $\ln[A] = (-0.1059)t + 4.5506$ ($R^2=0.9176$) สามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการกำจัดสารละลายฟีนอล (k) ได้จากสมการของอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่า ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาเท่ากับ $0.1059 \text{ hours}^{-1}$ และมีค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) เท่ากับ 6.54 ชั่วโมง

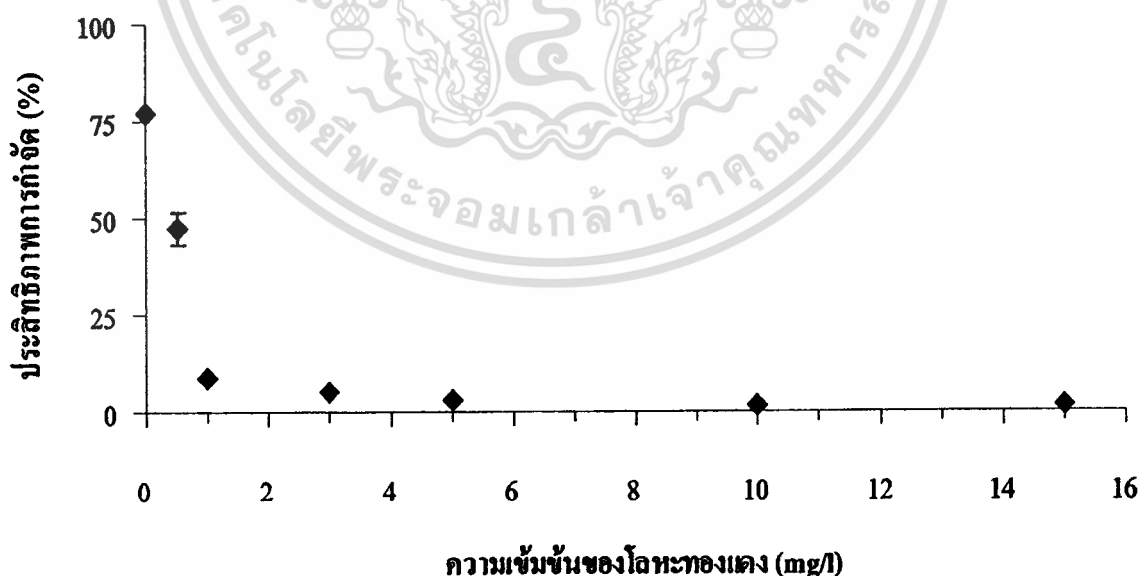
4.5 อิทธิพลของโลหะหนักต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล

การศึกษาอิทธิพลของ โลหะหนักต่อการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสตัคซ์ (organic-metal ion mixtures) ทั้งการปนเปื้อนของโลหะ 1 ชนิด และการปนเปื้อนของโลหะผสม ซึ่งโลหะที่ทำการศึกษาในครั้งนี้คือ ทองแดงและสังกะสี เนื่องจากมีการชะละลายออกมาปริมาณสูง ดังผลการวิเคราะห์ปริมาณ โลหะชะละลายในตารางที่ 4.4 โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 กรณีดังนี้คือ กรณีแรกเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเพียง 1 ชนิดคือ ทองแดงและสังกะสี กรณีที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อน 2 ชนิดคือ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี

4.5.1 อิทธิพลของการปนเปื้อนโลหะ 1 ชนิด

4.5.1.1 อิทธิพลของทองแดง

การศึกษาอิทธิพลของ โลหะทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยใช้สตัคซ์ขนาดเล็กลงกว่า 0.075 mm ปริมาณ 0.5 กรัม จากการเตรียมสารละลายสตัคซ์ (ในหัวข้อที่ 3.3) เพื่อทำการกำจัดสารละลายฟีนอล 100 mg/l ซึ่งผสมสารละลายทองแดงในระดับความเข้มข้นต่างกักันดังนี้คือ 0 0.5 1.0 3.0 5.0 10.0 และ 15 mg/l ปรับค่าพีเอช 6 เขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโลหะทองแดงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังรูปที่ 4.11

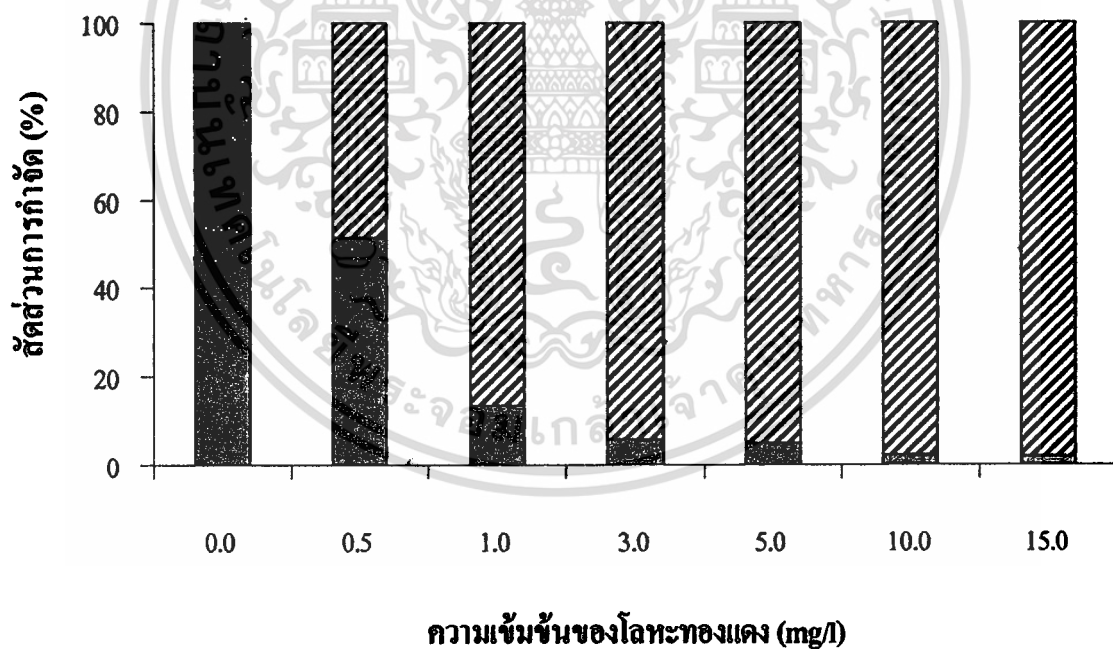


รูปที่ 4.11 อิทธิพลของ โลหะทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลของสตัคซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาอิทธิพลของโลหะทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ (รูปที่ 4.11) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะทองแดงในสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น ทำให้สลัดจ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสถานะที่ไม่มีการเติมทองแดง ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุดร้อยละ 77.13 รองลงมาเมื่อมีการเติมทองแดง ความเข้มข้นต่างๆคือ 0.5 1.0 3.0 5.0 10.0 และ 15.0 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเป็น ร้อยละ 47.27 8.79 4.97 3.29 1.81 และ 1.59 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะทองแดงมีผลในการขัดขวางประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายฟีนอลของสลัดจ์อย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากการเติมโลหะทองแดงเพียง 0.5-1.0 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงร้อยละ 38.71-88.60 ตามลำดับ

และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของประสิทธิภาพการใช้สลัดจ์กำจัดระหว่างสารละลายฟีนอลและโลหะทองแดงพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะทองแดง ทำให้สัดส่วนการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและโลหะทองแดงของสลัดจ์
เมื่อ (■) สารละลายฟีนอล และ (▨) โลหะทองแดง

จากการเปรียบเทียบสัดส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลและทองแดง (รูปที่ 4.12) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะทองแดงในสารละลายฟีนอล ทำให้สัดส่วนการกำจัดโลหะทองแดงเพิ่มขึ้น และสัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสัดส่วนการกำจัดโลหะทองแดงสูงที่สุดร้อยละ 98.27 เมื่อผสมโลหะทองแดงความเข้มข้นสูงที่สุด 15 mg/l และจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อลดความเข้มข้นของโลหะทองแดงเป็น 10.0 5.0 3.0 1.0 0.5 และ 0 mg/l มีสัดส่วนการกำจัดโลหะทองแดงร้อยละ 97.98 96.23 94.01 86.46 48.80 และ 0.00 ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายกับผลการศึกษาของ Aksu *et al.* [27] และ Aksu and Akpinar [40] โดยการทดลองของ Aksu *et al.* [27] ที่ใช้สตัคค์ดูดซับสารละลายผสมระหว่างฟีนอลกับโลหะนิกเกิลที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล โดยเฉพาะในกรณีของการใช้สารละลายฟีนอล 100 mg/l ผสมกับสารละลายนิกเกิล 0-500 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 24.7-12.6 ตามลำดับ และการศึกษาของ Aksu and Akpinar [40] ที่ใช้สตัคค์จากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ดูดซับสารละลายผสมระหว่างฟีนอลกับโลหะ โครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะ โครเมียม ซึ่งในกรณีของการใช้สารละลายฟีนอล 100 mg/l ผสมกับสารละลายโครเมียม 0-500 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 36.6-17.0 ตามลำดับ

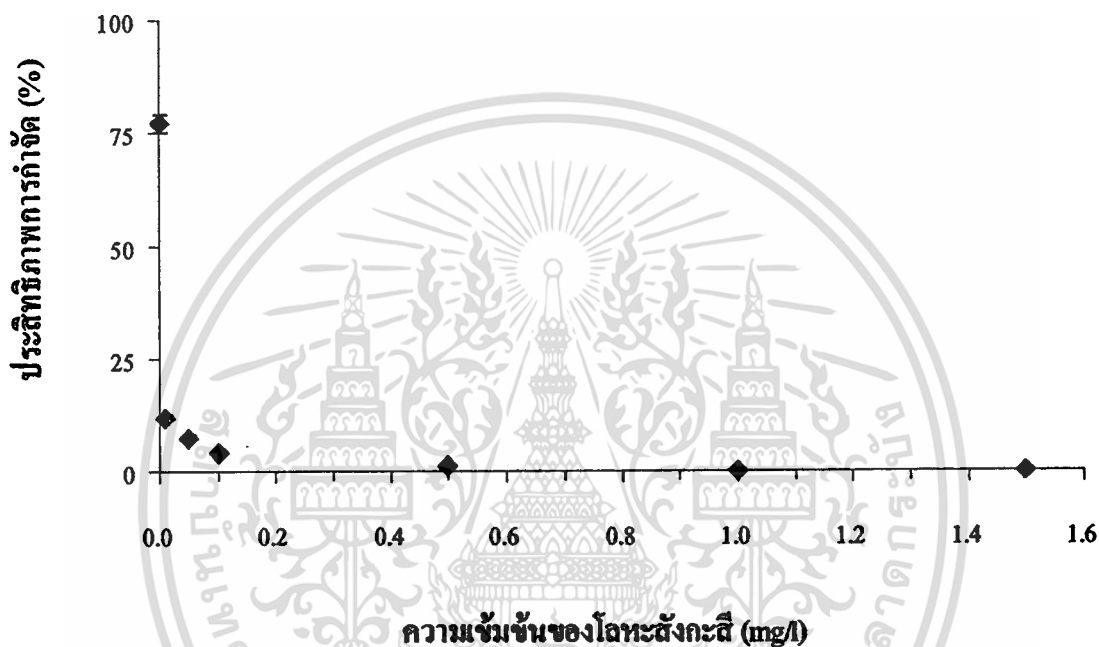
สาเหตุของการที่สตัคค์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะทองแดงเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของพื้นที่ผิวสตัคค์และสารเคมี โดยพื้นที่ผิวสตัคค์ บริเวณที่เกิดการดูดซับ (Binding sites) ทั้งในรูปของโครงสร้าง ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ และกลุ่มของฟังก์ชันบริเวณพื้นที่ผิวของสตัคค์ รวมถึงบริเวณผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มีกรด โพลีแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบสำคัญ ซึ่งกรด โพลีแซคคาไรด์จะมีหมู่พันธะอะมิโน คาร์บอกซิล ฟอสเฟต และซัลเฟต ที่สามารถเกิดพันธะกับโลหะจำพวก ทองแดง นิกเกิล และ โครเมียม ได้ดี [22] ซึ่งในขั้นตอนของปฏิกิริยาการใช้สตัคค์ดูดซับ โลหะหนัก เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ เพียงแค่ โมเลกุลทองแดงสัมผัสกับอนุภาคสตัคค์ก็จะเกิดการดูดซับทันที เนื่องจาก โมเลกุลทองแดงมีขนาดเล็กกว่า โมเลกุลฟีนอล และทองแดงมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง (Electronegativity) อีกทั้งอาจมีกลไกอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนปฏิกิริยารีดอกซ์ การตกตะกอน และการแลกเปลี่ยนไอออนบริเวณผิวของสตัคค์ เป็นต้น ปฏิกิริยาการดูดซับจึงใช้ระยะเวลาสั้นซึ่งตรงข้ามกับกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอล ที่ต้องใช้ระยะเวลาสัมผัสนานในการส่งผ่านเซลล์เข้าสู่กระบวนการเมตาบอลิซึมเพื่อกำจัด อีกทั้งอาจเป็นอิทธิพลของตัวถูกดูดซับเช่น น้ำหนัก ขนาดและโครงสร้าง โมเลกุลกล่าวคือ ทองแดงมีขนาด โมเลกุลเล็กกว่าฟีนอล จึงเข้าดูดซับภายในรูพรุน หรือผิวขรุขระของสตัคค์ได้ดีกว่า โมเลกุลของฟีนอล ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเมื่อความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1.2 อิทธิพลของสังกะสี

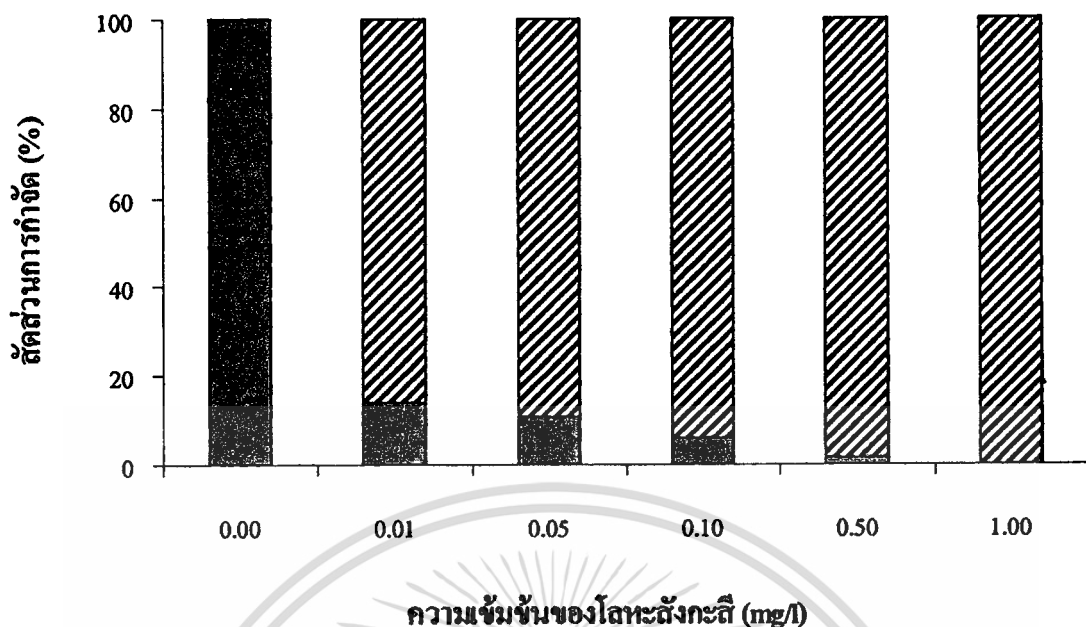
การศึกษาอิทธิพลของโลหะสังกะสีต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยใช้สัลดิจ์ ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm ปริมาณ 0.5 กรัม จากการเตรียมสารละลายสัลดิจ์ (ในหัวข้อที่ 3.3) เพื่อกำจัดสารละลายฟีนอล 100 mg/l ที่ผสมกับสารละลายสังกะสีความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 0 0.01 0.05 0.10 0.50 1.00 และ 1.50 mg/l ปริมาตร 6 เขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า โลหะสังกะสีมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของ โลหะสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลของสัลดิจ์

จากการศึกษาอิทธิพลของโลหะสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.13) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะสังกะสี ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสภาวะที่ไม่มีกรเติมสังกะสี ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุดร้อยละ 77.13 (± 0.19) รองลงมาเมื่อมีการเติมสังกะสีความเข้มข้นต่างๆคือ 0.01 0.05 0.10 0.50 1.0 และ 1.5 mg/l ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเป็นร้อยละ 12.03 7.51 4.07 1.24 0.12 และ 0.06 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองโลหะสังกะสีมีผลขัดขวางการใช้สัลดิจ์กำจัดสารละลายฟีนอลอย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากการเติมโลหะสังกะสีเพียง 0.01 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงร้อยละ 84.40 ตามลำดับ

และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของประสิทธิภาพการกำจัด ระหว่างสารละลายฟีนอลกับโลหะสังกะสีพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะสังกะสี ทำให้สัดส่วนการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนของการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14

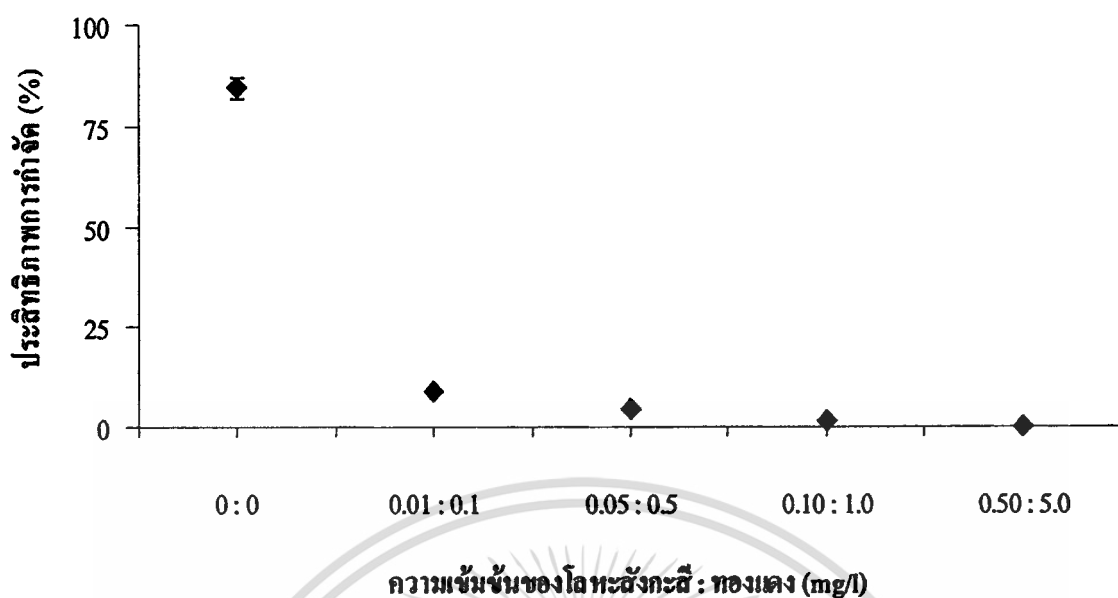


รูปที่ 4.14 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและ โลหะสังกะสีของสลัดจ์
เมื่อ (■) สารละลายฟีนอล และ (▨) โลหะสังกะสี

จากการเปรียบเทียบสัดส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลและสังกะสี (รูปที่ 4.14) พบว่าสัดส่วนการกำจัดโลหะสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะสังกะสี โดยสัดส่วนการกำจัดโลหะสังกะสีสูงที่สุดร้อยละ 99.86 เมื่อผสมโลหะสังกะสีความเข้มข้นสูงที่สุด 1.00 mg/l และสัดส่วนจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อลดความเข้มข้นของโลหะสังกะสีลงเป็น 0.50 0.10 0.05 0.01 และ 0 mg/l มีสัดส่วนการกำจัดโลหะสังกะสีร้อยละ 98.44 93.93 89.35 85.95 และ 0.00 ตามลำดับ สาเหตุที่สัดส่วนการกำจัดโลหะสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะสังกะสี อาจเนื่องจากการเติมโลหะสังกะสีเป็นการรบกวนปฏิกิริยาการกำจัดฟีนอลของระบบ อีกทั้งการดูดซับโลหะของสลัดจ์เกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วกว่าการดูดซับฟีนอล ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้ออิทธิพลของทองแดง

4.5.2 อิทธิพลของการปนเปื้อนโลหะผสม

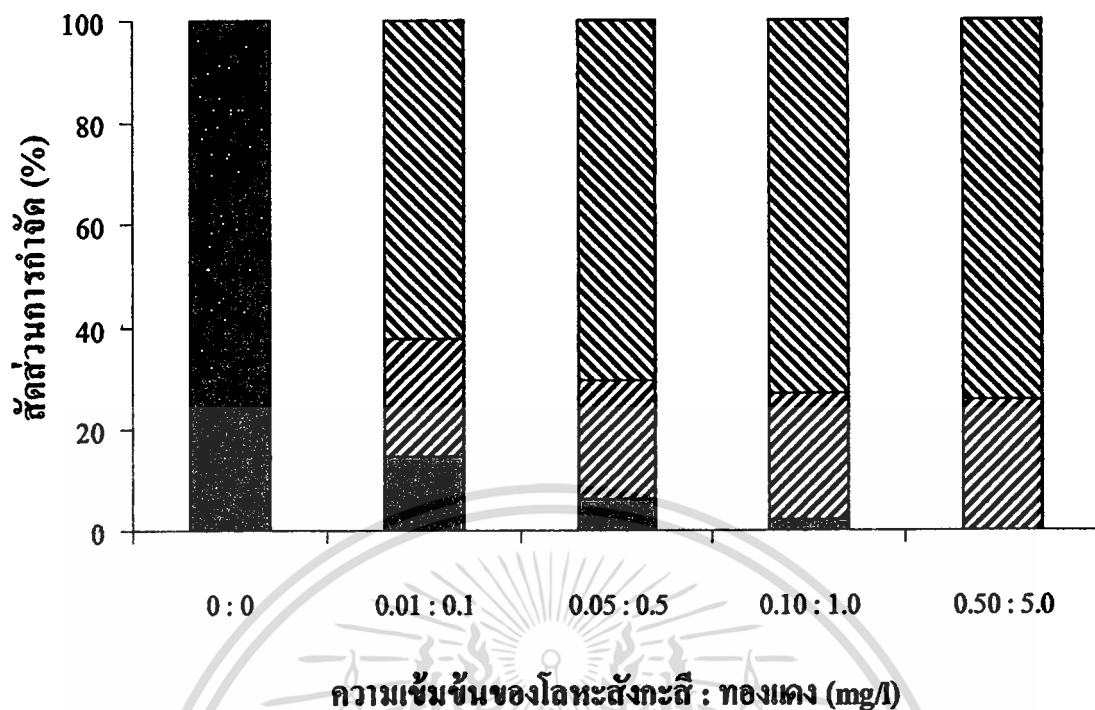
เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของโลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยใช้สลัดจ์ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm ปริมาณ 0.5 กรัม จากการเตรียมสารละลายสลัดจ์ (ในหัวข้อที่ 3.3) กำจัดสารละลายสารละลายฟีนอล 100 mg/l ที่ผสมสารละลายผสมสังกะสีและทองแดงความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 0:0 0.01:0.1 0.05:0.5 0.10:1.0 และ 0.5:5.0 mg/l (กำหนดสัดส่วนสังกะสี:ทองแดง ดังตารางที่ 4.4 การชะละลายโลหะที่พีเอช 6) ปรับพีเอช 6 เขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อ นาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมสังกะสีและทองแดงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของ โลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล

จากการศึกษาอิทธิพลของ โลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.15) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะผสมสังกะสีและทองแดง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสถานะที่ไม่มี การเติม โลหะผสม ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุดร้อยละ 84.53 แต่เมื่อมีการเติม โลหะสังกะสี:ทองแดง ที่ความเข้มข้น 0.01:0.1 0.05:0.5 0.10:1.0 และ 0.50:5.0 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 9.01 4.66 1.71 และ 0.11 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่าการปนเปื้อน โลหะผสมสังกะสีกับทองแดงในระบบมีผลขัดขวางการใช้สัจจกำจัดสารละลายฟีนอลอย่างชัดเจน ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะผสม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลลดลงเด่นชัด ดังจะเห็นได้จากการเติม โลหะผสมสังกะสีกับทองแดงเพียง 0.01:0.1 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงร้อยละ 89.34

และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างสารละลายฟีนอลกับโลหะผสมสังกะสีและทองแดงพบว่า สัดส่วนการกำจัดสังกะสีและทองแดงเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะผสม แต่สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลและ โลหะผสมสังกะสีและทองแดงของสลิคซ์ เมื่อ (■) สารละลายฟีนอล (▨) โลหะสังกะสี และ (▩) โลหะทองแดง

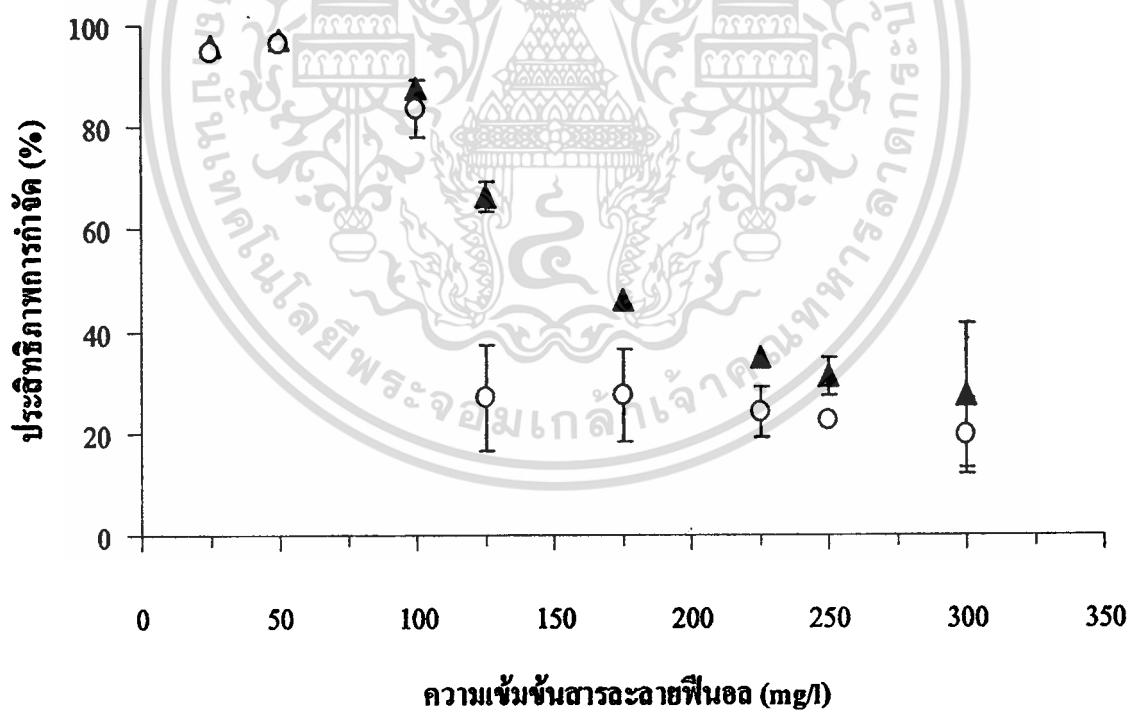
จากการศึกษาสัดส่วนการใช้สลิคซ์กำจัดสารละลายฟีนอลกับ โลหะผสมสังกะสีและทองแดง (รูปที่ 4.16) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะผสม ทำให้สัดส่วนการกำจัดโลหะผสมสังกะสีและทองแดงเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสลิคซ์สามารถกำจัดโลหะทองแดงสูงสุด รองลงมาคือสังกะสีและฟีนอลตามลำดับ เมื่อเติม โลหะผสมสังกะสีและทองแดงที่ความเข้มข้น 0.01:0.1 0.05:0.5 0.10:1.0 และ 0.50:5.0 mg/l ทำให้สัดส่วนการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นร้อยละ 62.04 70.41 73.22 และ 74.12 ตามลำดับ และทำให้สัดส่วนการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้นร้อยละ 23.57 23.27 24.72 และ 25.79 ตามลำดับ จากผลการทดลองครั้งนี้ที่สลิคซ์สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าสังกะสี มีลักษณะคล้ายกับการทดลองของ Hammaini *et al.* [41] ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของทองแดง แคลเมียม และนิกเกิลต่อการดูดซับตะกั่ว ของสลิคซ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของทองแดงและสังกะสีต่อการดูดซับตะกั่วพบว่าทองแดงมีผลขัดขวางกระบวนการดูดซับตะกั่วมากกว่าสังกะสี โดยทองแดงและสังกะสีที่ความเข้มข้นเดียวกัน ทำให้การดูดซับตะกั่วลดลงร้อยละ 19.04 และ 4.16 ตามลำดับ

สาเหตุของประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะผสม เนื่องจากการเติม โลหะผสมสังกะสีและทองแดงเป็นการรบกวนปฏิกิริยาของกระบวนการกำจัดฟีนอลในระบบ อีกทั้งการดูดซับ โลหะของสลิคซ์เกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วกว่าการดูดซับ

ฟีนอล จึงอาจทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสัลดจ์ไม่เพียงพอต่อการดูดซับฟีนอล ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้ออิทธิพลของทองแดง และในกรณีของการที่สัลดจ์มีส่วนการกำจัดทองแดงมากกว่าสังกะสี เนื่องจากขนาด โมเลกุลของทองแดงเล็กกว่าสังกะสี และทองแดงมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) มากกว่าสังกะสี ทำให้โมเลกุลทองแดงแทรกเข้าไปบริเวณผิวของสัลดจ์ได้มากกว่า และเร็วกว่า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทองแดงมากกว่าสังกะสี

4.6 สัลดจ์ของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัลดจ์

การศึกษาสัลดจ์ของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอล ซึ่งได้เตรียมสารละลายสัลดจ์ 2 แบบคือ สัลดจ์แบบที่เซลล์ยังมีชีวิต (Active cells) และสัลดจ์แบบที่เซลล์ตายแล้ว (Inactive cells) โดยสารละลายสัลดจ์ที่เซลล์ยังมีชีวิต ได้ผ่านขั้นตอนการเตรียม (ในหัวข้อที่ 3.3) สำหรับสารละลายสัลดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว ได้เตรียมโดยนำสารละลายสัลดจ์ไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 Psi ระยะเวลา 20 นาที เป็นเวลา 3 วัน [31] แล้วจึงนำไปกำจัดสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 25-300 mg/l สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สัลดจ์ของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัลดจ์ระหว่าง

(▲) สัลดจ์ที่เซลล์ยังมีชีวิต และ (○) สัลดจ์ที่เซลล์ตายแล้ว

จากการศึกษาสัดส่วนของกลไกการกำจัดสารละลายฟีนอลระหว่างสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตและสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้ว (รูปที่ 4.17) เมื่อพิจารณาถึงข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลของสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิต (Active cells) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล อาจเนื่องมาจากฤทธิ์กักร้อนและฆ่าเชื้อของฟีนอลที่ขัดขวางการทำงานของกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ โดย Verschuieren [1] รายงานว่าสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 64 mg/l สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดได้เมื่อได้รับระยะเวลาสัมผัสเพียง 16 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดของสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้ว (Inactive cells) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเช่นกัน อาจเนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของโมเลกุลฟีนอลในสารละลาย ทำให้โมเลกุลฟีนอลเข้าแย่งจับกับสแตจจ์ที่มีพื้นที่ผิวจำกัด เกิดการชนกัน จนไม่สามารถเข้าไปภายในผิวที่ขรุขระของสแตจจ์ได้ โดยที่ฟีนอลความเข้มข้น 25 50 100 125 175 225 250 และ 300 mg/l สแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตมีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงร้อยละ 95.82 97.16 87.40 66.42 46.05 34.80 31.24 และ 27.44 ตามลำดับ สำหรับสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้วมีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงร้อยละ 94.71 96.31 83.51 26.98 27.36 23.90 22.52 และ 19.59 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดสารละลายฟีนอลของสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตและสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้วพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตมากกว่าสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้วในทุกความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล โดยในช่วงความเข้มข้นต่ำ 10-50 mg/l สแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตและสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้วมีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบทางสถิติวิเคราะห์หาความแปรปรวนด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำ สแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้วสามารถกำจัด โมเลกุลของฟีนอลได้หมดทั้งคู่ จึงไม่สามารถแยกความแตกต่างของกลไกการกำจัดได้ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น 50-125 mg/l ประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้วมีแนวโน้มแตกต่างกัน โดยการกำจัดสารละลายฟีนอลของเซลล์ที่มีชีวิตมากกว่าเซลล์ที่ตายแล้วร้อยละ 0.89-59.38 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับทางชีวภาพมีประสิทธิภาพเด่นกว่ากลไกการดูดซับทางกายภาพอย่างมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ทั้งนี้สแตจจ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 44.52 ตารางเมตรต่อกรัม (ตารางที่ 4.2) แสดงว่าบริเวณพื้นที่ผิวของสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้ว ได้ดูดซับ โมเลกุลฟีนอลจนกระทั่งพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เพียงพอ อีกทั้งเมื่อ โมเลกุลของฟีนอลหนาแน่นขึ้น อาจเข้าแย่งจับกับสแตจจ์ที่มีพื้นที่ผิวจำกัด เกิดการชนกัน และไม่สามารถเข้าไปภายในผิวที่ขรุขระของสแตจจ์ได้ ประสิทธิภาพการกำจัดของสแตจจ์ที่เซลล์ตายแล้วจึงต่ำกว่าสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิต แต่สำหรับสแตจจ์ที่เซลล์มีชีวิต ที่นอกจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพแล้ว ยังรวมกระบวนการดูดซับทางชีวภาพเข้าไปด้วย เมื่อโมเลกุลของฟีนอลถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับอยู่บริเวณผิวแล้ว โมเลกุลฟีนอลจะถูกนำเข้าสู่ภายในเซลล์ โดยผ่านกระบวนการแพร่และ แอกลีฟทรานสปอร์ต จนกระทั่งถูกกระบวนการเมทาบอลิซึมกำจัด โมเลกุลของฟีนอลไป และใน กรณีสที่เพิ่มความเข้มข้นในช่วง 125-300 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของสแตคค์ที่เซลล์มีชีวิต น้อยลงจนกระทั่งใกล้เคียงกับสแตคค์ที่เซลล์ตายแล้ว เนื่องจากสแตคค์ที่เซลล์มีชีวิต ได้รับอิทธิพลจาก สมบัติของฟีนอลที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในสแตคค์ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจนกระทั่ง ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดของสแตคค์ที่เซลล์ตายแล้ว ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะถูก โมเลกุลฟีนอล ดูดซับอยู่เต็มพื้นที่ ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้คล้ายกับผลการทดลองของ Tsezos and Bell [24] ที่ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอลระหว่างสแตคค์ที่เซลล์มีชีวิตและเซลล์ ตายแล้ว พบว่าภายใต้สภาวะเดียวกัน สแตคค์ที่เซลล์มีชีวิตและเซลล์ตายแล้วมีความสามารถในการ กำจัด 650 และ 180 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ กล่าวคือเซลล์ที่ตายแล้วมีประสิทธิภาพในการกำจัดเพียงร้อยละ 28 ของเซลล์ที่มีชีวิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และความสามารถของสลักจจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนในการกำจัดสารละลายฟีนอล โดยทำการศึกษาลักษณะและสมบัติของสลักจ สภาวะที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายฟีนอล การคายซับ จลนพลศาสตร์การกำจัดอิทธิพลของโลหะชะละลายต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างสลักจที่เซลล์มีชีวิตและสลักจที่เซลล์ตายแล้ว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

การศึกษาสมบัติและลักษณะของสลักจพบว่า สลักจที่ผ่านกระบวนการเตรียมมีค่าความชื้น 11.26% ค่าพีเอช 6.83 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 44.52 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 25.60 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อกรัม และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 38.18 มิลลิอีควิวาเลนต์ต่อ 100 กรัม รวมถึงสลักจมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิการ้อยละ 35.80 ออกไซด์ของเหล็กร้อยละ 13.00 ออกไซด์ของอะลูมิเนียมร้อยละ 12.40 อีกทั้งโลหะชะละลายของสลักจคือ ทองแดง สังกะสี โครเมียม และนิกเกิล มีค่า 278.8 60 16.5 และ 56 mg/l ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าสลักจที่นำมาวิจัยยังคงมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด แบคทีเรีย และรา ในปริมาณ 2.8×10^7 1.0×10^6 และ 3.3×10^5 CFU/ml

การศึกษาสภาวะที่มีอิทธิพลต่อการใช้สลักจกำจัดสารละลายฟีนอลได้แก่ ขนาดอนุภาคของสลักจ ความเร็วรอบสัมผัส ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลและปริมาณสลักจพบว่า การเพิ่มขนาดของอนุภาคสลักจทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลง โดยสลักจขนาดเล็กกว่า 0.075 mm มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลที่สูงที่สุดคือ 16.82 (± 0.11) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 94.34 และเมื่อความเร็วรอบสัมผัสเพิ่มขึ้น 0-125 รอบต่อนาที ทำให้ความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเขย่าให้สูงกว่า 125 รอบต่อนาที ทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลง โดยความสามารถในการกำจัดสูงสุดที่ความเร็วรอบสัมผัส 125 รอบต่อนาที มีความสามารถในการกำจัดสูงสุด 17.33 (± 0.41) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 95.10 อีกทั้งเมื่อค่าพีเอชของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงเกินกว่า 6 ทำให้ความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง โดยที่พีเอช 6 มีความสามารถในการกำจัดสูงสุด 17.45 (± 0.11) mg/g หรือคิดเป็นร้อยละ 93.17 ทั้งนี้เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสขึ้นจนกระทั่ง 24 ชั่วโมง ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และภายหลัง 24 ชั่วโมง ความสามารถในการกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายฟีนอลมีแนวโน้มคงที่ โดยจุดสมดุลของปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการกำจัดสูงที่สุด $15.34 (\pm 0.89) \text{ mg/g}$ หรือคิดเป็นร้อยละ 85.00 รวมถึงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล 10-125 mg/l ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลให้มากกว่า 125 mg/l ทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลง และในทุกความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล เมื่อปริมาณสลักซ์เพิ่มขึ้นทำให้ ความสามารถในการกำจัดลดลง ทั้งนี้การใช้สลักซ์ปริมาณ 0.05 กรัม กำจัดสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 125 mg/l สลักซ์มีความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลสูงที่สุด $97.37 (\pm 3.05) \text{ mg/g}$ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดพบว่า สลักซ์มีประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลสูงที่สุดร้อยละ 99.39 ที่สารละลายฟีนอล 50 mg/l ใช้สลักซ์ 0.05 กรัม อีกทั้งพบว่าสามารถอธิบายสมดุลได้ด้วยไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ได้สมการเส้นตรง $\log q = (-1.0957) \log C_e - 2.7056$ ($R^2=0.9772$) และสามารถคำนวณค่าคงที่แสดงความสามารถของการดูดซับ (K_d) ได้เท่ากับ 0.4323 และค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลาย ($\frac{1}{n}$) เท่ากับ 1.0957 ในกรณีที่ศึกษาการคายซับพบว่า สลักซ์ที่ผ่านการกำจัดสารละลายฟีนอลแล้วมีการคายซับของฟีนอลต่ำกว่าร้อยละ 9 ในทุกระยะเวลาสัมผัส และมีอัตราการปฏิกิริยากำจัดเป็นอันดับหนึ่ง มีค่าคงที่ของอัตราการปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1059 ต่อชั่วโมง

การศึกษาอิทธิพลของ โลหะชะละลายของสลักซ์ต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะคือ อิทธิพลของโลหะชนิดเดียว และโลหะผสมสองชนิด โดยการศึกษาอิทธิพลของโลหะชนิดเดียวคือ ทองแดงและสังกะสีพบว่า เมื่อเติมโลหะทองแดงปริมาณ 0.5-15 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 47.27-1.59 ตามลำดับ หรือเพิ่มปริมาณ โลหะสังกะสี 0.01-1.5 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 12.03-0.06 ตามลำดับ การศึกษาอิทธิพลของโลหะผสมสองชนิดคือ ทองแดงผสมสังกะสีพบว่า เมื่อเติมโลหะผสมสังกะสีต่อทองแดงที่ความเข้มข้น 0.01:0.1-0.50:5.0 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลลดลงเหลือร้อยละ 9.01-0.11 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลระหว่างสลักซ์ที่เซลล์มีชีวิตและสลักซ์ที่เซลล์ตายแล้วพบว่า สลักซ์ที่เซลล์มีชีวิตมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายฟีนอลมากกว่าสลักซ์ที่เซลล์ตายแล้ว โดยเฉพาะที่สารละลายฟีนอลความเข้มข้น 125 mg/l ประสิทธิภาพการกำจัดของเซลล์ที่มีชีวิตมากกว่าเซลล์ที่ตายแล้วร้อยละ 59.38

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเปรียบเทียบแหล่งที่มาของสถิติต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอล
2. ศึกษาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการใช้สถิติกำจัดสารละลายฟีนอลเช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือในสารละลาย และความเข้มข้นของตัวถูกละลายอื่นๆ เป็นต้น
3. ศึกษาการใช้สถิติในการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆเช่น สีขุ่น และสารฆ่าแมลง
4. ศึกษาการใช้สถิติที่เซลล์จุลินทรีย์มีชีวิตกำจัดสารละลายฟีนอลที่ระยะเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง
5. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารละลายฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรม
6. ศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์สถิติที่ผ่านการกำจัดสารละลายฟีนอลแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Verschueren K. **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. 3rd Edition. USA : Van Nostrand Reinhold. 1996
- [2] Metcalf and Eddy. **Wastewater Engineering : Treatment and Reuse**. 4th Edition. Singapore : Mc Graw Hill. 2003
- [3] ศูนย์จัดการคุณภาพน้ำ 3 (หนองแขม) กองจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร. **โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม : เอกสารเผยแพร่**
- [4] Aksu Z. "Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge : equilibrium and kinetic modeling." *Biochemical Engineering Journal*. vol. 7, 2001. pp. 79-84
- [5] Gulnaz O., Kaya A., Matyar F. and Arikian B. "Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge." *Journal of Hazardous Materials*. vol. B108, 2004. pp. 183-188
- [6] Aksu Z. and Yener J. "A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents." *Waste Management*. vol.21, 2001. pp. 695-702
- [7] Kim D.W., Cha D.K., Wang J. and Huang C.P. "Heavy metals removal by activated sludge: influence of *Nocardia amarae*." *Chemosphere*. vol. 46, 2002. pp. 137-142
- [8] Hammaini A., Gonzalez F., Ballester A., Blazquez M.L. and Munoz J.A. "Simultaneous uptake of metals by activated sludge." *Minerals engineering*. vol. 16, 2003. pp. 723-729
- [9] กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์-เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. **พินอล**. กรุงเทพฯ : ศรีเมืองการพิมพ์. 2542.
- [10] Aksu Z. "Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review" *Process Biochemistry*. 2004.
- [11] Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M. and Imboden D.M. **Environmental Organic Chemistry**. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [12] Boyd S.A., Shelton R.D., Berry D. and Tiedje M.J. "Anaerobic Biodegradation of Phenolic Compounds in Digested Sludge" *Applied and Environmental Microbiology*. vol. 46, 1983. pp. 50-54

- [13] Banerjee S., Howard H.P., Rosenberg M.A., Dombrowski E.A., Sikka H. and Tullis L.D. "Development of a General Kinetic Model for Biodegradation and Its Application to Chlorophenols and Related Compounds." *Environmental Science and Technology*. vol. 18, 1984. pp. 416-422
- [14] นางลัดขันธ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. *จุลชีววิทยาทั่วไป*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544
- [15] กาญจนทิพย์ วัฒนธเนศ และ นวลจิรา วโรตตมะ. "การดูดซับฟีนอลของเมดคาร์บอนที่พื้นสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโคเคตซัลเฟต." *โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2544
- [16] นัจริยา ศรีน้อย นิสา นนทร์รักษากุล และพรหมธิดา สดใส. "การดูดซับฟีนอลของเมดคาร์บอนที่พื้นสภาพด้วยความร้อน." *โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2544
- [17] Girovich M.J. *Biosolids Treatment and Management : Processes for Beneficial Use*. USA : Marcel Dekker. 1996
- [18] เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์. *วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 5*. นนทบุรี : เอส อาร์ พรินติ้งแมสโปรดักส์. 2547
- [19] มั่นสิน ตัมจุทเวศม์. *วิศวกรรมการประปา เล่ม 2*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
- [20] อุดสารัตน์ ภักดีสุตข. *การดูดซับ : เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม 1*.
- [21] Aksu Z. and Yener J. "Investigation of the biosorption of phenol and monochlorinated phenols on the dried activated sludge." *Process Biochemistry*. vol. 33, no. 6, 1998. pp: 649-655
- [22] Aksu Z., Kutsal T., Gun S., Haciosmanoglu N. and Gholaminejad M. "Investigation of Biosorption of Copper(II), Nickel(II) and Chromium(VI) Ions to Activated Sludge Bacteria." *Environmental Technology*. vol. 12, 1991. pp. 915-921
- [23] Volesky B. and Holan Z.R. "Biosorption of Heavy Metals." *Biotechnology Progress*. vol. 11, 1995. pp. 235-250
- [24] Tsezos M. and Bell J.P. "Comparison of the Biosorption and Desorption of Hazardous Organic Pollutants by Live and Dead Biomass." *Water Research*. vol. 23, no. 5, 1989. pp. 561-568.

- [25] Faust S.D. and Aly O.M. **Adsorption Processes for Water Treatment.** USA : Butterworths. 1987
- [26] Mihelcic J.R. **Fundamentals of Environmental Engineering.** USA : John Wiley & Sons. 1999
- [27] Aksu Z., Akpinar D., Kabasakal E. and Kose B. "Simultaneous biosorption of phenol and nikle(II) from binary mixtures onto dried aerobic activated sludge." **Process Biochemistry.** vol. 35, 1999. pp. 301-308
- [28] Jianlong W., Yi Q., Horan N. and Stentiford E. "Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass." **Bioresource Technology.** vol. 75, 2000. pp. 157-161
- [29] Brandt S., Zeng AP. And Deckwer WD. " Adsorption and Desorption of Pentachlorophenol on cell of *Mycobacterium chlorophenolicum* PCP-1." **Biotechnology and Bioengineering.** vol. 55, no. 3, 1997. pp. 480-489
- [30] Rao J.R. and Viraraghavan T. "Biosorption of phenol from an aqueous solution by *Aspergillus niger* biomass." **Bioresource Technology.** vol. 85, 2002. pp. 165-171
- [31] APHA. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater.** 19th Edition. USA : American Public Health Association. 1995
- [32] Hul H.J. and Lyklema J. "Determination of specific surface areas of dispersed materials : comparison of the negative adsorption method with some other method." **Journal of the American Chemical Society.** vol. 90, no. 12, 1968. pp. 3010-3015
- [33] กองวิเคราะห์ดิน. คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดิน. 2535
- [34] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติ-
โรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว
- [35] Environmental Protection Agency (EPA). **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP): Method 1311.** USA. 1992.
- [36] Smith P.G. and Coackley P. "A Method for determining specific surface area of activated sludge by dye adsorption." **Water Research.** vol. 17, no.5, 1983. pp. 595-598
- [37] Rockcarb. **Power Activated Carbon.** [online]. Available:
<http://www.rockcarb.com/html/specification.htm>. 2005
- [38] Calace N., Nardi E., Petronio B.M. and Pietroletti M. "Adsorption of Phenols by Papermill Sludge." **Environmental Pollution.** vol. 118, 2002. pp. 315-319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] Calace N., Nardi E., Petronio B.M., Pietroletti M. and Tosti G. "Metal ion removal from wate by sorption on paper mill sludge." **Chemosphere**. vol. 51, 2003. pp. 797-803
- [40] Z.Aksu and D.Akpınar. "Competitive Biosorption of Phenol and Chromium (VI) from Binary Mixtures onto Dried Anaerobic Activated Sludge." **Biochemical Engineering Journal**. vol. 7, 2001. pp. 183-193
- [41] Hammami A., Ballester A., Blazquez M.L., Gonzalez F. and Munoz J. "Effect of the presence of Lead on the Biosorption of Copper, Cadmium and Zinc by Activated Sludge." **Hydrometallurgy**. vol. 67, 2002. pp. 109-116



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองด้านลักษณะและสมบัติของสัลดจ์

ตารางที่ ก.1 สมบัติด้านความชื้นของสัลดจ์

ตัวอย่างสัลดจ์	น้ำหนักก่อนอบ (mg)	น้ำหนักหลังอบ (mg)	ความชื้น (%)
1	1.9099	1.7009	10.94
2	2.0160	1.7819	11.31
3	1.9801	1.7518	11.53

ตารางที่ ก.2 สมบัติด้านค่าพีเอชของสัลดจ์

ตัวอย่างสัลดจ์	ค่าพีเอช
1	6.83
2	6.50
3	7.10

ตารางที่ ก.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของสัลดจ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น เมทิลีนบลู (mg/l)	ปริมาณสัลดจ์ (g)			Ce (mg/l)			q (mol/g)
	1	2	3	1	2	3	
100	0.5065	0.5007	0.5048	1.1735	1.1378	1.0969	5.23×10^{-5}
200	0.5037	0.4999	0.5003	7.4592	7.1020	6.9898	1.03×10^{-4}
400	0.5029	0.5081	0.5079	65.5102	68.2653	66.2245	1.76×10^{-4}
1,000	0.5017	0.5019	0.5026	693.8776	734.6939	704.0816	1.54×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในสลัดจ์

ตัวอย่าง	Total Carbon	Inorganic Carbon	Total Organic Carbon / g. sludge
1 ของแข็ง	14.09	0.84	13.25
2 ของแข็ง	14.09	0.86	13.23
3 ของแข็ง	14.09	0.82	13.27
1 ของเหลว	14.38	1.9826	12.40
2 ของเหลว	14.38	1.9816	12.40
3 ของเหลว	14.38	1.9838	12.40

ตารางที่ ก.5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสลัดจ์

ตัวอย่าง	ปริมาณสลัดจ์ (g)	ปริมาตรกรด HCl 0.1002 N (ml)	ค่า CEC (meq/100g)
1	10.0628	38.90	38.63
2	10.0124	37.80	37.73
3	10.0250	38.30	38.18

ตารางที่ ก.6 ปริมาณโลหะทั้งหมดและโลหะชะละลายในสลัดจ์

วิธี	ตัวอย่าง	ทองแดง	สังกะสี	โครเมียม	นิกเกิล
ปริมาณ โลหะทั้งหมด (mg/kg)	1	3,470	1,691	782	281
	2	5,664	1,764	2,428	320
	3	5,954	1,784	2,524	327
ปริมาณ โลหะชะละลาย ด้วยกรดกำมะถัน (mg/l)	1	26.300	9.995	0.092	3.493
	2	27.500	9.999	0.107	3.494
	3	26.980	10.010	0.104	3.468
ปริมาณ โลหะชะละลาย ด้วยกรดอะซิติก (mg/l)	1	4.782	0.313	0.068	0.158
	2	5.010	0.302	0.072	0.170
	3	5.034	0.302	0.062	0.130
ปริมาณ โลหะชะละลาย ด้วยน้ำกลั่น (mg/l)	1	1.381	0.300	0.067	0.305
	2	1.450	0.301	0.086	0.330
	3	1.351	0.295	0.094	0.204
ปริมาณ โลหะชะละลาย ด้วยกรดกำมะถัน ที่พีเอช 6 (mg/l)	1	0.267	0.037	na	na
	2	0.295	0.035	na	na
	3	0.322	0.036	na	na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่สามารถให้ไปประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองของการใช้สลัดจ์กำจัดสารละลายฟีนอล

ตารางที่ ข.1 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ขนาดต่างๆ

ขนาดสลัดจ์ (mm.)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
เล็กกว่า 0.075	89.1389	5.5081	5.1978	4.4220
0.075-0.150	89.1389	15.7486	10.7836	10.6284
0.150-0.212	89.1389	15.7486	16.9899	16.0590
0.212-0.500	89.1389	17.1451	18.2312	14.0419
0.500-1.700	89.1389	33.4368	32.5058	26.1443
ไม่ได้กักขนาด	89.1389	26.6098	28.0062	28.4717

ตารางที่ ข.2 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลัดจ์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ความเร็วรอบสัมพัทธ์ (rpm)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
0	91.1303	79.5133	80.7692	81.0832
100	91.1303	11.2637	8.4380	9.7724
125	91.1303	5.8477	5.4553	2.0801
150	91.1303	5.7692	14.2465	17.4647
200	91.1303	25.7064	23.6656	28.6107
250	91.1303	28.0612	27.0408	22.7237
300	91.1303	23.7441	31.2009	30.2590

ตารางที่ ข.3 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัณ้ค้จ้ที่ค่าพีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช (pH)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
2	93.6558	92.3077	91.8319	92.6249
4	93.6558	71.5305	73.1166	64.8692
6	93.6558	5.8684	6.3442	6.9786
8	93.6558	7.9302	7.6130	7.7716
10	93.6558	54.0841	46.1538	45.9952
12	93.6558	76.2887	88.6598	87.3910

ตารางที่ ข.4 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัณ้ค้จ้ที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
1	90.2560	80.9249	80.2642	80.5945
2	90.2560	80.9249	81.0900	81.0074
4	90.2560	73.4930	74.3187	73.9059
6	90.2560	36.0033	37.6548	36.8291
24	90.2560	16.6804	10.4046	13.5425
48	90.2560	14.6986	14.5334	14.6160

ตารางที่ ข.5 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัณ้ค้จ้ปริมาณต่างๆ

ความเข้มข้นฟีนอล (mg/l)	ปริมาณสัณ้ค้จ้ (กรัม)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
			1	2	3
10	0.05	4.1789	0.2737	0.2506	0.2197
10	0.10	4.1789	0.2968	0.2352	0.2583
10	0.25	4.1789	0.8520	0.8597	0.8365
10	0.50	4.1789	1.0216	1.0216	0.9214
10	0.75	4.1789	1.0370	1.0447	1.0216
10	1.00	4.1789	1.0910	1.0910	1.0756

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสัลดิจ์ปริมาณต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นฟีนอล (mg/l)	ปริมาณสัลดิจ์ (กรัม)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
			1	2	3
25	0.05	21.0890	0.2722	0.2722	0.2646
25	0.10	21.0890	0.3949	0.3796	0.3643
25	0.25	21.0890	1.0928	1.0928	1.0468
25	0.50	21.0890	1.1311	0.7784	0.8474
25	0.75	21.0890	1.1695	1.0698	1.1848
25	1.00	21.0890	1.0928	1.0775	1.0775
50	0.05	43.6863	0.2549	0.2549	0.2941
50	0.10	43.6863	0.4510	0.1765	0.3725
50	0.25	43.6863	0.8824	0.8824	0.8824
50	0.50	43.6863	1.4706	1.0784	1.3137
50	0.75	43.6863	1.1373	1.4510	1.2941
50	1.00	43.6863	1.4510	1.5294	1.6863
100	0.05	87.5940	42.3308	40.8271	39.7744
100	0.10	87.5940	31.3534	27.2932	28.7970
100	0.25	87.5940	2.8195	2.8947	3.3459
100	0.50	87.5940	14.0226	12.7444	12.7444
100	0.75	87.5940	11.2030	15.4135	8.4962
100	1.00	87.5940	27.1429	20.2256	31.3534
125	0.05	109.4222	59.8565	59.8565	62.5000
125	0.10	109.4222	50.0378	46.8278	47.0166
125	0.25	109.4222	2.8323	10.9517	14.5393
125	0.50	109.4222	47.2054	26.8127	2.2659
125	0.75	109.4222	65.7100	3.4988	67.4094
125	1.00	109.4222	57.0242	60.0453	69.8640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ความสามารถในการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลิคซ์ปริมาณต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นฟีนอล (mg/l)	ปริมาณสลิคซ์ (กรัม)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
			1	2	3
150	0.05	126.4071	90.7407	90.1481	88.6667
150	0.10	126.4071	71.7212	71.7212	75.1777
150	0.25	126.4071	19.6277	7.7770	28.0219
150	0.50	126.4071	70.2399	69.0054	38.3912
150	0.75	126.4071	44.0697	63.3270	53.4514
150	1.00	126.4071	31.9721	69.0054	61.3519
250	0.05	217.1198	190.8523	194.1587	193.7913
250	0.10	217.1198	173.5856	171.7487	179.4636
250	0.25	217.1198	125.8266	115.5400	112.6010
250	0.50	217.1198	161.8295	175.7899	195.6282
250	0.75	217.1198	157.4210	148.9713	161.0948
250	1.00	217.1198	157.7884	166.6054	167.7076
500	0.05	437.4532	441.5730	440.8240	440.0749
500	0.10	437.4532	439.3258	443.0712	440.0749
500	0.25	437.4532	383.8951	389.1386	383.8951
500	0.50	437.4532	434.8315	440.0749	440.0749
500	0.75	437.4532	391.3858	393.6330	393.6330
500	1.00	437.4532	413.8577	354.6816	406.3670

ตารางที่ ข.6 สมดุลไอโซเทอร์มแบบฟรุนคิช

ปริมาณสลิคซ์ (กรัม)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.25	109.4222	2.8323	10.9517	14.5393
0.50	109.4222	47.2054	26.8127	2.2659
0.75	109.4222	65.7100	3.3988	67.4094
1.00	109.4222	57.0242	60.0453	69.8640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 การคายฟีนอลหลังจากศึกษาการกำจัดที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาการกำจัด (ชั่วโมง)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)			desorption (%)
		1	2	3	
1	9.6614	0.7267	0.7762	0.7514	7.78
2	9.2486	0.7762	0.7762	0.7762	8.39
4	16.3501	0.6524	0.6358	0.6441	3.94
6	53.4269	0.7184	0.7184	0.7184	1.34
24	76.7135	0.9166	0.9331	0.9249	1.21
28	75.6400	1.1065	1.1561	1.1313	1.50

ตารางที่ ข.8 จลนพลศาสตร์การใช้สลิคซ์กำจัดสารละลายฟีนอล

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
5	44.6483	44.1131	43.8073	43.9602
10	44.6483	42.5841	42.5841	42.5841
18	44.6483	22.0183	21.9419	21.9801
28	44.6483	4.2240	4.2431	4.2336
36	44.6483	0.8945	0.8945	0.8945
48	44.6483	0.9786	1.0015	0.9901

ตารางที่ ข.9 อิทธิพลของทองแดงต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสลิคซ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + ทองแดง (mg/l)	ฟีนอล Co (mg/l)	ฟีนอล Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.0	90.2928	19.1063	20.3390	22.4961
0.5	89.5223	46.5331	43.9137	51.1556
1.0	89.3683	79.9692	82.2804	82.2804
3.0	89.9846	85.9784	83.8213	86.7488
5.0	90.6009	86.9029	85.5162	90.4468
10.0	90.9091	90.9091	87.3652	89.5223
15.0	90.6009	89.0601	88.2897	90.1387

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงด้วยสตัดจ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + ทองแดง (mg/l)	ทองแดง Co (mg/l)	ทองแดง Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.0	1.119	1.119	1.119	1.119
0.5	1.629	0.913	0.867	0.904
1.0	2.020	0.971	0.832	0.854
3.0	3.863	0.845	0.823	0.885
5.0	5.606	0.905	0.915	0.883
10.0	10.303	1.350	1.260	1.167
15.0	14.710	1.380	1.447	1.409

ตารางที่ ข.11 อิทธิพลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟีนอลด้วยสตัดจ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + สังกะสี (mg/l)	ฟีนอล Co (mg/l)	ฟีนอล Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.00	90.2928	19.1063	20.3390	22.4961
0.01	91.3713	79.8151	80.8937	80.4314
0.05	91.6795	84.1294	84.8998	85.3621
0.10	88.2897	84.2835	85.2080	84.5917
0.50	90.9091	89.6764	89.8305	89.8305
1.00	89.0601	89.0601	88.7519	89.0601
1.50	90.7550	90.7550	90.7550	90.6009

ตารางที่ ข.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีด้วยสตัดจ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + สังกะสี (mg/l)	สังกะสี Co (mg/l)	สังกะสี Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.00	0.776	0.776	0.776	0.776
0.01	0.801	0.268	0.125	0.242
0.05	0.842	0.328	0.317	0.290
0.10	0.927	0.457	0.261	0.312
0.50	1.321	0.267	0.276	0.304
1.00	1.812	0.328	0.310	0.326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 อิทธิพลของโลหะผสมสังกะสีและทองแดงต่อการกำจัดสารละลายฟีนอล

ฟีนอล 100 (mg/l) + สังกะสี (mg/l) : ทองแดง (mg/l)	ฟีนอล Co (mg/l)	ฟีนอล Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.00 : 0.00	90.2928	11.0940	14.9461	13.8706
0.01 : 0.10	89.5223	79.9692	83.3590	81.0478
0.05 : 0.50	89.3683	85.9784	84.5917	85.0539
0.10 : 1.00	89.9846	87.5193	88.5978	89.2142
0.50 : 5.00	90.6009	90.2928	90.7550	90.4468

ตารางที่ ข.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีของสลัดจ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + สังกะสี (mg/l) : ทองแดง (mg/l)	สังกะสี Co (mg/l)	สังกะสี Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.00 : 0.00	0.767	0.767	0.767	0.767
0.01 : 0.10	0.788	0.713	0.656	0.647
0.05 : 0.50	0.829	0.736	0.674	0.652
0.10 : 1.00	0.886	0.784	0.671	0.658
0.50 : 5.00	1.291	0.972	0.850	0.801

ตารางที่ ข.15 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสลัดจ์

ฟีนอล 100 (mg/l) + สังกะสี (mg/l) : ทองแดง (mg/l)	ทองแดง Co (mg/l)	ทองแดง Ce (mg/l)		
		1	2	3
0.00 : 0.00	0.994	0.994	0.994	0.994
0.01 : 0.10	1.197	0.772	0.707	0.718
0.05 : 0.50	1.520	0.762	0.691	0.745
0.10 : 1.00	2.006	0.873	0.727	0.758
0.50 : 5.00	6.147	0.478	0.408	0.443

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลความเข้มข้นต่างๆด้วยสตกซ์ที่มีเซลล์มีชีวิต

ความเข้มข้นฟีนอล (mg/l)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
25	21.9680	0.8543	0.9553	0.9458
50	42.6737	1.2840	1.1556	1.1934
100	85.7576	11.9697	10.7576	9.6970
125	111.4969	36.8827	34.5293	40.8951
175	152.3094	83.7610	78.6290	84.1276
225	204.8585	131.0252	136.7636	132.9380
250	220.1166	145.4082	160.7143	147.9592
300	270.3887	154.1540	205.6021	228.8491

ตารางที่ ข.17 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลความเข้มข้นต่างๆด้วยสตกซ์ที่เซลล์ตายแล้ว

ความเข้มข้นฟีนอล (mg/l)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)		
		1	2	3
25	21.9680	1.1518	1.1747	1.1594
50	42.6737	1.5785	1.6465	1.4955
100	85.7576	18.0303	8.7879	15.6061
125	111.4969	77.3534	72.3765	94.5216
175	152.3094	114.9194	121.8842	95.1246
225	204.8585	166.2204	155.5088	145.9449
250	220.1166	174.1983	165.8163	171.6472
300	270.3887	234.1845	194.9314	223.1326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเกศิณี พุกถานนท์ เกิดวันที่ 28 พฤษภาคม 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรุ่งสิ่งแวดล้อม) จากสถาบันราชภัฏจันทร- เกษม ปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้