



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by Sludge from Constructed
Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and
Developmental Project at Phetchaburi and Suphanburi Province

นามผู้วิจัย นายเชิดพงศ์ เหลียวพัฒน์พงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์พิลาณี ไถถนอมสัจด์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by Sludge from Constructed Wetland of
The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Developmental Project
at Phetchaburi and Suphanburi Province

โดย

นายเชิดพงศ์ เหลียวพัฒนพงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

เชิดพงษ์ เหลียวพัฒน์พงศ์ 2551: การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลาย ด้วยสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัด สุพรรณบุรี ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ นิพนธ์ ตังคณานุกฤษ, Ph.D. 112 หน้า

ฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับจากผงสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัด เพชรบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรี ถูกตรวจวัดในรูปแบบ quinoneimine ด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ความ ยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (3-8) ระยะเวลา ปั่นกวน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (50-500 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณของตัว ดูดซับ (10-100 กรัม/ลิตร) ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดิชถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ของการ ดูดซับ ณ ภาวะสมดุลของฟีนอล และพบว่ากระบวนการดูดซับของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของ ฟรุนดิชและแลงเมียร์ ตามลำดับ นำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการกำจัด ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

Cherdpong Liawpattanapong 2008: Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by Sludge from Constructed Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Developmental Project at Phetchaburi and Suphanburi Province. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 112 pages.

The remained phenol after its adsorptive extraction from Laem Phak Bia project in Phetchaburi and Suphanburi province sludges powder can be determined by spectrophotometrically at 510 nm as quinoneimine. The effects of pH (3-8), shaking time or digestion time, contact time, initial concentration of phenol (50-500 mg/L) and amount of adsorbent (10-100 g/L) are reported. Langmuir and Freundlich models are used to correlate equilibrium data on sorption of phenol. It was found that the adsorption process of Phetchaburi and Suphanburi sludges powder are statistically significant fit for Freundlich and Langmuir models respectively. The system has been applied to removal phenol and its derivatives in wastewater from paper industries.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แนวคิด รวมทั้งช่วยทำการแก้ไข ปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พิลาณี ไวถนอมสัจด์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาตอบคำถามแนะนำ ตลอดจนช่วยทำการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณมูลนิธิชัยพัฒนา และศาสตราจารย์ ดร. เกษม จันทร์แก้ว ในนามประธานโครงการศึกษาและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ได้ช่วยเหลือและให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท แอ็ดวานซ์ อะโกร จำกัด บริษัท อินเทอร์เน็ตประเทศไทย จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยประกอบการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ คุณภทรมน โสกันธิกา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อรัตน์ และคุณแม่เสาวณี เหลียวพัฒนพงศ์ ที่ให้ความเมตตาอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ พี่ๆ ในสมาคมสร้างคุณค่าในประเทศไทย ที่ได้ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ คุณสุพินิต มะลิป้า และคุณศุภกานต์ ชัยโชติรานันท์ ที่ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ คุณศิริวรรณ สุขเกษม คุณธนศ พลการ รวมถึงขอขอบคุณ พี่ๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 29 และเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 30 ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เชิดพงศ์ เหลียวพัฒนพงศ์

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	90
สรุป	90
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	97
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟินอล	5
2	แสดงฟินอลและอนุพันธ์ของฟินอลที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน	16
3	สมบัติของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน	37
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช	51
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าพีเอช	53
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาปั่นกววน	55
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาปั่นกววน	57
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมผัส	58
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมผัส	60
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟินอล	61
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟินอล	63
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสไลด์	65
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสไลด์	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	77
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	80
16	การดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและการฟื้นฟูสภาพสไลด์	81
17	การดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีและการฟื้นฟูสภาพสไลด์	83
18	การดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและปริมาณสไลด์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร	84
19	การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจาก โรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	85
20	การดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีและปริมาณสไลด์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร	87
21	การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจาก โรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช	98
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าพีเอช	98
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาปั่นกววน	99
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาปั่นกววน	99
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมผัส	100
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมผัส	100
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล	101
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล	101
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสไลด์	102
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	102
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จาก บ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสไลด์	103
12	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	104
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	104
15	การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และฟื้นฟูสภาพแล้ว	105
16	การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และฟื้นฟูสภาพแล้ว	105
17	การดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	106
18	การดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	106
19	แสดงคุณภาพของน้ำจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F	107
20	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD	108
21	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD	109
22	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD	109
23	แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล ทางสถิติโดยวิธี LSD	110
24	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ทางสถิติโดยวิธี LSD	110
25	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล 20 มิลลิกรัม/ลิตรทางสถิติโดยวิธี LSD	111

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเกิดปฏิกิริยาของฟินอล	15
2	การระบุตำแหน่ง ortho (<i>o</i>), meta (<i>m</i>) และ para (<i>p</i>) ในฟินอล	16
3	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	20
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	22
5	แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	22
6	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	23
7	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	24
8	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	25
9	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	28
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	30
11	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	32
12	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	33
13	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	33
14	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	34
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	35
16	สถิติจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	43
17	สถิติจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	44
18	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสถิติจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช	51
19	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟินอลของสถิติจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าพีเอช	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาบ่มกวน	55
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาบ่มกวน	56
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมผัส	58
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมผัส	59
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล	61
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล	63
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสไลด์	65
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยใช้สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	67
28	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์ โดยใช้สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	68
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสไลด์	70
30	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยใช้สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	72
31	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์ โดยใช้สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	73

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	75
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี	76
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ ไหลผ่านคอลัมน์	76
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	78
36	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	79
37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณ ฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	79
38	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และการฟื้นฟูสภาพสไลด์	81
39	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และการฟื้นฟูสภาพสไลด์	82
40	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสไลด์ เมื่อใช้สารละลาย มาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร	84
41	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสไลด์ เมื่อใช้สารละลาย มาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

1

กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล

111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BET	=	Brunauer, Emmett and Teller
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
COD	=	Chemical Oxygen Demand
DO	=	Dissolved Oxygen
EC	=	Electrical Conductivity
LSD	=	Least Significant Different
pH	=	Positive Potential of The Hydrogen Ions
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TSS	=	Total Suspended Solid
TDS	=	Total Dissolved Solid

**การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี**

**Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by Sludge from Constructed
Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research
and Developmental Project at Phetchaburi and Suphanburi Province**

คำนำ

ฟีนอลเป็นอนุพันธ์ของอะโรเมติก มีสมบัติเป็นกรดอ่อน มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำปฏิกิริยากับโซเดียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ ประโยชน์ของฟีนอลใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการผลิตพลาสติกบางชนิด ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบหลายชนิด เช่น สารกันหืน BHT (Butylated Hydroxy Toluene) BHA (Butylated Hydroxy Anisole) สารทำความสะอาดผิวโลหะ สารเคลือบผิวชนิดไม่มีประจุ สารตัวกลางสำหรับสารเคมีในการเกษตร พงษ์ฟอกน้ำยาซักผ้า สารสำหรับทำความสะอาดพรม ทำยาสีย้อมขนสัตว์ (เซ็รรา) สารนี้เดิมในขบวนการผลิตกระดาษเป็นสารเคลือบผิวในผลิตภัณฑ์กาว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเพื่อการเคลือบผิววัสดุให้แข็งแรง คงทนและสวยงาม เป็นต้น ปริมาณของฟีนอลจะปนเปื้อนมากับน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จะมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน ถ้าไม่มีการบำบัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในด้านสุขภาพของมนุษย์และสัตว์

ปัจจุบันจำนวนประชากรมีเพิ่มมากขึ้น ความต้องการใช้ทรัพยากรเพื่อตอบสนองความต้องการของตนเองจึงมีมากขึ้นด้วย ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและความรู้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการนำ สารฟีนอลมาใช้ในกระบวนการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดของเสียหรือมลพิษออกมาจากกระบวนการผลิตเหล่านี้มากกว่าเดิม ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดและกำจัด โดยนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมและคุ้มค่ามาใช้ เพื่อลดมลพิษดังกล่าวที่เกิดขึ้นก่อนที่จะออกไปสู่ระบบสิ่งแวดล้อมโดยรวม

อนึ่ง การนำตะกอนดินมาบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของฟีนอลปนเปื้อนอยู่ เป็นวิธีบำบัดด้วยวิธีธรรมชาติวิธีหนึ่ง ที่สามารถช่วยลดปริมาณฟีนอลก่อนออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นการนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (lagoon treatment) มาใช้ประโยชน์มากกว่าการนำไปทิ้ง เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ตะกอนอีกด้วย

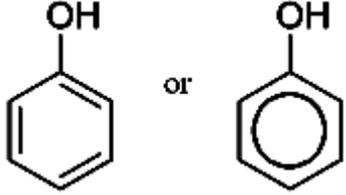
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี
2. เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี
3. เพื่อนำสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี ที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

การตรวจเอกสาร

1. ฟีนอล

1.1 การบ่งลักษณะ (identification and properties)

- | | | |
|-------------------|---|---|
| 1) ชื่อสามัญ | : | phenol |
| 2) ชื่อเคมี | : | phenol |
| 3) ชื่ออื่น | : | acide carbolique |
| 4) สูตรโมเลกุล | : | C_6H_6O (C 76.57%, H 6.43%, O 17.00%) |
| 5) สูตรโครงสร้าง | : |  |
| 6) น้ำหนักโมเลกุล | : | 94.11 |

1.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

ฟีนอลเป็นผลึกไม่มีสีหรือสีขาว ถ้าไม่บริสุทธิ์จะมีสีชมพูอ่อนๆ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดูดความชื้น ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน จึงมีชื่อเรียกที่รู้จักกันทั่วไปว่ากรดคาร์โบลิก (carbolic acid) คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอลแสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	อ้างอิง
จุดหลอมเหลว	40.85°C	Merck, 1996
จุดเดือด	182 °C	Merck, 1996
จุดวาบไฟ	85°C (open cup)	Verschueren, 1996
	79°C (closed cup)	NFPA, 1991
อุณหภูมิติดไฟได้เอง	715°C	NFPA, 1991
ช่วงความเข้มข้นติดไฟได้	3-10 % (ในอากาศ)	Clayton and Clayton, 1981
ความดันไอ	0.3513 มม.ปรอท (ที่ 25°C)	Clayton and Clayton, 1981
การละลายน้ำ	93 กรัม/ลิตร (ที่ 16°C)	Morrison and Boyd, 1973
ความหนาแน่นไอ	3.24 (อากาศ = 1)	Clayton and Clayton, 1981
ความถ่วงจำเพาะ	1.071	Merck, 1996
ดัชนีหักเหแสง	1.5408 (ที่ 41°C)	Merck, 1996

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542)

1.3 กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีการผลิตฟีนอลในทางอุตสาหกรรมมีหลายวิธีคือ

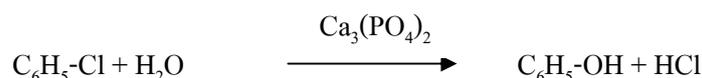
1.3.1 กระบวนการ Hock คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันสาร cumene ($C_6H_5CH(CH_3)_2$) ได้เป็น cumyl hydroperoxide และถูกแยกสลายต่อด้วยกรดเจือจางได้เป็นฟีนอลและอะซีโตน จะเห็นได้ว่านอกจากฟีนอลแล้วผลผลิตจากปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งคือ อะซีโตน ซึ่งระเหยได้ทำให้ไม่มีกากของเสียจากการผลิตเกิดขึ้น จึงทำให้วิธีนี้เป็นวิธีผลิตฟีนอลทางการค้าที่นิยมกันอย่างมากในปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จากในปี 1993 ประเทศสหรัฐอเมริกาผลิตฟีนอลได้ 1,544,222 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้ 1,447,000 ตันหรือมากกว่า 93% ผลิตโดยวิธี cumene oxidation นี้

1.3.2 ปฏิกริยาออกซิเดชันสารโทลูอิน ($C_6H_5CH_3$) ได้เป็นกรดเบนโซอิก (C_6H_5COOH) แล้วตามด้วย ปฏิกริยา oxidative decarboxylation ได้ฟีนอล วิธีนี้เป็นวิธีผลิตฟีนอลทางการค้าของบริษัท Dow Chemical สหรัฐอเมริกา

1.3.3 ปฏิกริยา sulfonation สารเบนซีน ได้เป็น benzene sulfonate ($C_6H_5SO_3Na$) แล้วจึงนำไปหลอมละลายกับ NaOH ที่อุณหภูมิประมาณ 300 °ซ ผลผลิตที่ได้คือ sodium phenate (C_6H_5ONa) ซึ่งเมื่อทำปฏิกริยากับกรด จะได้ฟีนอล



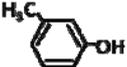
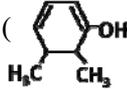
1.3.4 ปฏิกริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ของสาร chlorobenzene (C_6H_5Cl) ด้วยไอน้ำ โดยมี tricalcium phosphate หรือซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกริยา



1.4 การใช้

1.4.1 ฟีนอลใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ เป็นสารละลายเดี่ยวหรือสารละลายผสมกับยาฆ่าเชื้อตัวอื่น ฟีนอลมีฤทธิ์เป็น bacteriostatic ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.2% มีฤทธิ์เป็นสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (bacteriocide) ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1% และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราได้ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.3%

ฟีนอลยังใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อชนิดต่างๆ โดยวัดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฟีนอล (phenol coefficient) (AOAC, 1995)

1.4.2 ใช้ในการผลิตสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น cresols (, xyleneols (, กรดซาลิซิลิก ($C_6H_5(OH)COOH$), aniline ($C_6H_5NH_2$) และฟีนอลิก เรซิน

1.5 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม

พินอลเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจากแหล่งต่างๆ คือ

1.5.1 อุตสาหกรรม จากกระบวนการผลิตและการใช้พินอลในการผลิตสารเคมี

1.5.2 บ้านเรือนและห้องปฏิบัติการ จากการใช้พินอลเป็นสารฆ่าเชื้อ

1.5.3 รถยนต์ ไอเสียรถยนต์มีพินอลผสมกันอยู่เล็กน้อยที่ความเข้มข้น 1.2-7.7 มิลลิเมตร/ลูกบาศก์เมตร (Kuwata *et al.*, 1980; Verschuere, 1996)

1.5.4 การย่อยสลายของเบนซิน โดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในอากาศ (IPCS, 1994)

1.6 การเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม

พินอลในสิ่งแวดล้อมสลายตัวได้อย่างรวดเร็วทั้งในอากาศ น้ำและดิน การสลายตัวของพินอลในอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 2.28-22.8 ชั่วโมงเท่านั้น การสลายตัวของพินอลในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดินเกิดขึ้นทั้งใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน

พินอลสะสมได้เพียงเล็กน้อยในสิ่งมีชีวิตในน้ำ bioconcentration factor (BCF) ของพินอล ในสาหร่าย *Chlorella fusca* และปลา *Leuciscus idus melanotus* มีค่าเท่ากับ 200 และ 20 ตามลำดับ (Freitag *et al.*, 1985)

1.7 ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

1.7.1 พิษต่อสัตว์

พินอลมีพิษปานกลางต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ค่าLD₅₀ ในสัตว์กัดแทะที่ได้รับพินอลทางปาก มีค่าระหว่าง 300-600 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ค่า LD₅₀ ในหนูบ้าน (rat) และกระต่าย

ที่ได้รับฟีนอลทางผิวหนัง มีค่าเท่ากับ 670 และ 1,400 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามลำดับ LD₅₀ ในหนูบ้าน (rat) ที่ได้รับโดยการฉีดเข้าช่องท้อง (intraperitoneal injection) มีค่าอยู่ในช่วง 127-223 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว

สัตว์ทดลองที่เสียชีวิตจากการได้รับฟีนอลที่ความเข้มข้นสูงนั้นมีสาเหตุมาจากฤทธิ์ในการกดระบบประสาทส่วนกลางของฟีนอล ลักษณะอาการของการเกิดพิษจากฟีนอลไม่ขึ้นกับวิธีการได้รับสารเข้าสู่ร่างกาย ความเป็นพิษที่พบในสัตว์ทดลอง ได้แก่ ประสาทและกล้ามเนื้อไวต่อการกระตุ้นมากเกินไป (neuromuscular hyperexcitability) มีฤทธิ์กัดผิวหนังและเยื่อในลำคอและทางเดินอาหารเมื่อกินฟีนอลเข้าไป (Deichmann and Keplinger, 1963) นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของปอดและเส้นใยประสาท ทำลายเนื้อเยื่อของตับ ไต และต่อมขี้มัส และยับยั้งการตอบสนองของรูมาตาต่อแสง รูมาตาคัดค้านการเกิดเซลล์สืบพันธุ์ (meiosis) (Schlicht *et al.*, 1992)

1.7.2 พิษต่อมนุษย์

ระดับความเป็นพิษมีรายงานการเสียชีวิตในมนุษย์ (ผู้ใหญ่) ที่ได้รับฟีนอลโดยการกินในปริมาณเพียง 1 กรัม ส่วนการได้รับสัมผัสทางผิวหนังอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้เช่นกัน พบผู้ป่วยเสียชีวิตจากการกรดของสารละลายฟีนอล (ความเข้มข้น 80-100%) ที่บริเวณแก้ม หนึ่งศირษะ สะโพก ต้นขา และอุ้งอ้นทะ (Turtle and Dolan, 1992) ผู้ป่วยอีกรายหนึ่งทำ 2-4-dichlorophenol บริสุทธิ์ กรดร่างกายเป็นบริเวณกว้างน้อยกว่า 10% ของพื้นที่ร่างกาย พบว่าผู้ป่วยชักและหมดสติภายในเวลา 20 นาที นอกจากนี้มีรายงานทารกเสียชีวิตจากการใช้สารละลายฟีนอลทาสะดือ โดยมีผ้าพันแผลปิดทับสนิท (Hinkel and Kintzel, 1968) และผู้ป่วย 1 รายเสียชีวิตเมื่อใช้สารละลายฟีนอลร้อยละ 2 โดยปริมาตร ทาแผลไฟไหม้เป็นบริเวณกว้างมากกว่า 30% ของพื้นที่ร่างกาย

พิษเฉียบพลัน ฟีนอลก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายไม่ว่าจะรับสาร โดยการรับประทาน การสูดดมหรือสัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากมีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรงทำให้เกิดเป็นแผลไหม้ในบริเวณที่ได้รับสัมผัสโดยตรง เช่น ช่องปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ตา และผิวหนัง หากเข้าตาอาจทำให้มีอาการตาสู้แสงไม่ได้ (photophobia) กระจกตาเป็นแผลหรืออาจถึงกับตาบอดได้ ฟีนอลถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็วและอาจทำให้เสียชีวิตภายในเวลา 10 นาที (Clayton and Clayton, 1994)

พิษเรื้อรัง การได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกายซ้ำหลายครั้งในปริมาณมาก พบว่าทำให้อาเจียน กลืนอาหารลำบาก น้ำลายไหล ท้องเสีย เบื่ออาหารและน้ำหนักตัวลด ปวดศีรษะ เป็นลม มึนงง อารมณ์แปรปรวน ตับและไตถูกทำลาย ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ อ่อนเพลีย ปัสสาวะมีสีคล้ำ ผิวหน้าแตกเป็นแผล และอาจมีสีผิวผิดปกติ (abnormal pigmentation)

1.8 ความเป็นพิษเฉพาะด้าน

1.8.1 ปฏิกริยาทางชีวเคมี

ฟีนอลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์หลายชนิดในสัตว์ทดลอง จากการศึกษาในหนูตะเภา (mouse) ที่ได้รับฟีนอลขนาดสูง มีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดในเซลล์ของ intestinal mucosa เช่นเอนไซม์ glucose-6-phosphatase, succinate dehydrogenase และ cytochrome oxidase (Ołowska *et al.*, 1980) รวมทั้งพบการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ alkaline phosphatase ในไตของหนูตะเภา (mouse) (Laszezynska *et al.*, 1983) นอกจากนี้ยังพบว่าฟีนอลมีผลยับยั้งขบวนการ oxidative phosphorylation ที่ปอด ตับ และไตของหนูบ้าน (rat) ในขณะที่อัตราการเกิด glycolysis ที่ปอด และไตมีค่าสูงขึ้น (Skvortsova and Vysochina, 1976)

1.8.2 การเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogenicity)

ฟีนอลไม่จัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากไม่มีรายงานการเกิดมะเร็งในคน และข้อมูลสนับสนุนจากการศึกษาในสัตว์ทดลองมีไม่เพียงพอ International Agency for Research on Cancer (IARC) จึงจัดฟีนอลอยู่ใน group 3 (IARC, 1993)

การตรวจพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อ (histopathology) และการวิเคราะห์ทางสถิติ ไม่พบว่าฟีนอลก่อให้เกิดพิษหรือมะเร็งชนิดใดๆ ในหนูตะเภา (mouse) เหล่านี้ แต่เฉพาะในหนูบ้าน (rat) เพศผู้ที่ได้รับฟีนอลในขนาดความเข้มข้นต่ำเท่านั้นที่พบว่ามีอุบัติการณ์เนื้องอกของ adrenal medular (pheochromocytoma) และ interstitial cell ในอวัยวะ มะเร็งเม็ดเลือดขาว (leukemias) หรือเนื้องอกของเซลล์น้ำเหลือง (lymphoma) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่พบอุบัติการณ์ของมะเร็งในหนูบ้าน (rat) เพศเมียเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

แต่กระนั้นก็ตามมีข้อมูลจากการศึกษาในสัตว์ทดลองบ่งชี้ว่าฟินอลอาจจะมีคุณสมบัติเป็น promoter และ/หรือ เป็นสารก่อมะเร็งที่ผิวหนังอย่างอ่อนๆ (weak skin carcinogen) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหนูตะเภา (mouse) ในการศึกษาดังกล่าวพบว่า การหาฟินอลบนผิวหนังของหนูตะเภา (mouse) ซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยที่หนูเหล่านี้ได้รับการทาผิวหนังด้วยสารที่เป็น initiator “dimethylbenz [a]anthracene (DMBA)” มาครั้งหนึ่งก่อนการทาผิวหนังด้วยฟินอลปรากฏว่าทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังชนิด papillomas และ carcinomas (Boutwell and Bosch, 1959 ; Salamon and Glendenning, 1957)

1.8.3 การเป็นสารก่อเกิดการกลายพันธุ์

ฟินอลไม่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์เมื่อนำมาทดสอบในแบคทีเรียหลายชนิด เช่น *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ต่างๆ แต่พบการกลายพันธุ์เมื่อทดสอบในเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น เซลล์เม็ดเลือดขาว (lymphocyte) ของหนูตะเภา (mouse) Hela cells และเซลล์เม็ดเลือดขาว (lymphocyte) ของมนุษย์และในเซลล์ไขกระดูก (bone marrow cell) ของแกะเฉพาะฟินอลที่ความเข้มข้นสูง 0.1-0.2% เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ในเซลล์ของแบคทีเรีย *Escherichia coli* นอกจากนี้การได้รับฟินอลอาจทำให้เกิดความผิดปกติของ DNA และโครโมโซม (chromosome aberrations)

1.8.4 การเสริมพิษ/การต่อต้านพิษ (potentiation/antagonism)

ไม่พบข้อมูลการเสริมพิษ/การต่อต้านพิษของฟินอล

1.8.5 ความเป็นพิษต่อระบบประสาท (neurotoxicity)

ฟินอลมีพิษต่อระบบประสาทของมนุษย์และสัตว์ทดลอง ความเป็นพิษต่อระบบประสาทที่ตรวจพบจากการศึกษาในสัตว์ทดลองที่ได้รับฟินอล โดยการฉีดเข้าช่องท้อง (intraperitoneal) ฉีดเข้าใต้ผิวหนัง (subcutaneous) หรือฉีดเข้าเส้นเลือดดำ ได้แก่ อาการสั่นกระตุก (tremors) ชัก และ โคม่า (Deichmann and Witherup, 1944 ; Ernst *et al.*, 1961 ; Windus-Podehl *et al.*, 1983) มีการเสื่อมสลาย (degeneration) ของไขสันหลังและรากเส้นประสาทไขสันหลัง (spinal root)

และมีรายงานอาการทางประสาทในคนที่ได้รับสัมผัสฟินอล ซึ่งอาการที่พบได้แก่ ชัก ระบบประสาทส่วนกลางถูกกด ถึงขั้นโคม่า และอาการอัมพาตของกล้ามเนื้อที่ใบหน้า(Haddad *et al.*, 1979)

1.8.6 การระคายเคืองเบื้องต้น

ฟินอลก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ตาและทางเดินหายใจ หากถูกสัมผัสผิวหนังจะเป็นผื่นแดง อักเสบ สีผิวเปลี่ยนและอาจถึงขั้นเป็นโรคผิวหนัง eczema เกิดเนื้องอกที่ผิวหนังหรือผิวหนังตาย (Conning and Hayes, 1970 ; Pullin *et al.*, 1978 ; Patrick *et al.*, 1985) การทดสอบที่ตาของกระต่ายโดยใช้ฟินอลขนาด 5 มิลลิกรัม ก่อให้เกิดการระคายเคืองตาอย่างรุนแรง ส่วนการทดสอบบนผิวหนังของกระต่าย พบว่าฟินอลที่ขนาดตั้งแต่ 500 มิลลิกรัมก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางผิวหนังอย่างรุนแรง แต่ฟินอลขนาดต่ำ(100 มิลลิกรัม) ก่อให้เกิดอาการระคายเคืองเพียงเล็กน้อย

1.8.7 ผลต่อการพัฒนาของตัวอ่อน (embryotropic action)

การศึกษาแบบ *in vitro* โดยวิธี chick embryotoxicity screening test (CHEST) พบว่าฟินอลขนาด 100 ไมโครกรัม ไม่ทำให้เกิดพิษต่อตัวอ่อนของสัตว์ และพบว่าฟินอลเป็นสารที่มีพิษต่ำที่สุดในบรรดาสารที่นำมาทดสอบจำนวน 130 ชนิด การทดสอบโดยวิธี whole embryo culture system ในตัวอ่อนของหนูบ้าน (rat) (gestational day 10) พบความผิดปกติที่หางของตัวอ่อน และตัวอ่อนจะมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ และพบว่าฟินอลสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ human embryonic palatal mesenchyme cells เช่นกัน (Pratt and Willis, 1985) แต่อย่างไรก็ตามไม่ปรากฏรายงานการเกิดพิษของฟินอลต่อทารกในครรภ์ของมนุษย์

1.8.8 ความเป็นพิษต่อภูมิคุ้มกัน (immunotoxicity)

ฟินอลอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันในมนุษย์ โดยเฉพาะ เมื่อได้รับสัมผัสเป็นเวลานานๆ จากการศึกษาในคนงานที่ได้รับฟินอลจากการสูดดมไอที่มีฟินอลเป็นองค์ประกอบ (1.3 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ร่วมกับฟอร์มอลดีไฮด์ (formaldehyde, 0.8 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร) และ organic chlorohydrocarbons อื่นๆ เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าทำให้จำนวน T-lymphocytes และ NK Cell cytotoxicity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณการเพิ่มจำนวน

ของ lymphocyte (lymphocyte proliferation) จากการเหนี่ยวนำด้วย phytohemagglutinin และ alloantigen ลดลง และในคนงานจำนวนหนึ่งที่พบว่ามีการสูดดมฟีนอลในปริมาณสูงสุดจะมีจำนวนเม็ดเลือดแดง (erythrocyte) และ T-helper lymphocyte ลดลงแต่มีจำนวนของ eosinophils และ monocytes เพิ่มขึ้น (IPCS, 1994)

1.8.9 ความเป็นพิษต่อการสืบพันธุ์

พบความผิดปกติของการสืบพันธุ์ในหนูบ้าน (rat) ที่ได้รับฟีนอลในน้ำดื่มในความเข้มข้น 100-12,000 มิลลิกรัม/ลิตร (เท่ากับ 10-1,200 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน) ระดับความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ขึ้นอยู่กับขนาดของฟีนอลที่สัตว์ทดลองได้รับ ปัจจุบันข้อมูลการศึกษาผลกระทบของฟีนอลต่อการสืบพันธุ์มีจำกัดและยังไม่พบรายงานความเป็นพิษของฟีนอลต่อระบบสืบพันธุ์ของมนุษย์ (Heller and Pursell, 1938)

1.8.10 ความผิดปกติที่เกิดในทารก (teratogenicity)

หนูบ้าน (rat) และหนูตะเภา (mouse) ที่ได้รับฟีนอลทางปากขณะตั้งท้องพบว่าลูกที่ออกมามีน้ำหนักตัวน้อย แคระแกรน เต็บโตซ่า และมีความผิดปกติทางกาย เช่น อัมพาตที่ขา (limp paralysis and pulsy) และหางคดงอ (kinked tail) ส่วนตัวแม่ที่ได้รับฟีนอลจะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัว (maternal weight gain) ลดลง และมีอัตราการตายเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากได้รับที่ความเข้มข้นสูง (Minor and Becker, 1971)

1.8.11 พฤติกรรม

การเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรมที่เด่นชัดจากการตรวจพบในหนูบ้าน (rat) ที่ได้รับฟีนอล คือ อาการสั่นกระตุก (tremor) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-2 นาทีหลังจากที่สัตว์ได้รับฟีนอลขนาดสูง (120-224 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักตัว) อาการสั่นกระตุกนี้มักจะเกิดขึ้นหลังจากการได้รับฟีนอลเป็นครั้งแรกเท่านั้น (first dose) เท่านั้น ฟีนอลมีผลลดการทำงานของประสาทและกล้ามเนื้อ (motor activity) ส่วนในคนที่ได้รับฟีนอล พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรมเช่น มีอาการกล้ามเนื้ออ่อนเปลี้ย ประสาทหลอน และการรับรู้บิดเบือนไป (distorted perceptions)

1.9 ผลต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม

1.9.1 สิ่งมีชีวิตในน้ำ

สำหรับแหล่งน้ำจืดตามธรรมชาติที่ปลอดภัยสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำควรมีฟินอลเท่ากับ 2,560 ไมโครกรัม/ลิตร (fresh chronic criteria) โดยคิดค่าเฉลี่ยในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 10,200 ไมโครกรัม/ลิตร

ในน้ำทะเลไม่ควรมีความเข้มข้นของฟินอลเกิน 5,800 ไมโครกรัม/ลิตร (U.S. EPA, 1986)

1.9.2 สิ่งมีชีวิตบนบก

การศึกษาเมแทบอลิซึมของฟินอลในสัตว์บกชนิดต่างๆ นอกจากสัตว์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการพบว่าปฏิกิริยา conjugation มีความแตกต่างกัน French *et al.* (1974) รายงานว่าแมว (*Felis catus*) สิงโต (*Panthera leo*) ชะมดแอฟริกา (*Viverra civetta*) และ forest genets (*Genetta pardina*) ขับฟินอลออกจากร่างกายในรูป conjugate กับ sulfate ทั้งหมดโดยไม่อยู่ในรูป conjugate กับ glucuronide ซึ่งตรงข้ามกับหนูบ้าน (rat) ที่ขับฟินอลออกในรูป conjugate กับ sulfate และ glucuronide ในอัตราส่วนร้อยละ 54 และ 42 ตามลำดับความแตกต่างในกระบวนการเมแทบอลิซึมในสัตว์ชนิดต่างๆ นี้เป็นหัวข้อสำคัญหนึ่งที่ใช้อธิบายความเป็นพิษของสารเคมีที่แตกต่างกันในสัตว์ชนิดต่างๆ

1.10 ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมาย

1.10.1 ประเทศไทย

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ซึ่งออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน กำหนดให้มีสารประกอบฟินอลไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร

ประกาศกระทรวงมหาดไทย ได้ออกอำนาจตามความในข้อ 2(7) แห่งประกาศของคณะปฏิวัติ ฉบับที่ 103 ลงวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2515 กำหนดให้มีฟีนอลได้ 5 ส่วนในล้านส่วน โดยปริมาตร (ppm) หรือ 19 มิลลิกรัม/อากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร (mg/m^3)

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้ออกพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กำหนดให้มีสารประกอบฟีนอลในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้ออกพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งต้องมีฟีนอล ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร และกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2 ต้องมี ฟีนอล ไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดให้ภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ polyvinyl chloride, polyethylene, polystyrene, polyvinylidene chloride หรือ polyethylene tetraphthalate มีปริมาณ phenol ได้ไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/กิโลกรัมและต้องไม่พบฟีนอลในภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดเมลามีน

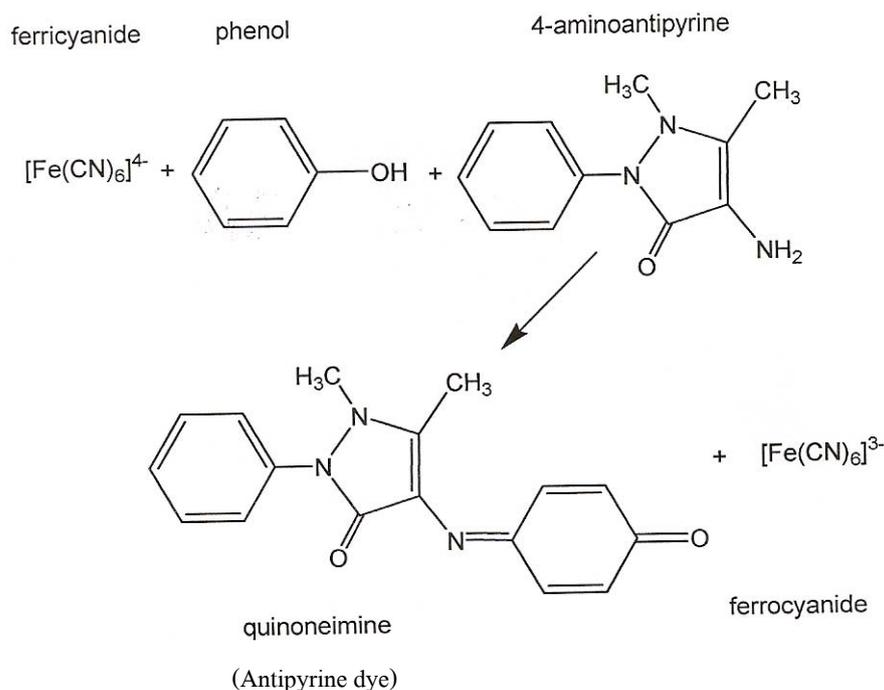
1.10.2 ต่างประเทศ

กฎหมายและข้อกำหนดบางประเทศที่ใช้ควบคุมฟีนอลในบางประเทศ ได้กำหนดความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ 8 ชั่วโมงวัน (8-hour time-weighted average) เท่ากับ 19 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร (5 มิลลิกรัม/ลิตร) (สารนี้ถูกดูดซึมผ่านทางผิวหนังได้ดี) น้ำที่ชำระร่างกายต้องมีฟีนอลเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร

1.11 ดัชนีฟีนอล (phenol index)

ดัชนีฟีนอลบ่งบอกถึงฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่สามารถทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-AAP) เกิดเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine

ฟีนอลถูกใช้เป็นตัวแทนของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในการเกิดปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน และเฟอร์ริกไซยาไนด์ไอออนในสภาวะที่เป็นเบส ได้สารละลายสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine ดังปฏิกิริยา

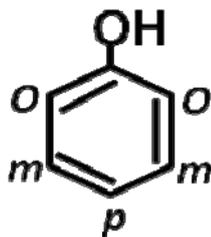


ภาพที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาของฟีนอล

วัดการดูดกลืนคลื่นแสงของสารสีน้ำตาลแดงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เรียกวิธีนี้ว่า วิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-AAP method)

เนื่องจากในแหล่งน้ำเสียอาจจะประกอบด้วยฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลหลายชนิด ดังนั้นการรายงานปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่เกิดจาก 4-อะมิโนแอนติไพรีน จึงถูกระบุเป็นปริมาณฟีนอลหรือดัชนีฟีนอล

สำหรับอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีหมู่ฟังก์ชันแอลคิล ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$), เอริล (aryl , C_6H_5), ไนโตร (NO_2), ไนโตรโซ ($\text{N}=\text{O}$) และแอลดีไฮด์ ($-\text{CHO}$) ที่เกาะอยู่บนตำแหน่งพารา (para position) ของฟีนอล จะไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน โดยที่ตำแหน่งพาราในฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจะทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน



ภาพที่ 2 การระบุตำแหน่ง ortho (*o*), meta (*m*) และ para (*p*) ในฟีนอล

ตารางที่ 2 แสดงฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน

Compound	4-AAP method $\epsilon \times 10^4$
a) Monophenol (ฟีนอลที่มี OH 1 หมู่)	
Phenol	1.30
Salicylic acid	-
<i>o</i> -Chlorophenol	2.08
<i>p</i> -Chlorophenol	0.23
<i>o</i> -Cresol	1.15
<i>m</i> -Cresol	1.10
<i>p</i> -Cresol	-
<i>o</i> -Phenylphenol	0.45
<i>p</i> -Phenylphenol	-
<i>o</i> -Nitrophenol	0.34
<i>m</i> -Nitrophenol	0.04
<i>p</i> -Nitrophenol	-
2,5-Xylenol	0.70
2,6-Xylenol	0.73
3,5-Xylenol	0.61
Thymol	0.58

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Compound	4-AAP method $\epsilon \times 10^4$
b) Diphenols (ฟีนอลที่มี OH 2 หมู่)	
Pyrocatechol	1.30
Resorcinol	0.53
Orcinol	0.20
2-Methylresorcinol	0.65
4- <i>n</i> -Hexylresorcinol	0.30
2,4-Dihydroxybenzoic acid	0.39
2,6-Dihydroxybenzoic acid	-
3,5-Dihydroxybenzoic acid	0.06
2,4-Dihydroxyacetophenone	-
2,6-Dihydroxyacetophenone	0.33
3,5-Dihydroxyacetophenone	0.26
<i>p</i> -Hydroquinone	-
c) Triphenols (ฟีนอลที่มี OH 3 หมู่)	
Phloroglucin	0.15
Pyrogallol	-
d) Naphthols	
1-Naphthol	0.83
2-Naphthol	0.51
1-Naphthol-2-sulfonic acid potassium salt	0.29
1-Naphthol-4-sulfonic acid potassium salt	1.05
Naphthoresorcinol	-

ϵ : สภาวะดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) - : ไม่เกิดสีกับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน

ที่มา: Shinzo Tanabe *et al.*, 1989

2. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาได้เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่ง ไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูก

ดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า โมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

2.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

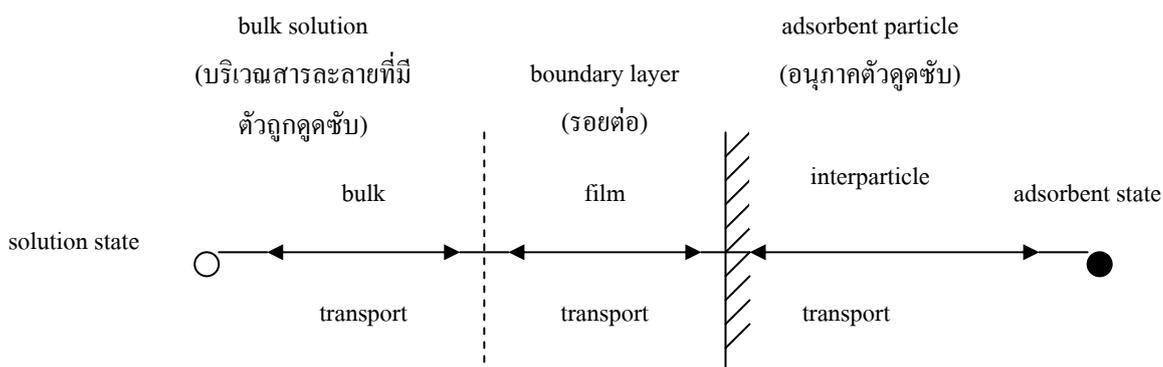
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

2.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

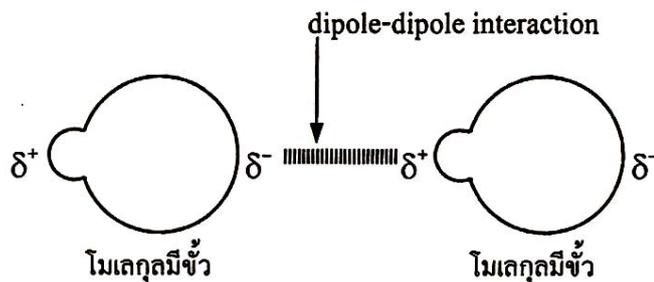
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

2.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์

ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหนึ่งขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวก จึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

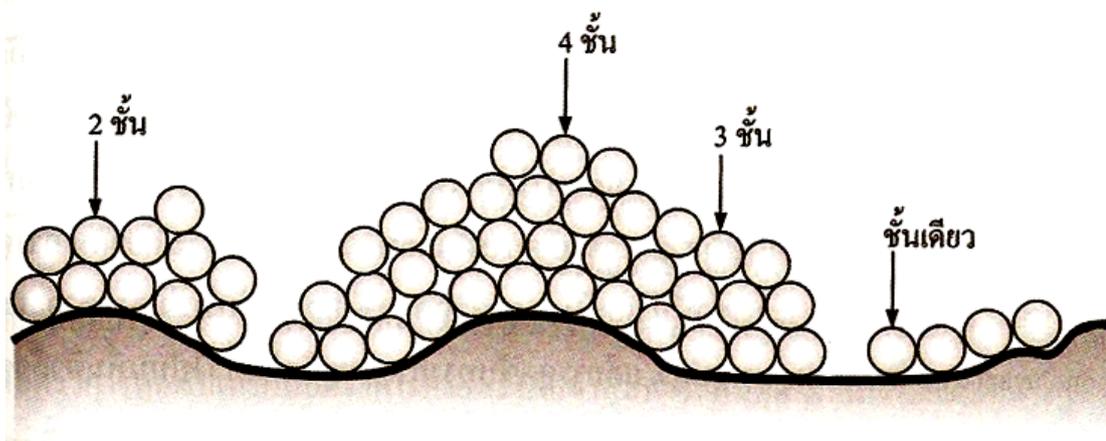
แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และ โปรตอนกับโปรตอน)

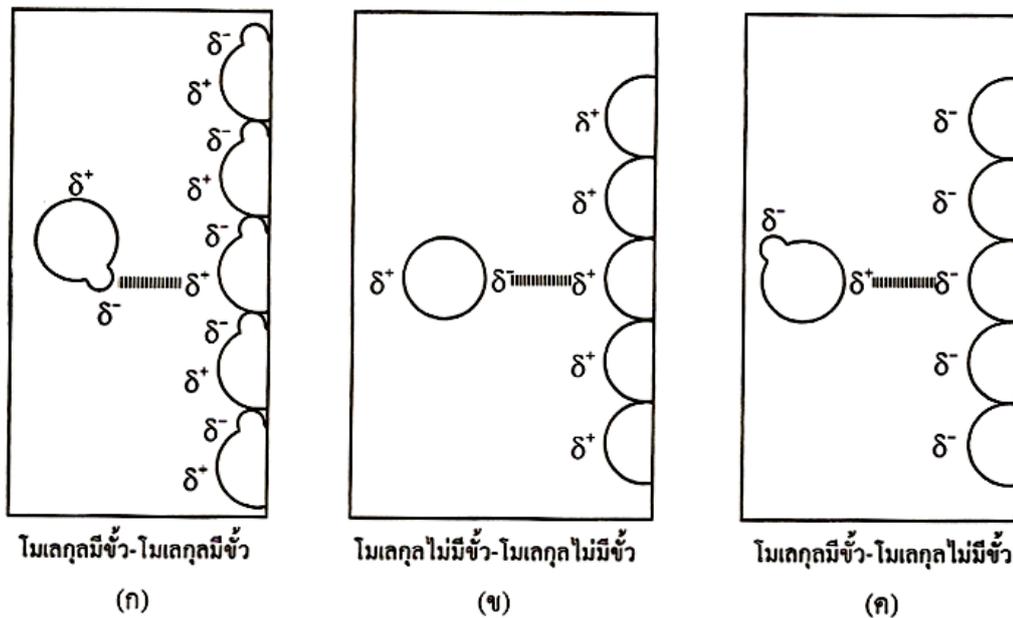
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

2.4 รูปแบบของการดูดซับ

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 7 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 8 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 8 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ มีดังนี้

ก. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ข. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ค. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากการจับตัว

ทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับผิวเข้าไปหาสารดูดซับผิว ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับผิว ในตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดซับผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับผิว

2.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับผิว ความสามารถในการดูดซับผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดซับผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารถูกดูดซับผิวได้มากกว่าสารดูดซับผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดซับผิว เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับผิวสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

2.5.3 ขนาดและลักษณะของสารถูกดูดซับผิว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดซับผิว เช่น คาร์บอน การดูดซับผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับผิวและสารดูดซับผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้

ว่าความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

2.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี

2.5.5 พิเอฆมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

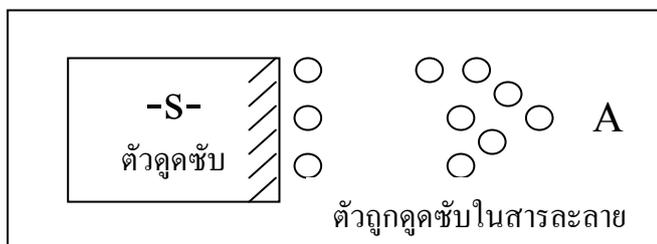
2.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ exothermic

2.5.7 เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย (ฉัตรสินี, 2545)

2.6 สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ตอนต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ณ สภาวะ

สมมูลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คาย
 ซับออกมา มีปริมาณคงที่



ภาพที่ 9 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

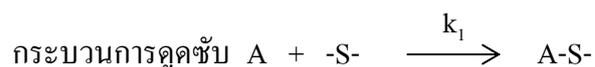
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมล/ลิตร ใน
 สารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือ
 ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุล
 ตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

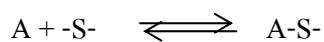
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C]$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล } K = \frac{q}{C} \quad \text{----- (2)}$$

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมา
ของตัวดูดซับ จากตัวดูดซับ

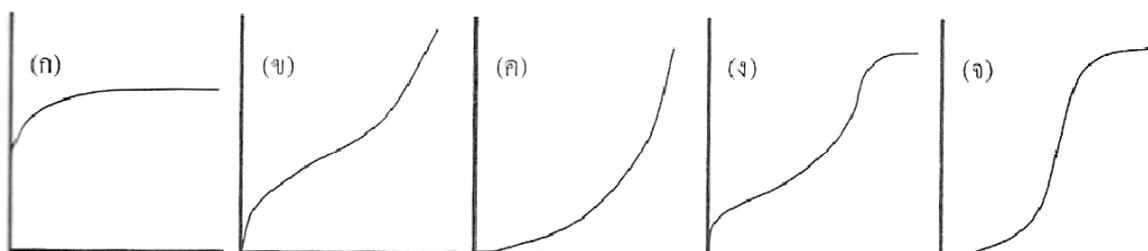
$$qW = V(C_i - C_e)$$

- เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ
หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกละลายต่อมวลตัวดูดซับ เป็น mol/kg, mol/g หรือ mg/kg
- W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg
- V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร
หรือลิตร
- C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย
หน่วยเป็นความเข้มข้น เป็น mol/l
- C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น
เป็น mol/l

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron, S.H. and C.F. Prutton (1961)

จากภาพที่ 10 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบขั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายขั้น

สมการ ไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.7.1 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad \text{-----} \quad (3)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----} \quad (4)$$

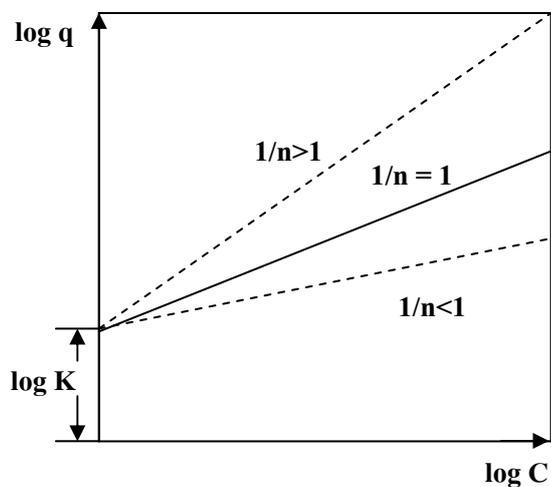
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$



ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

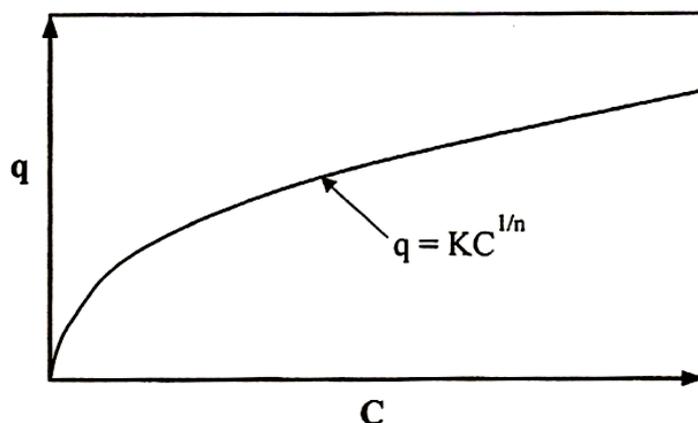
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอรั่มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลักษณะความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

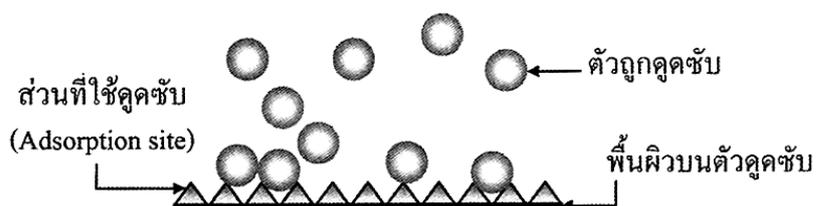
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (3) ได้ดังภาพที่ 12 จะไม่สามารถบอกลักษณะปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

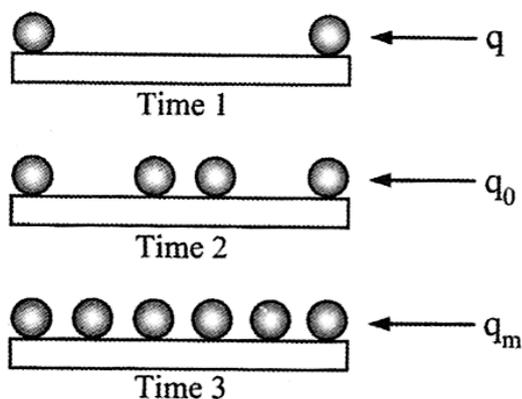
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 14 การดูดซับของแก๊สเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \text{----- (5)}$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \text{----- (6)}$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

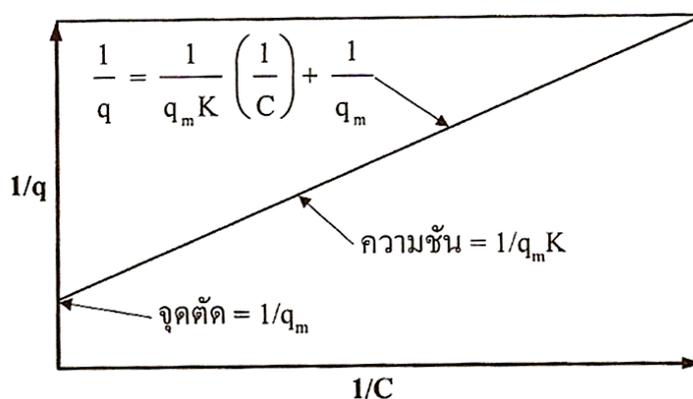
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$

และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

2.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และเอกติเวตดซลิคา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

2.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

2.8.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น จีเลื้อย ไคโตซาน (chitosan) กากแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) เถาแกลบดำ เป็นต้น

2.8.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

3. สลัดจ์น้ำเสียชุมชน (Sewage Sludge)

สลัดจ์น้ำเสียชุมชน เป็นกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสีย โดยกากตะกอนจะมีสมบัติและลักษณะที่แตกต่างออกไปตามขั้นตอน วิธีการและชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งกากตะกอนที่ได้มี 2 ประเภท คือ กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์และกากตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ กากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา เช่น ในระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) บ่อผันสภาพ (oxidation pond) เป็นต้น และกากตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงงานชุบโลหะ เป็นต้น ปริมาณและส่วนประกอบของกากตะกอนที่เกิดขึ้น จะแปรเปลี่ยนตามขนาดของกิจกรรมหลักของแต่ละชุมชน รวมทั้งยังขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเสีย ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ รวมทั้งระดับของการบำบัดน้ำเสียด้วย โดยกากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยส่วนใหญ่มีลักษณะแข็งถึงเหลว สีน้ำตาลถึงดำ ซึ่งยังอยู่ในรูปที่ไม่เสถียร ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งอาจเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ มีแก๊สและความร้อนออกมา เนื่องจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ ซึ่ง อรวรรณ (2532) ได้คำนวณการเกิดกากตะกอนอย่างคร่าวๆ พบว่าโดยเฉลี่ยแล้ว 1 คน สามารถทำให้เกิดตะกอน 60 กรัมกากตะกอนแห้งต่อวัน ดังนั้นในเทศบาลเมืองเพชรบุรีซึ่งมีประชากรประมาณ 44,769 คน (ปี พ.ศ. 2550) (เทศบาลเมืองเพชรบุรี, 2540) น่าจะเกิดตะกอนประมาณ 2,687 กิโลกรัมกากตะกอนแห้งต่อวัน หรือประมาณ 967,320 กิโลกรัมกากตะกอนแห้งต่อปี นับว่าเป็นปริมาณที่มากและถ้าหากประชากรมีจำนวนมาก

ขึ้นแนวโน้มน้ำที่จำนวนกากตะกอนจะเกิดขึ้นก็มากด้วย ซึ่งต่อไปอาจทำให้เกิดปัญหาการขจัดกากตะกอนตามมา

สุจินดา (2542) รายงานว่ากรุงเทพมหานครมีสลัดจ์น้ำเสียได้จากโรงบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร ประมาณ 300 ตัน/วัน หรือ ใน 1 ปี มีปริมาณ 100,000 –150,000 ตัน สลัดจ์น้ำเสียแห้ง ทั้งนี้เป็นการประเมินจากค่าเฉลี่ยว่า ปริมาณการเกิดตะกอนต่อคนต่อวัน มีค่าเท่ากับ 60 กรัม ตะกอนแห้ง

ตะกอนน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์ (ตะกอนสด) ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 โดยตะกอนจะมีลักษณะและสมบัติที่ต่างออกไปจากตะกอนจุลินทรีย์ที่บำบัดแล้ว (ตะกอนย่อย) โดยส่วนประกอบทางเคมีของตะกอนทั้งสองชนิด แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

คุณสมบัติ	ตะกอนสด		ตะกอนย่อย	
	ค่าทั่วไป	เฉลี่ย	ค่าทั่วไป	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS; %)	2-80	5	6-12	10
ของแข็งระเหย (% of TS)	60-80	65	30-60	40
น้ำมันและไขมัน (% of TS)	6-30	-	5-20	-
โปรตีน (% of TS)	20-30	25	5-20	18
ไนโตรเจน (N; % of TS)	1.5-6	4	1.6-6	4
ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅ ; % of TS)	0.8-3	2	1.5-4	2.5
โพแทสเซียม (K ₂ O; % of TS)	0-1	0.4	0-3	1
เซลลูโลส (% of TS)	8-15	10	8-15	10
ซิลิกา (SiO ₂ ; % of TS)	15-20	-	10-20	-
พีเอช (pH)	5-8	6	6.5-7.5	7
ความเป็นด่าง (mg/l as CaCO ₃)	500-1,500	600	2,500-3,500	3,000
กรดอินทรีย์ (mg/l as HAc)	200-2,000	500	100-600	200
ค่าความร้อน (Btu/ปอนด์)	10,000-12,500	1,000	4,000-6,000	5,000

ที่มา: คัดแปลงจาก Metcalf and Eddy (1991)

Sommers (1997) ได้ทำ การศึกษาองค์ประกอบของสลัดจ์น้ำเสียน้ำเสียจำนวน 250 ตัวอย่าง พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์น้ำเสียมีความแตกต่างกัน ตามลักษณะแหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่แตกต่างกัน องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนร้อยละประมาณ 27-37 สารประกอบอนินทรีย์ร้อยละ 1-4 ฟอสฟอรัสร้อยละ 1.1-1.5 โปแตสเซียมร้อยละ 0.08-1.1

นอกจากนี้ Mitchell *et al.* (1978) ได้ศึกษาคุณสมบัติของตะกอนเคมีของน้ำเสีย ประเภท aerobic digested และ anaerobic digested พบว่า aerobic digested มีแก๊สร้อยละ 39.0คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 4.2 ฟอสฟอรัสร้อยละ 1.7 ในขณะที่ anaerobic digested มีแก๊สร้อยละ 0.6-1.3 และฟอสฟอรัสร้อยละ 0.75-1.71

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรรณรณ (2540) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการสกัดไอออนโลหะหนักจากกากตะกอนสลัดจ์ ด้วยแบคทีเรียในกลุ่ม Chemoautotroph สภาวะการทดลองเลือกใช้ที่พีเอช 4 เนื่องจากปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ชัดเจน พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนทองแดงสังกะสี และแคดเมียม คือ 98.04, 63.29, 35.97 และ 15.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เดิมเป็นสารอาหารสำหรับ เชื้อจุลินทรีย์ *T. ferrooxidans* มีผลต่อการสกัดไอออนโลหะหนัก ทั้งในการทดลองที่มีและไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งในการทดลองสกัดไอออนโลหะหนักด้วยเชื้อจุลินทรีย์สรุปได้ว่า พีเอชที่ลดต่ำลง และการเพิ่มขึ้นของเฟอร์ริกไอออน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเฟอร์รัสไอออน ในปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นผลสำคัญในการส่งเสริมการสกัดไอออนโลหะหนัก ขณะที่สภาวะที่ไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าการสกัดไอออนโลหะหนักที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณเฟอร์รัสไอออนมากขึ้น เกิดจากการแลกเปลี่ยนเฟอร์รัสไอออนในสารละลายกับไอออนโลหะหนักบนกากตะกอนสลัดจ์

เฉลิมราช และพรทิพย์ (2543) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับผลของการควบคุมอายุสลัดจ์ของการดำเนินงานระบบ activated sludge ต่อความสามารถของสลัดจ์ในการดูดซับโครเมียม โดยในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองกระบวนการ AS โดยใช้น้ำเสียวัดเคราะห์ที่มีความเข้มข้น COD 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าค่า maxSCUR (maximum specific COD uptake rate, maxSCUR) ของสลัดจ์ที่มีอายุสลัดจ์มากขึ้นจะมีค่าลดลง โดยการทดลองที่อายุสลัดจ์ 3 8 15 และ 24 วัน มี maxSCUR เท่ากับ 0.0103 0.009 0.007 และ 0.0057 นาที่⁻¹ ตามลำดับ และในแต่ละอายุสลัดจ์เมื่อเพิ่มโครเมียมค่า maxSCUR จะลดลง โดยที่ถ้าอายุสลัดจ์มากขึ้น ค่า maxSCUR จะลดลงน้อยกว่าซึ่ง

แสดงได้จากค่าคงที่การต้านทานการยับยั้ง K_1 ในการยับยั้งแบบไม่แข่งขัน (non competitive inhibition) เท่ากับ 78.8 76.4 109.2 138.5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อสลัดจ์มีอายุ 3 8 15 และ 24 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับโครเมียมโดยสลัดจ์ AS จะเข้าสู่สมดุลในเวลาสั้นน้อยกว่า 5 นาที และเมื่อใช้ Freundlich adsorption isotherm มาพิจารณาพบว่า ที่อายุสลัดจ์ 3 8 15 และ 24 วัน จะมีประสิทธิภาพการดูดซับ (Adsorbent capacity, K_p) เท่ากับ 1.6×10^{-4} 2.8×10^{-4} 3.7×10^{-4} และ 7.8×10^{-4} ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ อันหมายถึงสลัดจ์ที่มีอายุสลัดจ์มากกว่าในปริมาณเท่ากัน สามารถดูดซับโครเมียมได้มาก

กษิข(2547) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในดิน โดยการนำตัวอย่างดินตะกอนทรายจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง พบว่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในดินตัวอย่าง โดยที่พีเอช 4 มีการดูดซับได้สูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 โดยไม่ขึ้นกับค่าความแรงไอออน และการเพิ่มค่าความแรงไอออนนั้น มีผลต่อการดูดซับของ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมเฉพาะที่พีเอชที่ 7 โดยจะทำให้ดูดซับได้มากขึ้น และพบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ศิริพร (2547) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในดินตะกอนแม่น้ำบางปะกง พบว่า เวลาสมดุลในการดูดซับสาร PAHs ของดินตะกอน คือ 2 ชั่วโมง และยังพบว่าที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่ดินตะกอนดูดซับได้ดีที่สุด

อุไรวัลย์ (2547) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับฟีนอลโดยใช้ชีวมวลสาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*) ที่พบมากบริเวณแหลมตาชี อำเภอบ้านนา โดยตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายผักกาด และศึกษาระยะเวลาการดูดซับ ผลของพีเอชและปริมาณของสาหร่ายต่อความสามารถดูดซับฟีนอลโดยสาหร่ายผักกาดแบบกะ พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างสาหร่าย คือ ความชื้น ๕๕.๕% ใย ๒.๓% ไนโตรเจน และ โปรตีน มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 93.4, 21.7, 53.5, 2.30, 0.90 และ 6.10 ตามลำดับ ตรวจไม่พบสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างสาหร่าย และพบว่าตัวอย่างสาหร่ายดูดซับฟีนอลได้ดีในเวลา 180 นาที พีเอชมีผลต่อความสามารถดูดซับฟีนอลโดยตัวอย่างสาหร่าย โดยการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2.0-4.0 และเริ่มคงที่ ในช่วงพีเอช 5.0-8.0 การดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 0.5-3.0 กรัม/ลิตร กลไกการดูดซับฟีนอล

เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช โดยตัวอย่างสาหร่ายฝักกาด มีความสามารถดูดซับฟีนอลสูงสุด ตามแบบจำลองของแลงเมียร์ (Q_m) และฟรุนดิช (K) เท่ากับ 10.2 และ 0.2 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

ชยกาศ (2548) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับความสามารถในการกำจัดไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับในการทดลองนี้มี 3 ชนิด โดย 2 ชนิดแรก คือ activated sludge (AS-P) และ methane upflow reactor (MUR-P) ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ cyclic activated sludge System (CASS-N) ได้จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร จากการทดลองพบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีสูงถึงร้อยละ 97-99 ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) มาใช้ทำนายผลการทดลอง พบว่า สมการไอโซเทอร์มการดูดซับทั้งของแลงเมียร์และฟรุนดิชสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า K_f ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 214, 184 และ 205 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ

สุวัจน์ และภาณุ (2548) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการปรับโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยทำให้อย่าง STR5L มีสภาพความเป็นขั้วมากขึ้นด้วยการทำปฏิกิริยา Graft Copolymerization กับ Maleic Anhydride (MA) ปริมาณต่างๆ กันคือ 3, 6 และ 9 phr จากนั้นได้ทดลองปรับสภาพผิวด้วยการแช่ในกรดไนตริก ซึ่งเคยมีรายงานว่าช่วยให้อย่างสามารถดูดซับฟีนอลได้มากยิ่งขึ้น จากการทดลองพบว่าอย่างที่มีปริมาณการ Graft เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก MA เป็นสารที่มีขั้ว เมื่อ Graft อยู่บนยางที่ไม่มีขั้วแล้วทำให้มีความสามารถดูดซับฟีนอล ซึ่งมีขั้วได้เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของ MA แต่การเพิ่มขึ้นจำกัดอยู่เพียงที่ MA 6 phr เมื่อใช้ MA มากขึ้นผลกลับลดลง

ชนิษฐา (2550) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัส ผลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ และสารละลายที่เหมาะสมในการ

ชะล้างสีข้อมออกจากตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตกับตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตมีความแตกต่างกัน ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตมีความสามารถในการดูดซับสีได้สูงกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว และยังพบอีกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสีพระยา มีความสามารถในการดูดซับสีได้มากกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานฟอกย้อม สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสีพระยาจะใช้ระยะเวลาสัมผัส 6 ชั่วโมง ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานฟอกย้อมใช้ระยะเวลาสัมผัสเพียง 3 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดเท่ากับ 6.12 มิลลิกรัมต่อกรัม-เซลล์ โดยที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตเท่ากับ 7 ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตจะพบว่าที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง และร้อยละ 0.1 SDS มีประสิทธิภาพในการชะล้างตะกอนได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์ พบว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตจะแสดงความสามารถในการดูดซับสีสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

- 1.1 pH meter รุ่น 315
- 1.2 เครื่องเขย่า (shaker) Model VRN-480 GEMMY Orbit Shaker
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น AB 204-S
- 1.4 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman
- 1.5 ตะแกรงแยกขนาด
- 1.6 เครื่องแก้ว
- 1.7 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 20 D
- 1.8 เดสซิเคเตอร์

2. สารเคมี

- 2.1 แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
- 2.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
- 2.3 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-AAP)
- 2.4 โพแตสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)

2.5 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

2.6 ฟีนอลมาตรฐาน (C_6H_5OH)

2.7 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย มี 2 แหล่ง คือ

2.7.1 โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

2.7.2 โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

วิธีการ

1. การเตรียมสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย

1.1 นำสลัดจ์ที่ได้จากบ่อบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 แหล่ง มาผึ่งในที่ร่มไม่ให้โดนแสงแดด เมื่อสลัดจ์แห้ง จึงนำมาบดด้วยโกร่งบดยา หลังจากนั้นนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 425 ไมครอน ดังภาพที่ 16 และ 17 เก็บผงสลัดจ์ที่ผ่านการร่อนไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งต่อไป



ภาพที่ 16 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีที่ผ่านการบดให้เป็นผงขนาด 425 ไมครอน



ภาพที่ 17 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีที่ผ่านการบดให้เป็นผงขนาด 425 ไมครอน

1.2 ทำการวัดค่าฟิโอสเรียมเริ่มต้นของสลัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง โดยชั่งสลัดจ์แห้ง ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าฟิโอสเรียมของสารละลาย พบว่าค่าฟิโอสเรียมของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรี มีค่าเท่ากับ 6.6 และ 7.2 ตามลำดับ

2. การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล (วิธี Method 9065 Spectrophotometric, Manual 4-AAP with Distillation)

2.1 การเตรียมสารละลาย

2.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

ชั่งฟีนอลจำนวน 0.0025 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไปพอประมาณ เขย่าให้ฟีนอลละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.1.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์จำนวน 16.9 กรัมเติมลงไปละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จำนวน 143 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายลงในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตรเขย่าให้เข้ากันแล้วปิดจุกจะได้สารละลายที่ต้องการ

2.1.3 การเตรียมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน

ชั่ง 4-อะมิโนแอนติไพรีน จำนวน 2.0 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.1.4 การเตรียมสารละลายโพแตสเซียมเพอร์ไอชยานินด์

ชั่งโพแตสเซียมเพอร์ไอชยานินด์ จำนวน 8.0 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟีนอลซ้มน้ำ 10 มิลลิกรัมลิตร ที่เตรียมไว้จำนวน 10, 30, 50, 70 และ 90 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวดแล้วปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน และสารละลายโพแตสเซียมเพอร์ไอชยานินด์ ที่เตรียมไว้ อย่างละ 2 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในสารละลายฟีนอลทั้ง 5 ขวด เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก (สารละลายในแต่ละขวดจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 1, 3, 5, 7, 9 มิลลิกรัมลิตร ตามลำดับ)

2.3 ตั้งสารละลายที่ได้ในข้อ 2.2 ไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

2.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 2.3 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 20 D ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นเบลมงค์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น 510 นาโนเมตรในแกนตั้ง และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลในแกนนอน จะได้กราฟมาตรฐานที่มีค่าสภาพดูดกลืนโมลาร์ (ϵ) เท่ากับ $1.4057 \times 10^4 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งฟีนอลจำนวน 0.05 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไปพอประมาณ เขย่าให้ฟีนอลละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

4. การดำเนินการทดลอง

4.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของสไลด์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสไลด์แห้งละ 3 ซ้ำ (สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยชั่งผงสไลด์ ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงสไลด์ที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของสไลด์ในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสไลด์แห้งละ 3 ซ้ำ (สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยชั่งผงสไลด์ ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที เมื่อครบตามเวลาแล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงสไลด์ที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของ สลัดจ์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์แห้งละ 3 ชั่ว (สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยชั่งผงสลัดจ์ ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการ ทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจาก การทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที หลังจากนั้น กรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.4 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นฟีนอลต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำ การทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์แห้งละ 3 ชั่ว (สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการ แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยชั่งผงสลัดจ์ ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความ เข้มข้น 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วย เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้ ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.3 หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูด ซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไป หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลาย มาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์แห้งละ 3 ชั่ว (สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยชั่งผงสลัดจ์ ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อสารละลาย มาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพ การกำจัดสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3 หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงสลัดจ์ที่ดูดซับฟินอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟินอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟินอลจากสารละลายมาตรฐานฟินอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ตัวอย่างของสลัดจ์แห้งละ 3 กรัม (สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี)

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟินอลที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองในข้อ 4.1 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรี ปริมาณ 20 และ 10 กรัม ตามลำดับ และเก็บสารละลายมาตรฐานฟินอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟินอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำสลัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง ที่ผ่านการใช้งานแล้วจากคอลัมน์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ผึ่งในที่ร่มให้แห้ง หลังจากนั้นนำสลัดจ์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพปริมาณ 1 กรัม ทั้ง 2 แหล่ง มาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับฟินอลจากสารละลายมาตรฐานฟินอลเปรียบเทียบกับสลัดจ์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสลัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง ที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟินอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F โดยใช้ตัวอย่างของสลัดจ์แหล่งละ 3 ซ้ำ

เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษทั้ง 6 แห่งนี้ มีสถานะที่แตกต่างจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองแบบแบทช์ ดังตารางภาคผนวกที่ 19 แต่การศึกษานี้ทำการทดลองดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์

นำน้ำเสียจากโรงงานกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F มาตรวจวัดคุณภาพน้ำและหาปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยรายงานในรูปของปริมาณฟีนอลเริ่มต้นก่อน จากนั้นศึกษาหาปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษดังกล่าว ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 มิลลิกรัม/ลิตร (ซึ่งใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่พบในน้ำเสียจริง) หลังจากนั้นนำน้ำเสียมาทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ ของสลัดจ์แต่ละแหล่ง แล้วนำไปวิเคราะห์หาฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับด้วยวิธี 4-AAP

5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2550 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2551

ผลและวิจารณ์

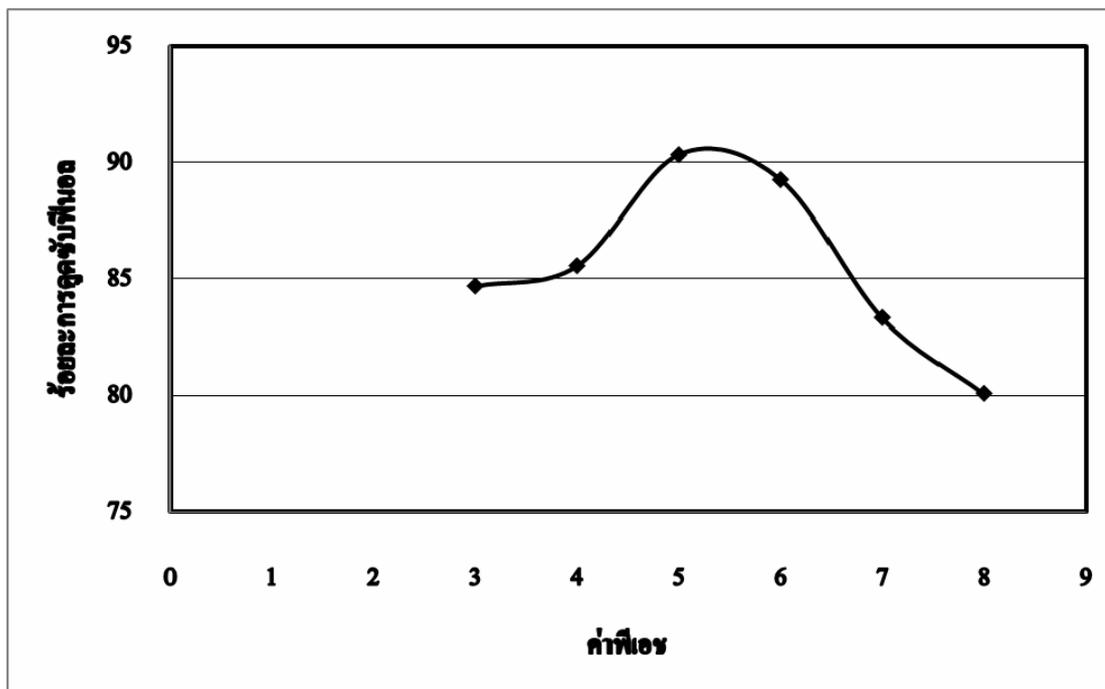
การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นฟีนอล ปริมาณสลิคค์ และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้สมการ ฟรุนดิช และแลงเมียร์ การทดลองการดูดซับโดยผ่านคอลัมน์ และการฟื้นฟูสภาพสลิคค์หลังผ่านการใช้งาน รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. อิทธิพลพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของสลิคค์ทั้ง 2 แหล่ง

1.1 สลิคค์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทดลองที่พีเอชระดับต่างๆ 6 ค่า ได้แก่ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ใช้ปริมาณสลิคค์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยสลิคค์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 90.36 ที่พีเอช 5 และเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่ 6, 7 และ 8 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 89.28, 83.34 และ 80.08 ตามลำดับ ดังนั้น พีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสลิคค์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี คือมีค่าเท่ากับ 5 ดังภาพที่ 18 และตารางที่ 4



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอสเฟตของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอสเฟตของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับฟอสเฟตของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
3	84.70
4	85.58
5	90.36
6	89.28
7	83.34
8	80.08

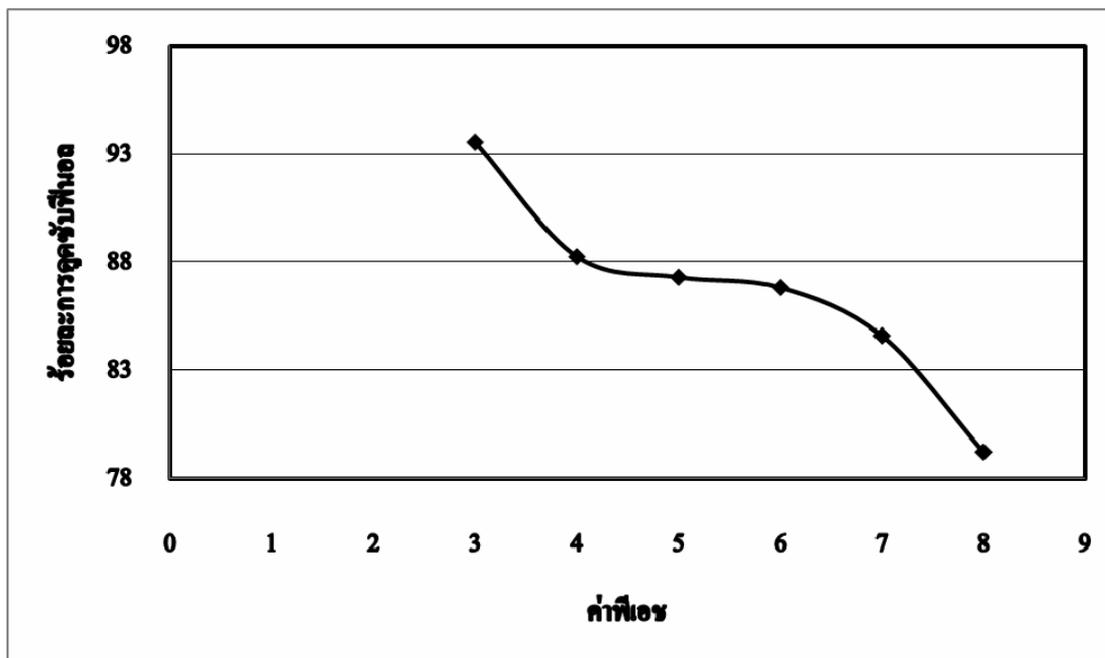
ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตจากสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตสามารถอธิบายได้ ดังนี้ ในสภาวะกรดช่วงพีเอช 3-6 ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลายจะ

เข้าจับกับประจุลบของผิวสตัคด้วยแรงเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (electrostatic attractions) ทำให้บริเวณพื้นผิวของอนุภาคสตัคกลายเป็นประจุบวก สามารถจับกับฟีนอลซึ่งมีประจุลบได้ และเมื่อพิจารณาในสภาวะเบส ประจุลบของสตัคจะผลัดกับประจุลบของฟีนอล อีกทั้งฟีนอลเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว และมีประจุ จึงสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลลดลง

1.2 สตัคจากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทดลองที่พีเอชระดับต่างๆ ซึ่งพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการทดลองมี 6 ค่า ได้แก่ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ใช้ปริมาณสตัค 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยสตัคจากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 93.58 ที่พีเอช 3 และเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่ 4, 5, 6, 7 และ 8 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 88.28, 87.32, 86.84, 84.62 และ 79.24 ตามลำดับ ดังนั้น พีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสตัคจากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี คือ มีค่าเท่ากับ 3 ดังภาพที่ 19 และตารางที่ 5



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดักจับฟิชของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าฟิช

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดักจับฟิชของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าฟิช

ค่าฟิช	ร้อยละการดักจับฟิชของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
3	93.58
4	88.28
5	87.32
6	86.84
7	84.62
8	79.24

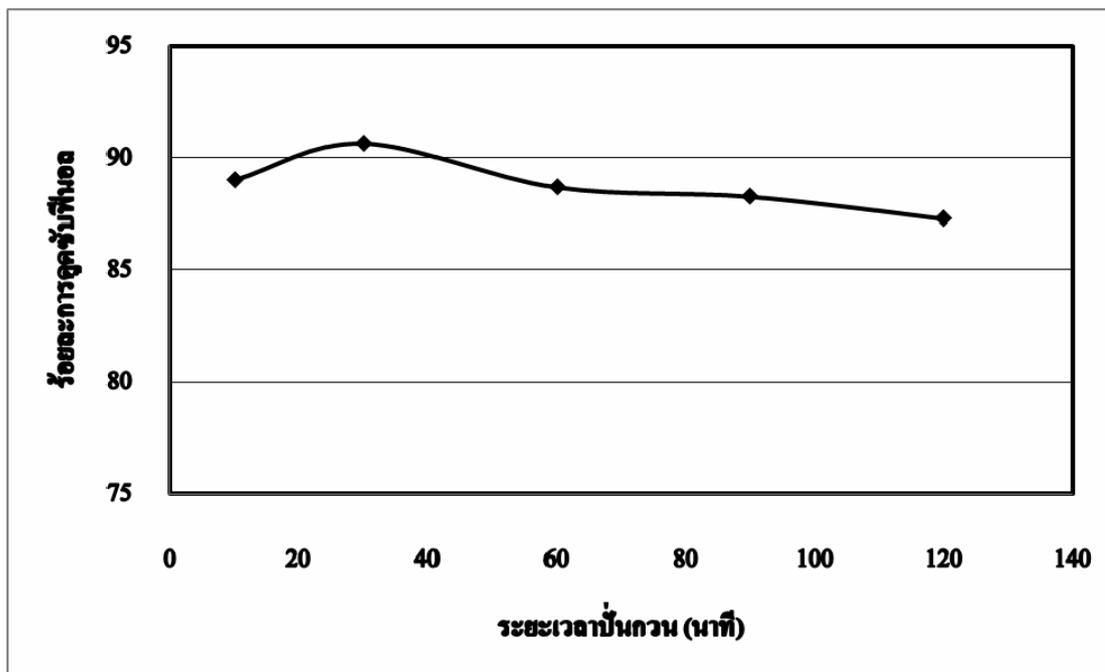
ผลของค่าฟิชต่อประสิทธิภาพในการดักจับฟิชจากสารละลายมาตรฐานฟิชสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับสลัดจ์จากเพชรบุรี

2. อิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของสไลด์ทั้ง 2 แห่ง

2.1 สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 5 ใช้ปริมาณสไลด์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ทำการทดลองปรับระยะเวลาปั่นกวนตามเวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาปั่นกวน โดยที่ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 90.66 และเมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลงคือร้อยละ 88.70, 88.28, และ 87.30 ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี คือ 30 นาที ดังภาพที่ 20 และตารางที่ 6



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาที่น้ำท่วม

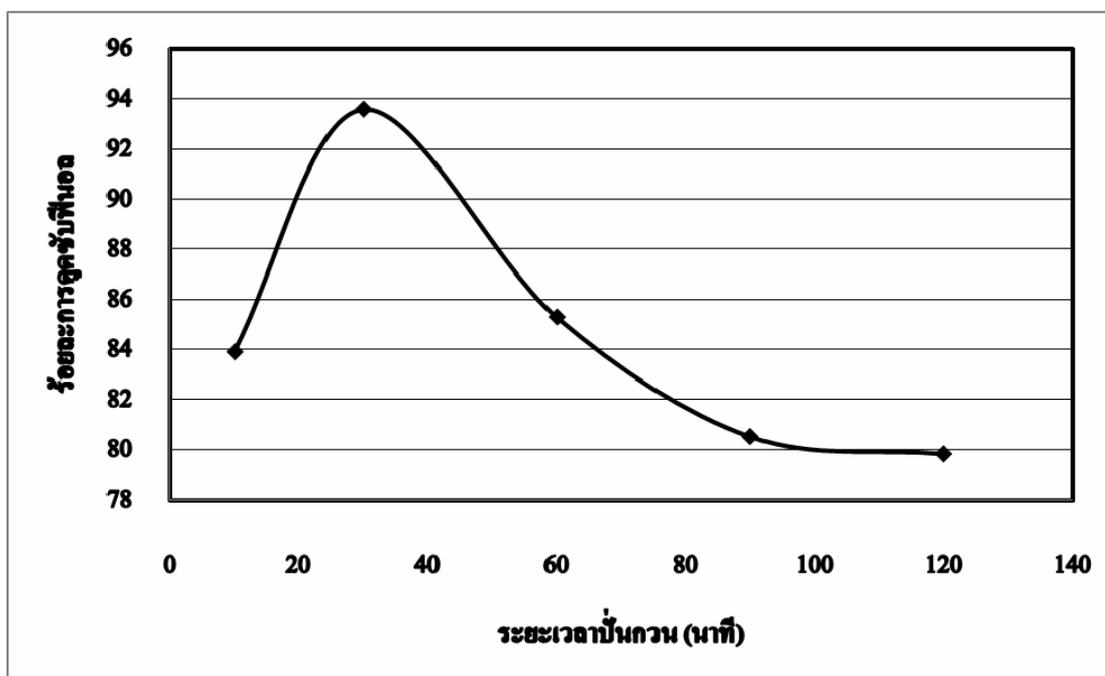
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาที่น้ำท่วม

ระยะเวลาที่น้ำท่วม (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
10	89.02
30	90.66
60	88.70
90	88.28
120	87.30

2.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 3 ใช้ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ทำการทดลองปรับระยะเวลาปั่นกวตามเวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาปั่นกว โดยที่ระยะเวลาปั่นกว 30 นาที สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 93.62 และเมื่อระยะเวลาปั่นกวเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 85.32, 80.54 และ 79.84 ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาปั่นกวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี คือ 30 นาที ดังภาพที่ 21 และตารางที่ 7



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาปั่นกว

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาปั่นกววน

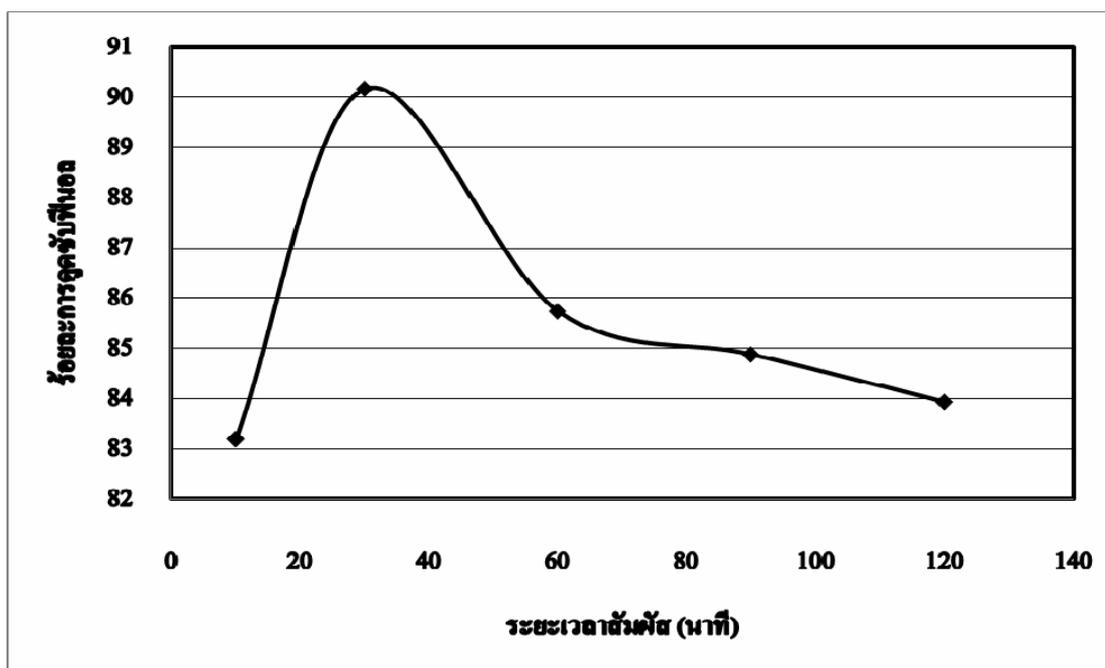
ระยะเวลาปั่นกววน (นาท)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
10	83.92
30	93.62
60	85.32
90	80.54
120	79.84

3. อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสลัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง

3.1 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 5 ใช้ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ทำการทดลองปรับระยะเวลาสัมผัส โดยตั้งทิ้งไว้แล้วเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 90.16 และเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 85.74, 84.88 และ 83.94 ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี คือ มีค่าเท่ากับ 30 นาที ดังภาพที่ 22 และตารางที่ 8



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมผัสนาที

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมผัสนาที

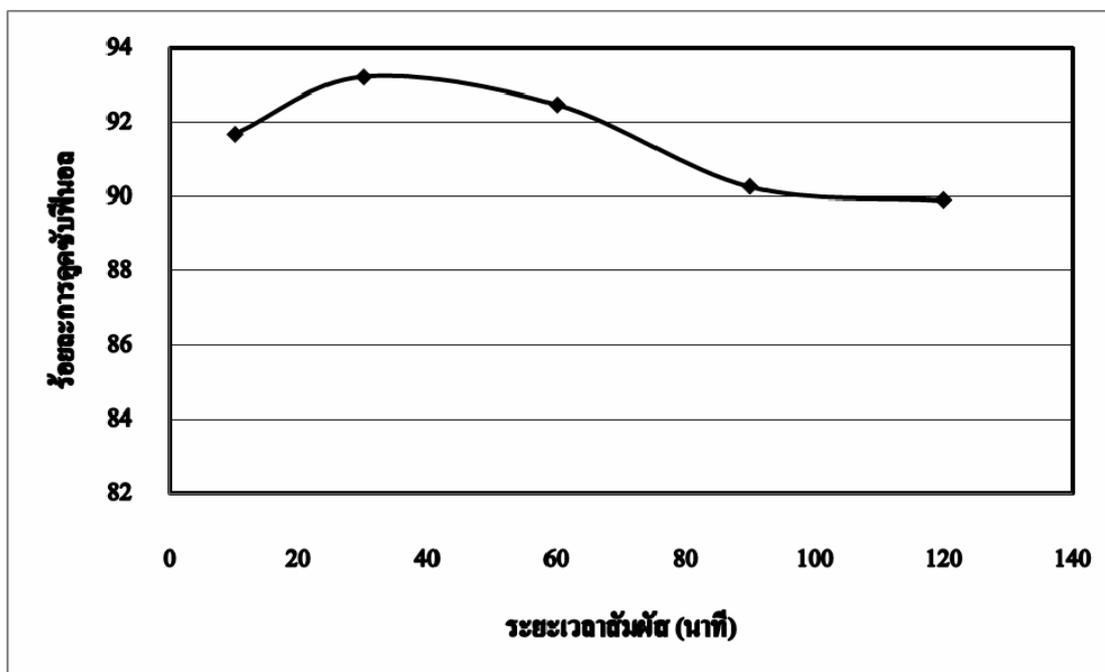
ระยะเวลาสัมผัสนาที	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
10	83.20
30	90.16
60	85.74
90	84.88
120	83.94

ผลของระยะเวลาสัมผัสนาทีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาจนกระทั่ง 30 นาที ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และภายหลัง 30 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงและเกือบคงที่

3.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 3 ใช้ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ทำการทดลองปรับระยะเวลาสัมผัสโดยตั้งทิ้งไว้แล้วเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงสุดที่ร้อยละ 93.22 และเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 92.48, 90.26 และ 89.90 ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี คือ มีค่าเท่ากับ 30 นาที ดังภาพที่ 23 และตารางที่ 9



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมผัส

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการ
แหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
10	91.68
30	93.22
60	92.48
90	90.26
120	89.90

ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาขึ้นจนกระทั่ง 30 นาที ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และภายหลัง 30 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงและเกือบคงที่

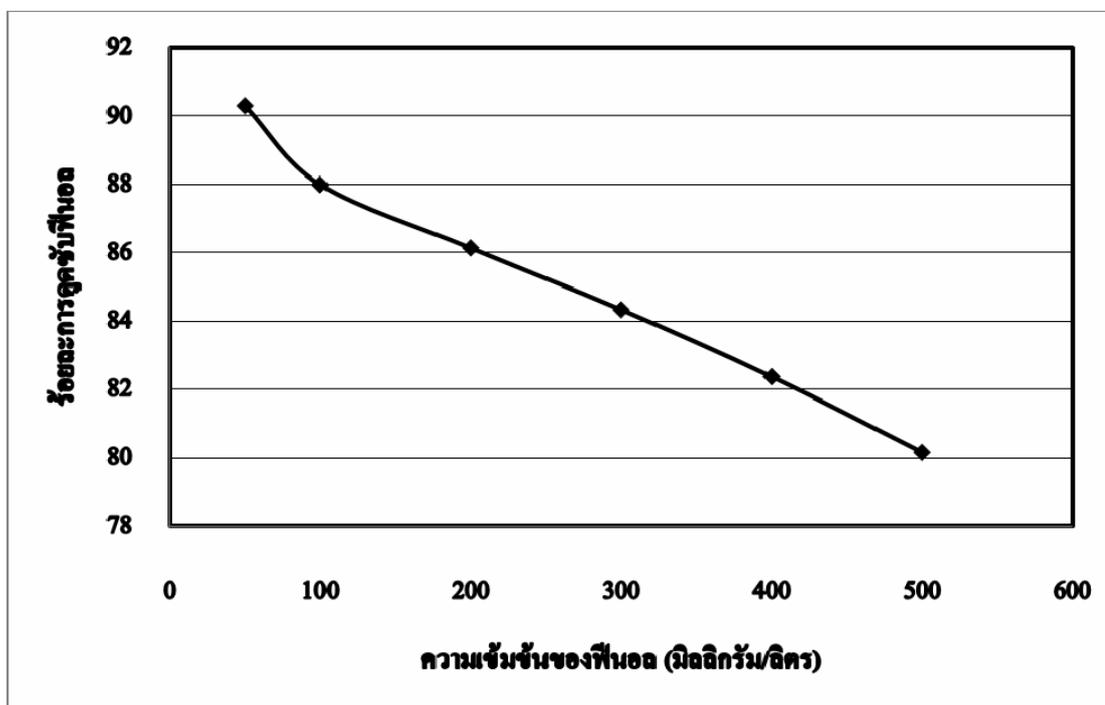
4. อิทธิพลความเข้มข้นของฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลต่อการดูดซับของสไลด์ทั้ง 2 แหล่ง

4.1 สไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 5 ใช้ปริมาตรสไลด์ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลลดลง เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสไลด์ มีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 90.32 สำหรับที่ความเข้มข้นอื่นๆ ได้แก่ 100, 200, 300, 400 และ 500

มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสไลด์จะมามีค่าลดลง คือ ร้อยละ 88.01, 86.15, 84.35, 82.38 และ 80.17 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24 และตารางที่ 10



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล

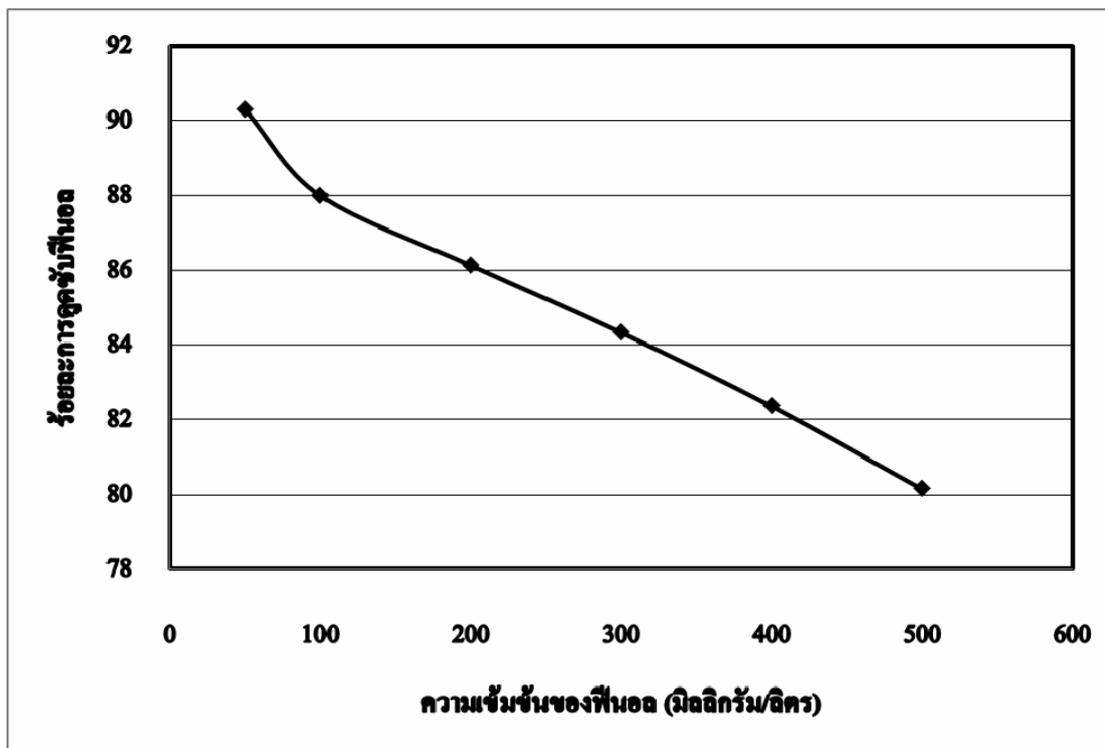
ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
50	90.32
100	88.01
200	86.15
300	84.35
400	82.38
500	80.17

ผลของความเข้มข้นฟีนอลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล พบว่า เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น สลัดจ์มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจาก สมบัติเฉพาะตัวของฟีนอลที่มีฤทธิ์ในการกักร่อนและฆ่าเชื้อ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์ลดลง

4.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วปรับพีเอช เท่ากับ 3 ใช้ปริมาณสลัดจ์ 1 กรัม นำไปเขย่า ที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลลดลง เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น เท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสลัดจ์ มีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 93.30 สำหรับที่ความเข้มข้นอื่นๆ ได้แก่ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสลัดจ์จะมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 92.10, 90.40, 88.22, 87.10 และ 86.16 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 และตารางที่ 11



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอสฟอรัสของสัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอสฟอรัสของสัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอสฟอรัสของสัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
50	93.30
100	92.10
200	90.40
300	88.22
400	87.10
500	86.16

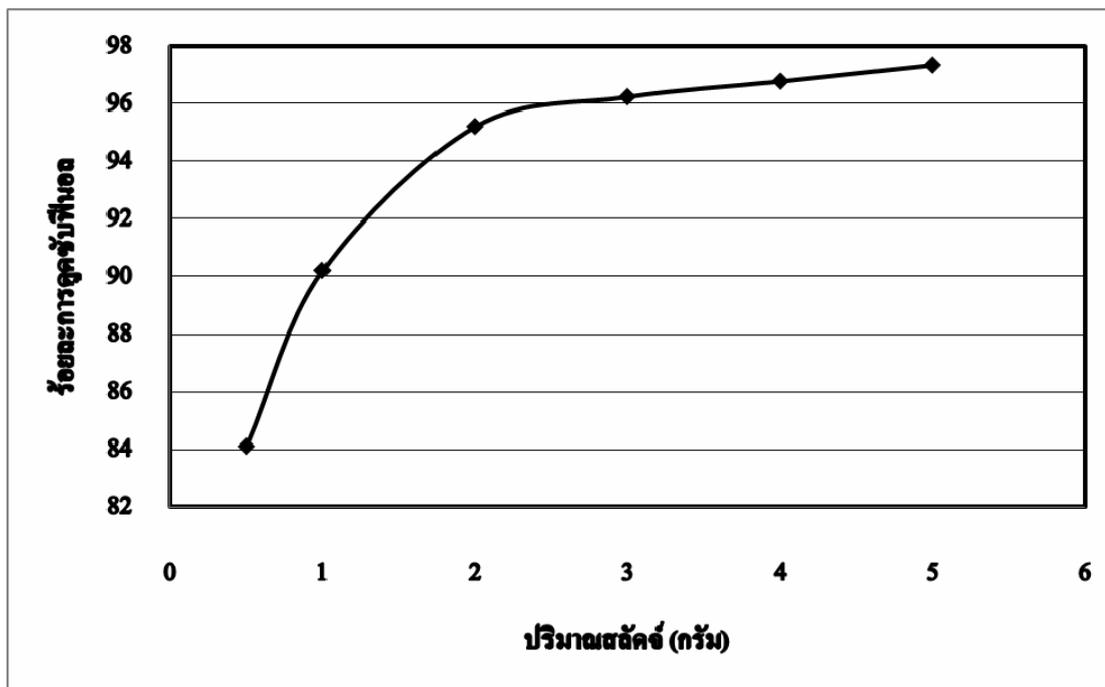
ผลของความเข้มข้นฟีนอลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลเหมือนกับสลัดจ์จากเพชรบุรี

5. อิทธิพลของปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสม และไอโซเทอร์มในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสลัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง

5.1 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 5 โดยใช้ปริมาณสลัดจ์แตกต่างกัน ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณสลัดจ์ที่ 5 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 97.32 สำหรับสลัดจ์ที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ ร้อยละ 84.10, 90.20, 95.20, 96.22 และ 96.76 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 และตารางที่ 12



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสัลดจ์

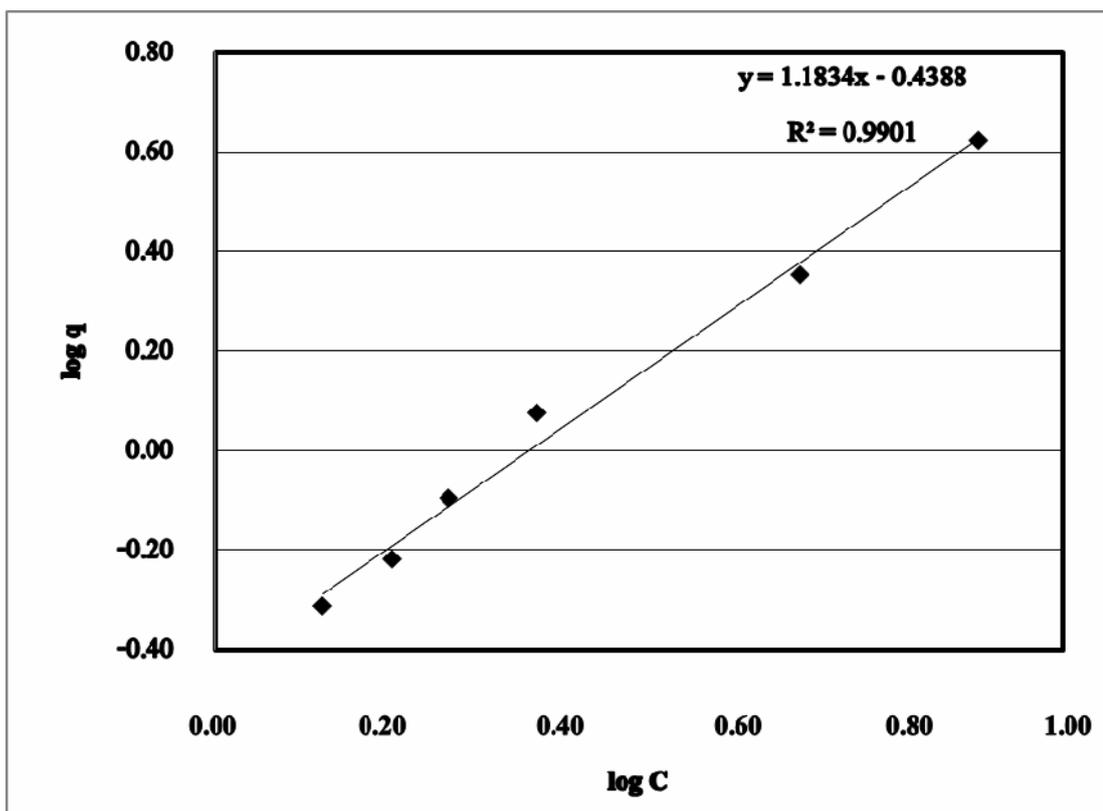
ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสัลดจ์

ปริมาณสัลดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
0.5	84.10
1.0	90.20
2.0	95.20
3.0	96.22
4.0	96.76
5.0	97.32

ผลของปริมาณสัลดจ์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองพบว่าปริมาณสัลดจ์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพใน

การดูดซับฟีนอลน้อยที่สุด เมื่อใช้ปริมาณสัจจ 0.5 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นกับขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสัจจมีขนาดเท่ากัน ปริมาณสัจจที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณสัจจมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1 กรัม

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี เมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของฟรุนดิช และแลงเมียร์ ดังภาพที่ 27 และ 28 ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลทั้ง 2 แบบของสัจจจากเพชรบุรี มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.9901 และ 0.9793 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) ดังนั้นการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสัจจจากเพชรบุรีจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดิชและแลงเมียร์ แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดิชมากกว่าแลงเมียร์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากลไกการดูดซับจะสอดคล้องตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชมากกว่าแลงเมียร์ ซึ่งกลไกการดูดซับของฟรุนดิช คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น ตัวถูกดูดซับสามารถจัดเรียงตัวได้หลายชั้นบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ และเนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับนี้เอง จึงไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับได้และพบว่าปริมาณสัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสียโครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี 1 กรัมสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ 45.20 มิลลิกรัม



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิชโดยใช้สตัดจ์จากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึม ได้ดังสมการที่ 7

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{----- (7)}$$

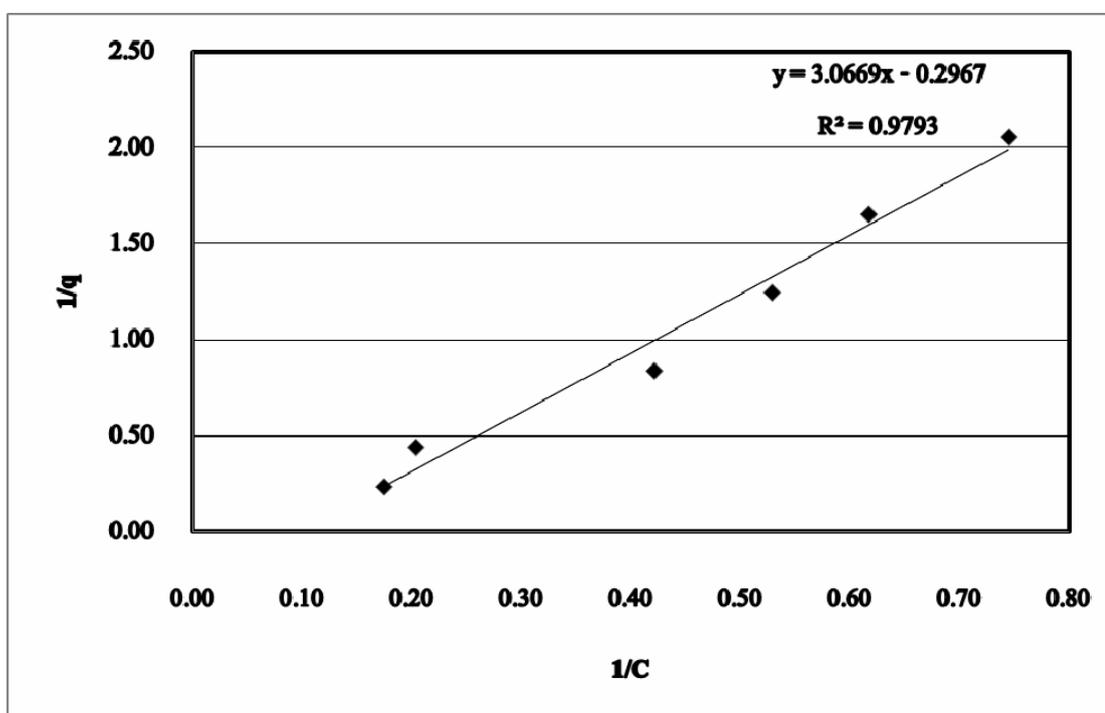
แทนค่าที่ได้จากกราฟสำหรับสตัดจ์จากเพชรบุรีลงในสมการที่ (7) จะได้

$$\log q = -0.4388 + 1.1834 \log C \quad \text{----- (8)}$$

จากสมการที่ 8 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.1834 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -0.4388 นั่นคือ

$$\begin{aligned}\log K &= -0.4388 \\ 1/n &= 1.1834 \\ n &= 0.8450\end{aligned}$$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของฟรุนดลิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับไว้ได้มาก หรือกล่าวว่าเป็นบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่าฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นที่ผิวของสัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้สัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$
สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 9

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (9)}$$

แทนค่าที่ได้จากกราฟสำหรับสลัดจ์จากเพชรบุรีลงในสมการที่ (9) จะได้

$$\frac{1}{q} = 3.0669 \frac{1}{C} - 0.2967 \quad \text{----- (10)}$$

จากสมการที่ 10 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 3.0669 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -0.2967 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 3.0669$$

$$\frac{1}{q_m} = -0.2967$$

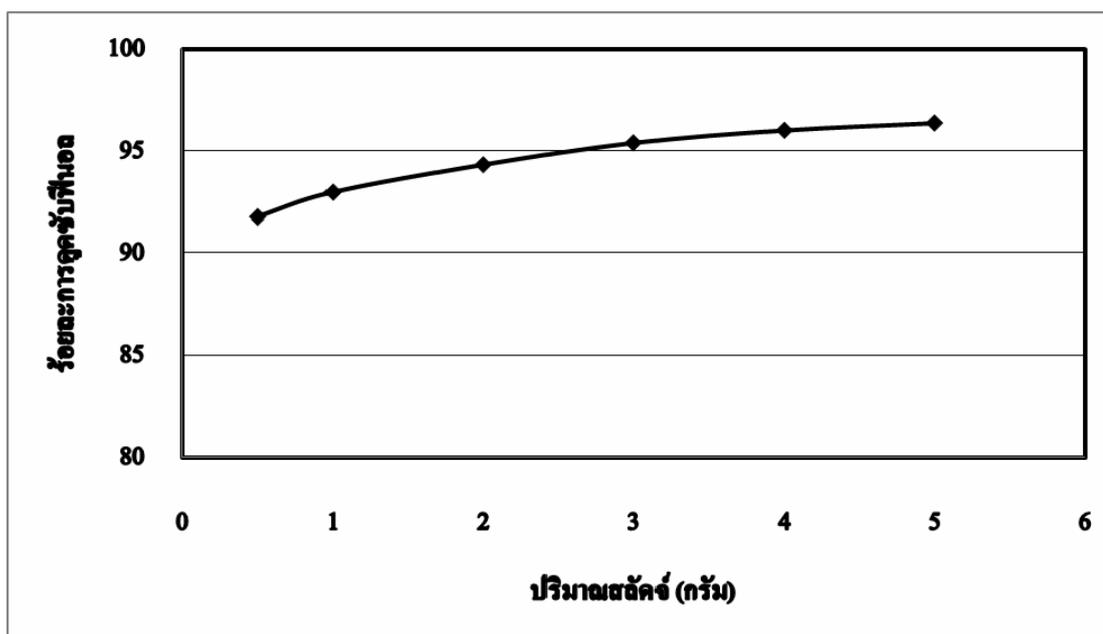
$$\text{ดังนั้น} \quad K = -0.0967$$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟีนอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

5.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 3 โดยใช้ปริมาณสลัดจ์แตกต่างกัน ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปเขย่าที่ ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลอง เป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่า เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณสลัดจ์ที่ 5 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจาก สารละลายมาตรฐานฟีนอลได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.40 สำหรับสลัดจ์ที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ ร้อยละ 91.78, 92.98, 94.34, 95.42 และ 96.04 ตามลำดับ ดังภาพที่ 29 และตารางที่ 13



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสัลดจ์

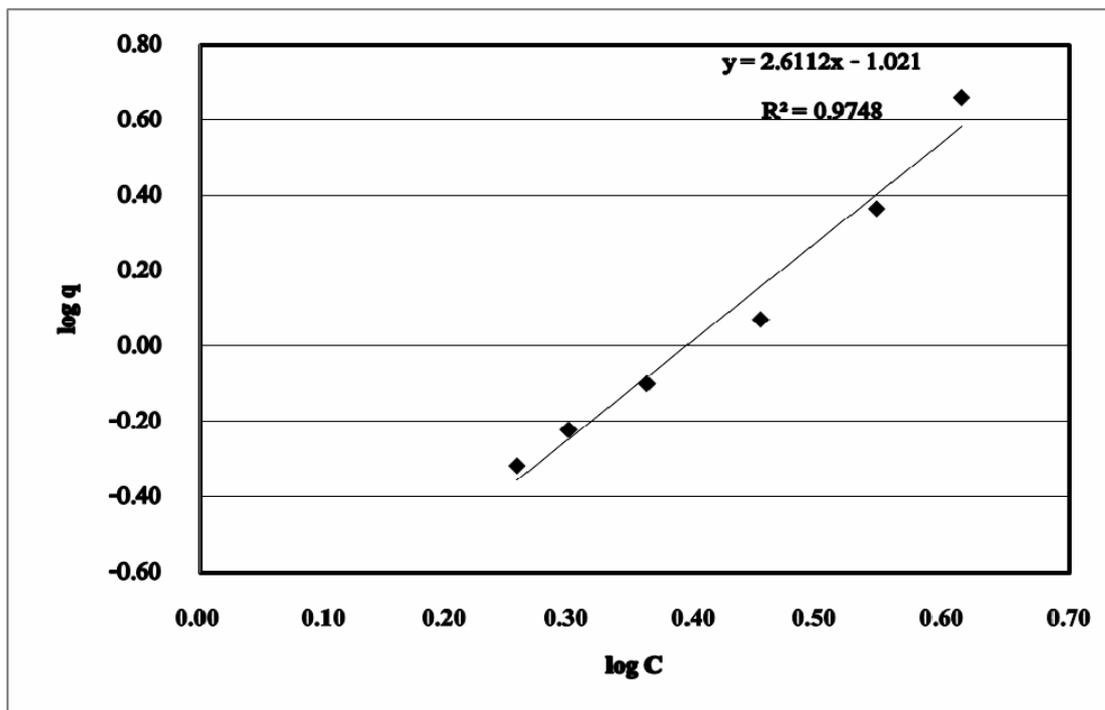
ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสัลดจ์

ปริมาณสัลดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัลดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
0.5	91.78
1.0	92.98
2.0	94.34
3.0	95.42
4.0	96.04
5.0	96.40

ผลของปริมาณสัลดจ์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองพบว่าปริมาณสัลดจ์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลน้อยที่สุด เมื่อใช้ปริมาณสัลดจ์ 0.5 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นกับ

ขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสัจมีขนาดเท่ากัน ปริมาณสัจที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณสัจมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1 กรัม

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสัจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี เมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ดังภาพที่ 30 และ 31 ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลทั้ง 2 แบบของสัจจากสุพรรณบุรี มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 0.9748 และ 0.9957 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) ดังนั้นการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสัจจากสุพรรณบุรีจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากลไกการดูดซับจะสอดคล้องตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัวและพบว่าปริมาณสัจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี 1 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ 46.40 มิลลิกรัม



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิชโดยใช้สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 11

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{----- (11)}$$

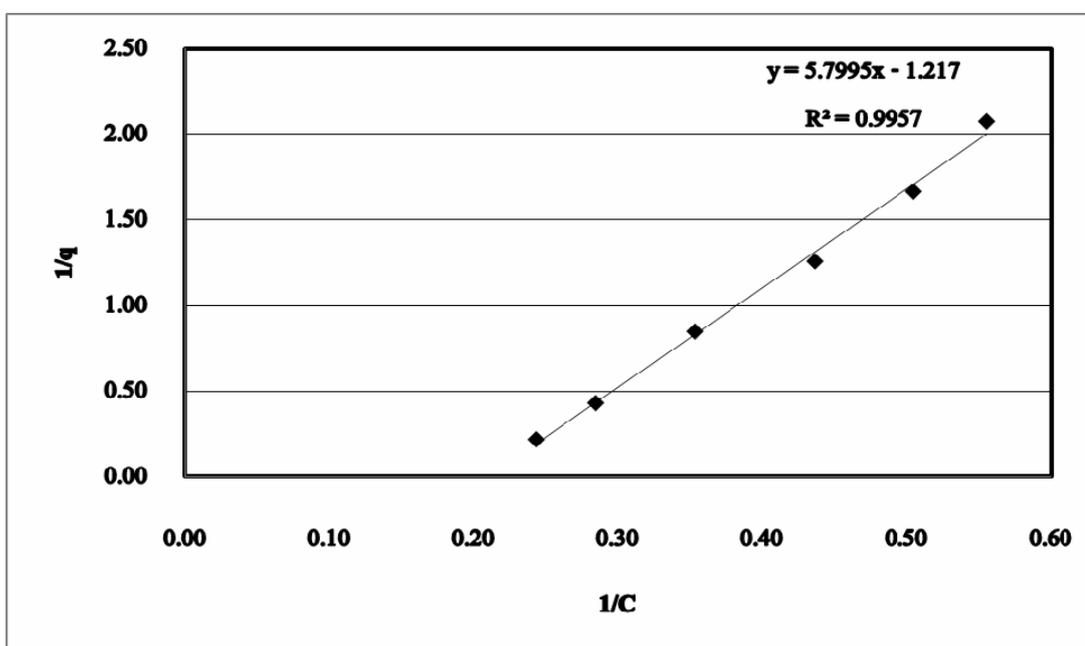
แทนค่าที่ได้จากกราฟสำหรับสลัดจ์จากสุพรรณบุรีลงในสมการที่ (11) จะได้

$$\log q = -1.0210 + 2.6112 \log C \quad \text{----- (12)}$$

จากสมการที่ 12 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 2.6112 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -1.0210 นั่นคือ

$$\begin{aligned}\log K &= -1.0210 \\ 1/n &= 2.6112 \\ n &= 0.3830\end{aligned}$$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของฟรุนดลิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับไว้ได้มาก หรือกล่าวว่าเป็นบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่าฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของสัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี



ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้สัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$
สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 13

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (13)}$$

แทนค่าที่ได้จากกราฟสำหรับสัจจจากสุพรรณบุรีลงในสมการที่ (13) จะได้

$$\frac{1}{q} = 5.7995 \frac{1}{C} - 1.2170 \quad \text{----- (14)}$$

จากสมการที่ 14 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 5.7995 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -1.2170 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 5.7995$$

$$\frac{1}{q_m} = -1.2170$$

$$\text{ดังนั้น} \quad K = -0.2098$$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟินอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของสัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

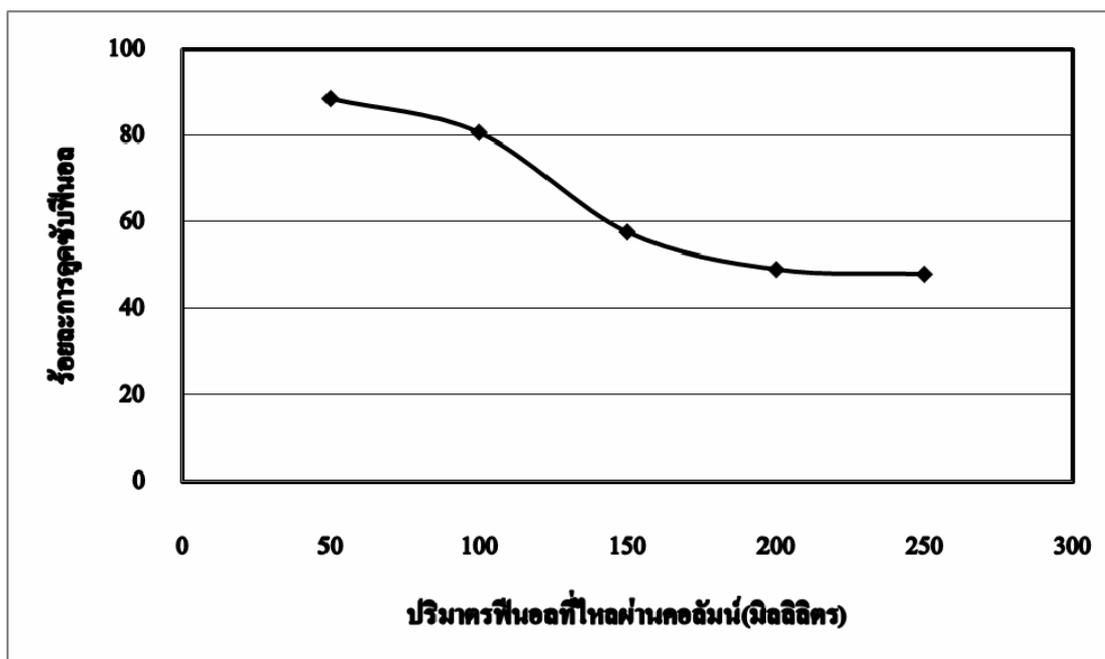
6. ประสิทธิภาพการดูดซับฟินอลจากสารละลายมาตรฐานฟินอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ ของ สัจจทั้ง 2 แหล่ง

6.1 สัจจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

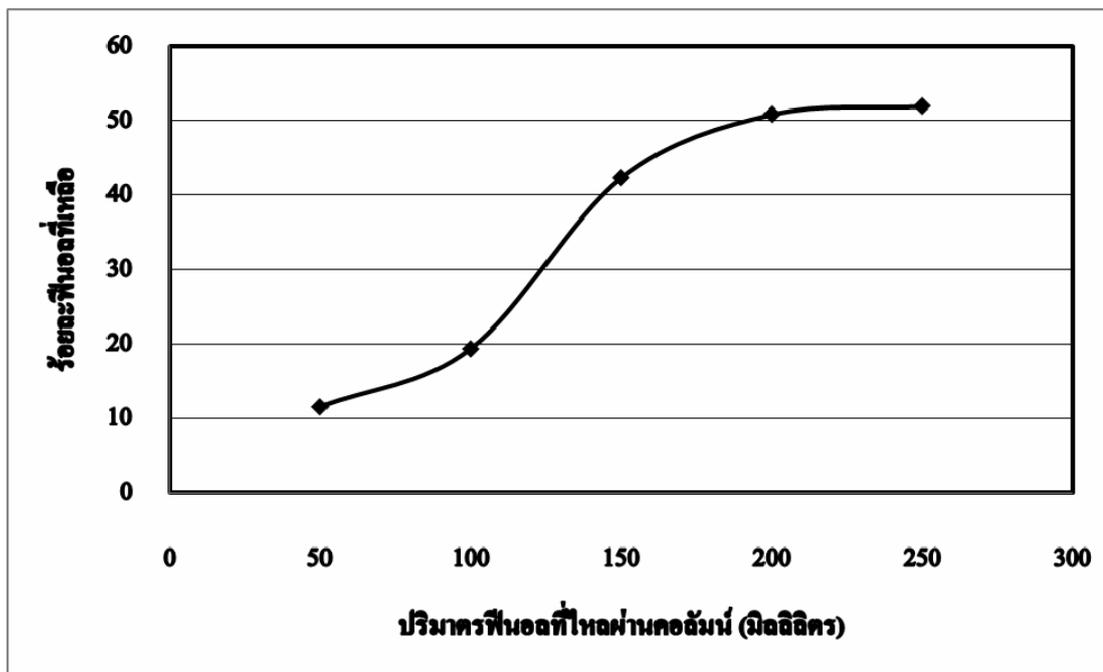
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟินอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุ สัจจจำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลายมาตรฐานฟินอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟินอล ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟินอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในช่วงแรก คือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟินอลของสัจจมีค่าสูง คือ ร้อยละ 88.50 ซึ่งจะเห็นได้จาก ปริมาณฟินอลในสารละลายมาตรฐานฟินอลที่เหลืออยู่น้อย คือ ร้อยละ 11.50 และเมื่อปริมาตร

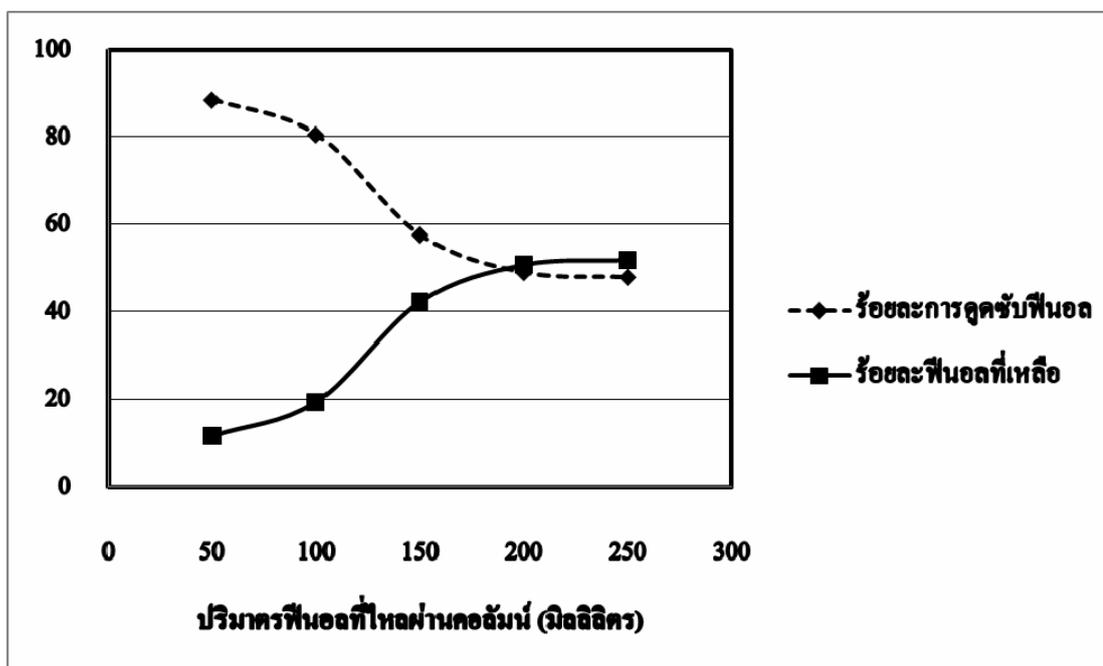
สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของสัจจะจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของสัจจะมี การดูดซับฟีนอลเอาไว้ และหากมี ปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลกรองผ่านสัจจะในคอลัมน์ต่อไปอีก พื้นที่ผิวของสัจจะในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว (อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ) และสุดท้ายสัจจะจะหมดสภาพในการดูดซับ ดังภาพที่ 32, 33, 34 และตารางที่ 14



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัจจะจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการ แหลมผักเป็ด จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ของ สัตว์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัตว์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการ แหลมผักเบี้ยจังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือและปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรสารละลายฟีนอล ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	88.50	11.50
100	80.67	19.33
150	57.73	42.27
200	49.19	50.81
250	48.09	51.91

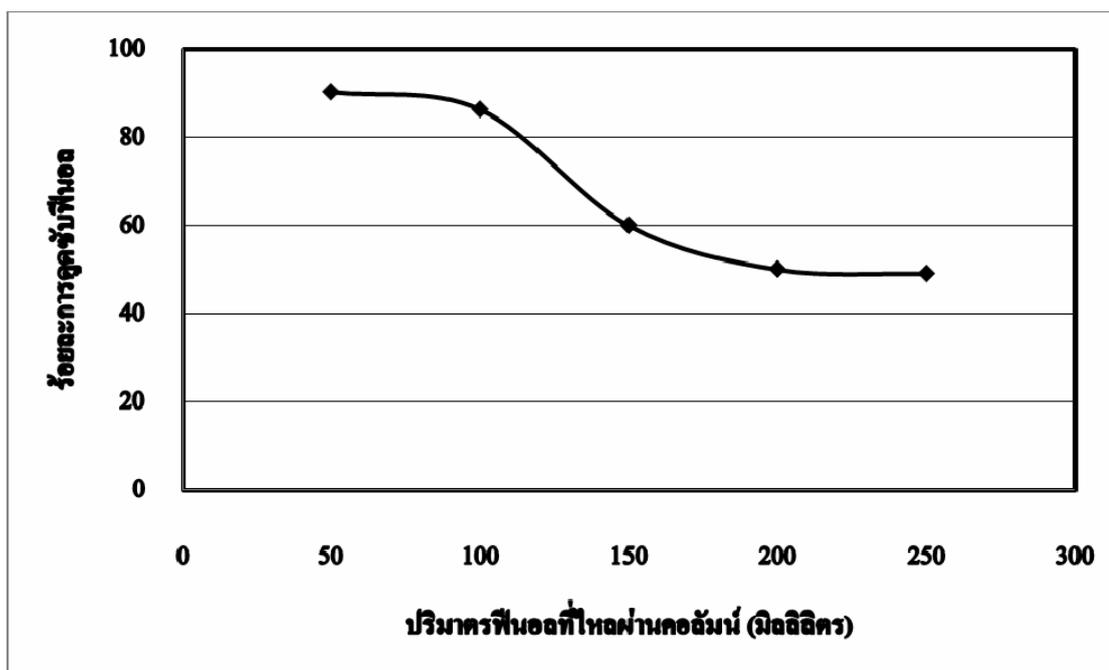
ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการผ่านสารละลายมาตรฐานฟีนอล และ ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ผ่านการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับของ สตัดจ์จะค่อย ๆ ลดลง และเมื่อปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์เป็น 250 มิลลิลิตร สตัดจ์จะถึงจุดอิ่มตัวและหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ทำให้ปริมาณฟีนอลเหลืออยู่ มากในสารละลายมาตรฐานฟีนอล ประสิทธิภาพในการดูดซับของสตัดจ์จึงลดลง

6.2 สตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

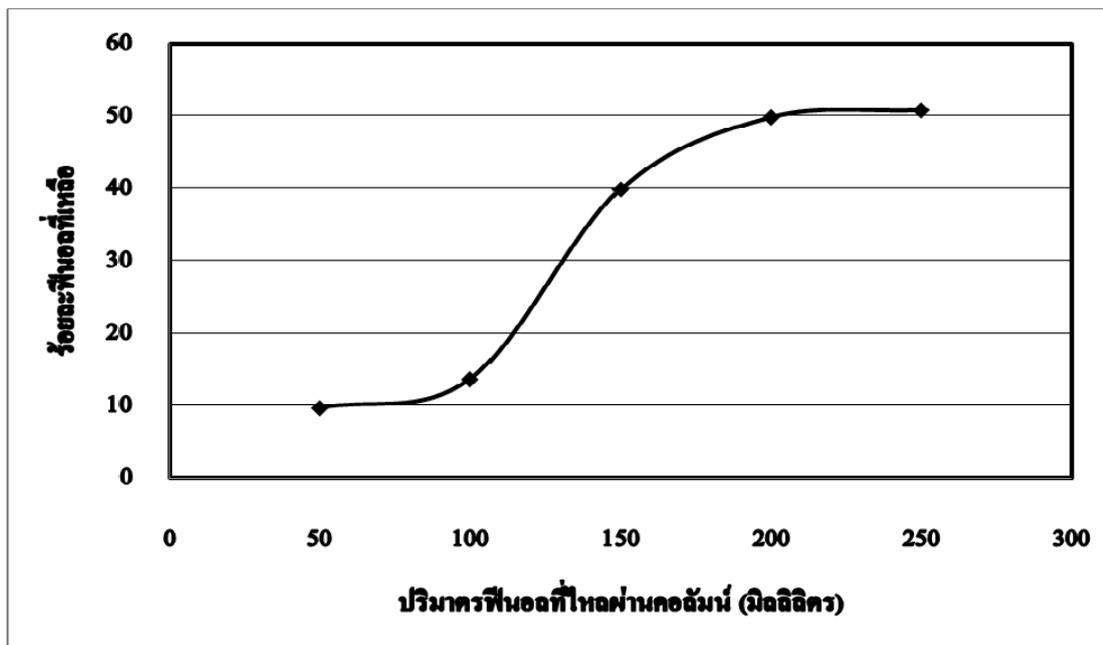
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 3 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุ สตัดจ์จำนวน 10 กรัม แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายมาตรฐานจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในช่วงแรก คือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของสตัดจ์มีค่าสูง คือ ร้อยละ 90.30 ซึ่งจะเห็นได้จาก ปริมาณฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่เหลืออยู่น้อย คือ ร้อยละ 9.70 และเมื่อปริมาตร

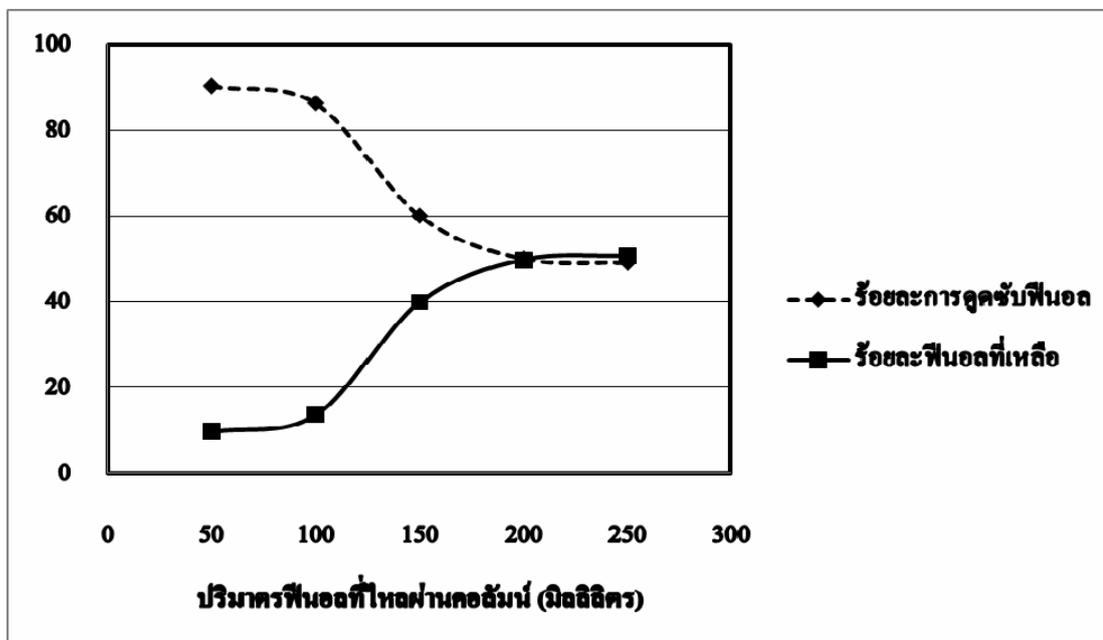
สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของสัจจะจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของสัจจะมี การดูดซับฟีนอลเอาไว้ และหากมี ปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลกรองผ่านสัจจะในคอลัมน์ต่อไปอีก พื้นที่ผิวของสัจจะในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว (อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ) และสุดท้ายสัจจะจะหมดสภาพในการดูดซับ ดังภาพที่ 35, 36, 37 และตารางที่ 15



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสัจจะจากบ่อน้ำบาดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปุ๋ยนอลที่เหลือ และปริมาณปุ๋ยนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ของ สัตว์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับปุ๋ยนอลของสัตว์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการ แหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละปุ๋ยนอลที่เหลือ และปริมาณปุ๋ยนอลที่ไหลผ่าน คอลัมน์

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

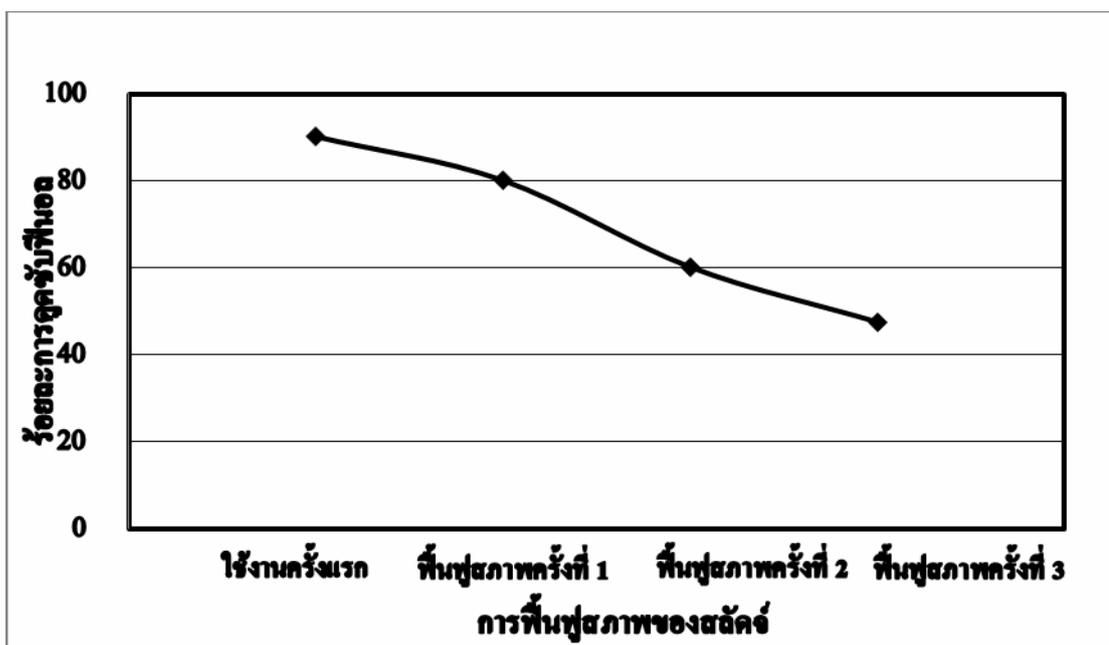
ปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	90.30	9.70
100	86.33	13.67
150	60.11	39.89
200	50.18	49.82
250	49.19	50.81

ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการผ่านสารละลายมาตรฐานฟีนอล และปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ผ่านการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับของสตัดจ์จะค่อย ๆ ลดลง และเมื่อปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์เป็น 250 มิลลิลิตร สตัดจ์จะถึงจุดอิ่มตัวและหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ทำให้ปริมาณฟีนอลเหลืออยู่มากในสารละลายมาตรฐานฟีนอล ประสิทธิภาพในการดูดซับของสตัดจ์จึงลดลง

7. การศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสตัดจ์ทั้ง 2 แหล่ง ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

7.1 สตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ใช้สตัดจ์ที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์ และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้วปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของฟีนอลที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 38 และตารางที่ 16



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และการฟื้นฟูสภาพสลัดจ์

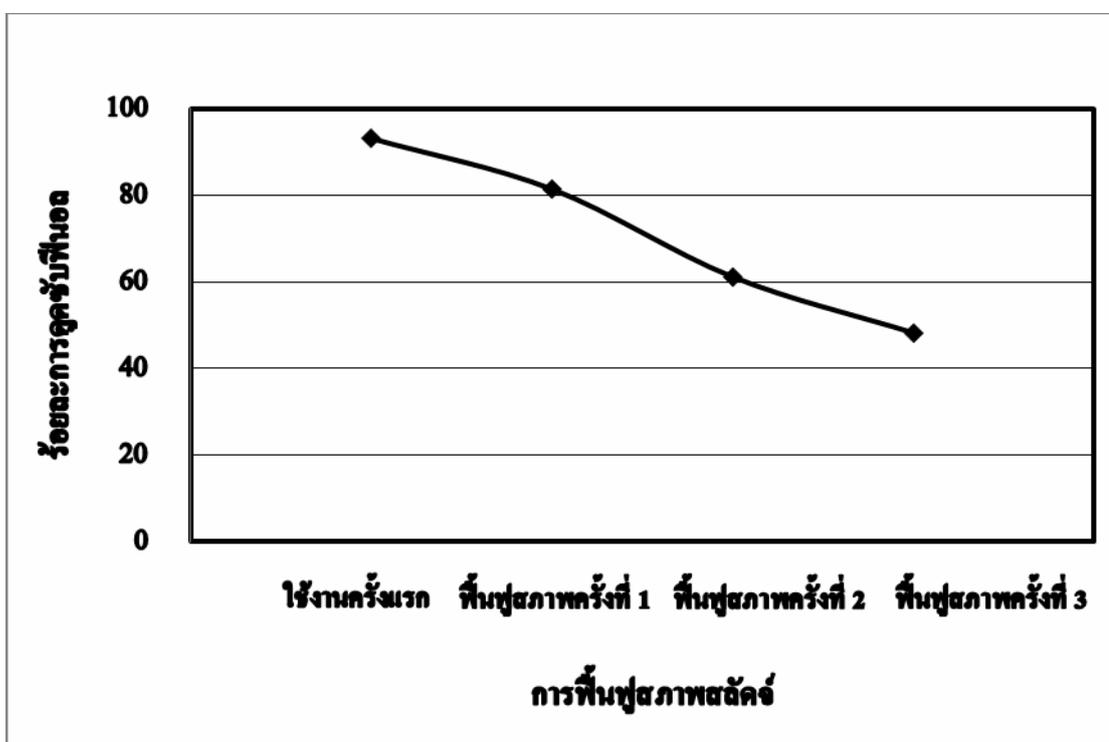
ตารางที่ 16 การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และการฟื้นฟูสภาพสลัดจ์

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
ใช้งานครั้งแรก	90.32
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	80.20
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	60.14
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	47.42

จากผลการทดลองภาพที่ 38 และตารางที่ 16 พบว่า สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีที่ผ่านการใช้งาน แล้วนำมาทำการฟื้นฟูสภาพ ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีที่ใช้งานครั้งแรก และยังพบอีกว่าสามารถนำสลัดจ์กลับมาใช้ได้ใหม่หลังจากการฟื้นฟูสภาพได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

7.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 3 ใช้สลัดจ์ที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์ และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้วปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของฟีนอลที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 39 และตารางที่ 17



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และการฟื้นฟูสภาพสลัดจ์

ตารางที่ 17 การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัด
สุพรรณบุรีและการฟื้นฟูสภาพสลัดจ์

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
ใช้งานครั้งแรก	93.10
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	81.40
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	61.14
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	48.22

จากผลการทดลองภาพที่ 39 และตารางที่ 17 พบว่า สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีที่ผ่านการใช้งาน แล้วนำมาทำการฟื้นฟูสภาพ
ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับสลัดจ์จาก
บ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีที่ใช้งานครั้งแรก และยังพบอีกว่าสามารถ
นำสลัดจ์กลับมาใช้ได้ใหม่หลังจากการฟื้นฟูสภาพได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

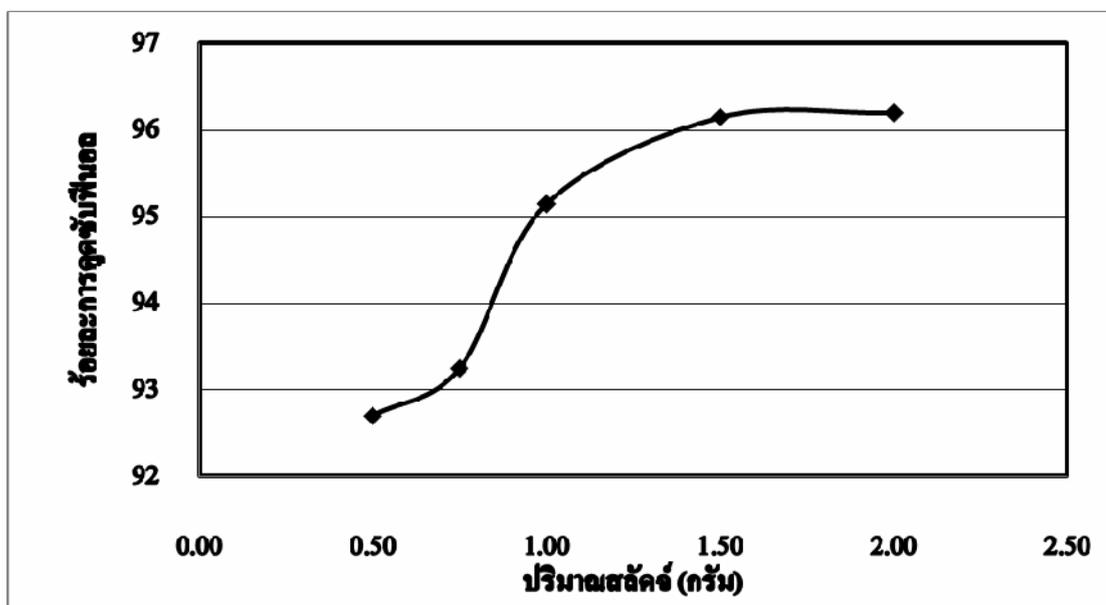
8. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิต กระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F

8.1 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

การทดลองเพื่อหาปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย
จากโรงงานผลิตกระดาษ (เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียจริง) ตามสภาวะที่
เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบกซ์ โดยใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร
ปรับพีเอช เท่ากับ 5 โดยใช้ปริมาณสลัดจ์แตกต่างกัน ได้แก่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม
นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่า
เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณสลัดจ์ที่ 2.00 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลาย
มาตรฐานได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.20 สำหรับสลัดจ์ที่ปริมาณ 0.5, 0.75, 1.00 และ 1.50 กรัม สามารถดูด

จับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้เท่ากับร้อยละ 92.70, 93.25, 95.15 และ 96.15 ตามลำดับ ดังภาพที่ 40 และตารางที่ 18



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 18 การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี
0.50	92.70
0.75	93.25
1.00	95.15
1.50	96.15
2.00	96.20

ผลของปริมาณสลัดจ์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองพบว่า ปริมาณสลัดจ์ 2.00 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลน้อยที่สุด เมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.50 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสลัดจ์มีขนาดเท่ากัน ปริมาณสลัดจ์ที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1.00 กรัม

จากนั้นจึงทำการทดลอง โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ซึ่งมีฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ในน้ำเสีย ทำการปรับสภาพที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ คือ พีเอชเท่ากับ 5 ใช้สลัดจ์ปริมาณที่เหมาะสมดังกล่าว คือ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการเหมลผักมีย์จังหวัดเพชรบุรี

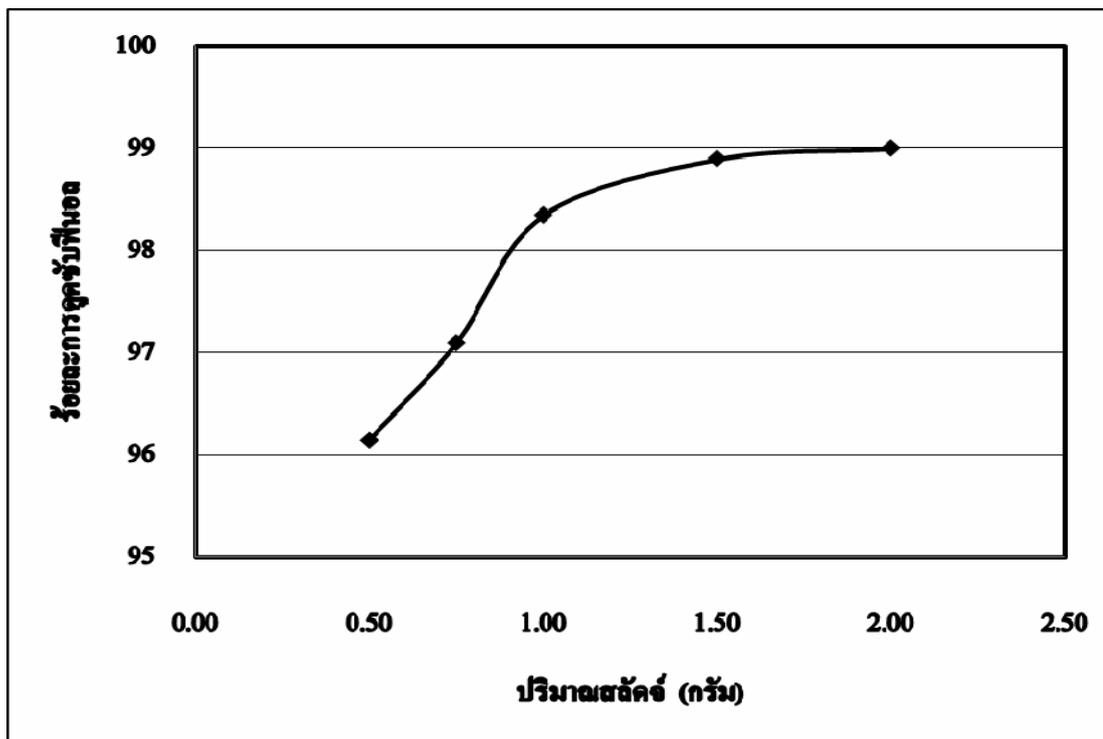
บริษัท	ปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ หลังการดูดซับ		
	A	3.81	
B	5.06	1.71	66.21
C	3.13	0.53	78.97
D	3.96	1.93	51.26
E	5.36	1.71	68.10
F	8.77	1.34	84.72

จากตารางที่ 19 น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F มีปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลคือป็นอยู่เท่ากับ 3.81, 5.06, 3.13, 3.96, 5.36 และ 8.77 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เมื่อทำการดูดซับด้วยสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษเท่ากับ ร้อยละ 56.69, 66.21, 78.97, 51.26, 68.10 และ 84.72 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษมีค่าน้อยกว่าสารละลายมาตรฐานฟีนอล เนื่องจากการรบกวนของตะกอนแขวนลอยที่ปนมากับน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ (แต่ตามความเป็นจริงแล้วสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์จากงานวิจัยนี้อาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ)

8.2 สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณสลัดจ์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ (เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียจริง) ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ โดยใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 3 โดยใช้ปริมาณสลัดจ์แตกต่างกัน ได้แก่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสลัดจ์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณสลัดจ์ที่ 2.00 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 99.00 สำหรับสลัดจ์ที่ปริมาณ 0.5, 0.75, 1.00 และ 1.50 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ ร้อยละ 96.15, 97.10, 98.35 และ 98.90 ตามลำดับ ดังภาพที่ 41 และตารางที่ 20



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมลิตร

ตารางที่ 20 การดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรีและปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมลิตร

ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี
0.50	96.15
0.75	97.10
1.00	98.35
1.50	98.90
2.00	99.00

ผลของปริมาณสลัดจ์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองพบว่า ปริมาณสลัดจ์ 2.00 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลน้อยที่สุด เมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์ 0.50 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นกับขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อสลัดจ์มีขนาดเท่ากัน ปริมาณสลัดจ์ที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณสลัดจ์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1.00 กรัม

จากนั้นจึงทำการทดลอง โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ซึ่งมีฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ในน้ำเสีย ทำการปรับสภาพที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ คือ พีเอชเท่ากับ 3 ใช้สลัดจ์ปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจาก โรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

บริษัท	ปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
	A	3.81	
B	5.06	0.89	82.41
C	3.13	0.07	96.43
D	3.96	0.61	84.60
E	5.36	1.25	76.68
F	8.77	0.51	94.18

จากตารางที่ 21 น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ซึ่งมีฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ในน้ำเสีย เท่ากับ 3.81, 5.06, 2.52, 3.96, 5.36 และ 8.77 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เมื่อทำการดูดซับด้วยสัคคัจจากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ เท่ากับ ร้อยละ 93.44, 82.41, 96.43, 84.60, 76.68 และ 94.18 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษมีค่าน้อยกว่าสารละลายมาตรฐานฟีนอล เนื่องจากการรบกวนของตะกอนแขวนลอยที่ปนมากับน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ (แต่ตามความเป็นจริงแล้วสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์จากงานวิจัยนี้ อาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของสตัดจ์ 2 แหล่ง ได้แก่ สตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรี โดยทำการทดลองแบบแบทช์ และคอลัมน์ ผลการทดลองสรุปดังต่อไปนี้

ในการดูดซับฟีนอล โดยใช้สตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดสุพรรณบุรี แหล่งละ 1 กรัม สารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 50 มิลลิกรัมลิตร พบว่า ระยะเวลาป้อน 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และพีเอช 5 และ 3 ตามลำดับสามารถดูดซับฟีนอลได้เฉลี่ยร้อยละ 90.32 และ 93.10 ตามลำดับ เมื่อนำสตัดจ์เพชรบุรี และสตัดจ์สุพรรณบุรี มาทำการทดลองในคอลัมน์ โดยให้ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์เท่ากัน เป็น 50 มิลลิลิตร พบว่า สตัดจ์สุพรรณบุรีสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 90.30 ซึ่งดีกว่าสตัดจ์เพชรบุรีได้ร้อยละ 88.50 ผลจากการฟื้นฟูสภาพสตัดจ์เพชรบุรี และสตัดจ์สุพรรณบุรี หลังการใช้งานพบว่า สตัดจ์เพชรบุรี และสตัดจ์สุพรรณบุรี มีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลลดลงจากการใช้งานครั้งแรกตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าข้อมูลจากผลการทดลองข้างต้นมีความสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ และใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สตัดจ์จากแหล่งอื่น ๆ ในการดูดซับฟีนอลที่ทำได้ง่าย และยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์
2. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของสตัดจ์ในการดูดซับสารมลพิษชนิดอื่นด้วย เพื่อที่จะสามารถใช้สตัดจ์ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **พินอล**. กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กษิข แสงมุกดา. 2547. การดูดติดผิวของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมในดิน และการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมในชั้นน้ำใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ขนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. 2550. การดูดบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตะกอนจุลินทรีย์. หมวดวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สำนักวิชาการศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพฯ.

เฉลิมราช วันทวิน และพรทิพย์ เกรียงกรกฎ. 2543. การดูดซับโครเมียมและผลต่อแอกทิวิตีเซลล์ที่มีอายุสัปดาห์ต่างๆ กัน. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ชยาภาส ทับทอง. 2548. การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

เทศบาลเมืองเพชรบุรี. 2540 ก. รายงานฉบับกลาง โครงการศึกษาความเหมาะสมระบบจัดการมูลฝอย เทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- นันทกา มิตรมโนชัย. 2546. การสกัดโลหะหนักออกจากตะกอนดินในระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรี ด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปิยนันท์ ขุนทองจันทร์. 2549. การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้ในการปลูกพืชโดยวิธีแพ่งเพาะชำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรกาย อุด้าห์. 2541. ปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในพืชที่ปลูกโดยใช้วัสดุปลูกผสมระหว่างตะกอนน้ำเสียและดินในท้องที่จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณรณ จงเลิศจรรยา. 2540. การกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนสลัดจ์ด้วยวิธีไบโโอลิชซิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริพร สิงห์ทอง. 2547. การดูดซับสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในดินตะกอนแม่น้ำบางปะกง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุจินดา ลักขณาอดิศร. 2542. การนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 14(3): 21-22. อ้างถึง อรรถธรรม ศิริรัตน์พิริยะ. 2539. การใช้ประโยชน์กากตะกอนน้ำเสียในรูปของปุ๋ยสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม จังหวัดฉะเชิงเทรา. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพิศ ไกรมาก. 2546. การศึกษาการสลายทางชีวภาพของส่วนผสมขยะและสลัดจ์น้ำเสียในการหมักปุ๋ยแบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุวัจน์ เกตุเข้ม และภาณุ คำนวนิชกุล. 2548. การปรับโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- อรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2532. ทางเลือกที่ได้รับประโยชน์คืนมาจากการลงทุนแก้ปัญหามลภาวะน้ำ. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม เล่ม 11 (2532): 69-87.

อุไรวัลย์ มณีโชติ. 2547. การใช้สารร้ายฝักกาดเป็นตัวดูดซับฟีนอลจากสารละลาย. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

AOAC. 1995. **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists.**
16th ed. Verginia, USA.

Boutwell, R.K. and D.K. Bosch. 1959. The tumour promoting action of phenol and related
compounds for mouse skin. **Cancer Res** 19: 413-424.

Clayton, G.D. and F.E. Clayton. 1981. **Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 2B,**
Toxicology, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, Ny., USA.

Clayton, G.D. and F.E. Clayton. 1994. **Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 2B,**
Toxicology, 4th ed. John Wiley & Sons, New York, Ny., p 1605-1613.

Conning, D.M. and M.J. Hayes. 1970. The dermal toxicity of phenol and investigation of the
most effective first-aid measures. **Br. J. Ind. Med.** 27: 155-159.

Deichmann, W.B. and M.L. Keplinger. 1963. **Phenols and phenolic compounds.** In: Patty FA
ed. Industrial hygiene and toxicology. New York, Interscience Publishers, pp2567-2627.

Deichmann, W.B. and S. Witherup. 1944. Phenol studies – VI: The acute and comparative
toxicity of phenol and *o*-, *m*-, and *p*-cresols for experimental animals. **J. Pharmacol**
Exp. Ther. 80: 233-240.

Ernst, M.R., R. Klesmer, R.A. Huebner and J.E. Martin. 1961. Susceptibility of cats to phenol.
J. Am. Vet. Med. Assoc. 138: 197-199.

Freitag, D., L. Ballhorn, H. Geyer and F. Korte. 1985. Environmental hazard profile of organic
chemicals. An experimental method for the assessment of the behavior of organic

chemicals in the ecosphere by means of simple laboratory test with ^{14}C -labelled chemicals. **Chemosphere** 14: 1589-1616.

Haddad, L.M., K.A. Dimend and J.E. Schweistris. 1979. Phenol poisoning. **JACEP**. 8(7):267-269.

Heller, V.G. and I. Pursell. 1938. Phenol-contaminated waters and their physiological action. **J. Pharmacol Exp. Ther.** 63: 99-107.

Hinkel, G.K. and H.W. Kintzel. 1968. Phenol poisoning of a newborn through skin resorption. **Dtsch. Gesundheits.** 23: 2420-2422.

Hong, J., F. Ying, F. Yao and G. Qing-Xiang. 2003. **Studies on the extraction of phenol in wastewater.** Journal of Hazardous Materials B101 (2003): 179–190.

IARC. 1993. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.** Lists of IARC Evaluations. International Agency for Research on Cancer. World Health Organization. Lyon, France.

IPCS. 1994. **Environmental Health Criteria 161: Phenol.** The International Programme on Chemical Safety. World Health Organization. Geneva, Switzerland.

Kuwata, K., M. Uebori and Y. Yamazaki. 1980. Determination of phenol in polluted air as *p*-nitrobenzene azophenol derivative by reserved phase high performance liquid chromatography. **Anal. Chem.** 52: 857-860.

Laszezynska, M., B. Barcew, K. Wyczarska-srak and D. Wozniak. 1983. Reversibility of histoenzymatic changes caused by phenol in the mouse kidney and liver. **Folia Biol (Cracow)** 31(1): 65-73.

Merck. 1996. **The Merck Index. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals.**
12th ed. Budavari S. editor. Merck Laboratories. Whitehouse Station, New Jersey.

Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** Mc
Graw Hill Publishing Company Ltd., New Delhi. 1334 p.

Minor, J.K. and B.A. Becker. 1971. A comparison of the teratogenic properties of sodium
salycate, sodium benzoate and phenol. Abstracts of the 10th Annual Meeting of the
Society of Toxicology No. 40 **Toxicol. Appl. Pharmacol.** 19: 373.

Moskvin, A. L., A. V. Mozzhukhin, E. A. Mukhina and L. N. Moskvin. 2005. **Flow-Injection
Photometric Determination of the Phenol Index of Natural Waters in the Presence
of Humic Acids.** Journal of Analytical Chemistry (60): 70-74.

NEPA. 1991. **Fire Protection Guide on Hazardous Materials.** 1st ed. Quincy M.A. editor,
National Fire Protection Association. USA.

Olowska, L., H. Oledzka-Slotwinska, M. Laczynska and W. Wozniak. 1980. Effect of phenol
on hydrolytic and respiratory enzymes of the small intestinal mucosa of white mouse.
Folia Morphol (Warsaw) 39(2): 149-158.

Patrick, E., H.I. Maibach and A. Burkhalter. 1985. Mechanisms of chemically induced skin
irritation. I. Studies of time course, dose response and components of inflammation in the
laboratory mouse. **Toxicol Appl. Pharmacol** 81: 476-490.

Pratt, R.M. and W.D. Willis. 1985. In vitro screening assay for teratogens using growth
inhibition of human embryonic cells. **Proc. Natl. Acad. Sci.** 82: 5791-5794.

- Pullin, T.G., M.N. Pinkerton, R.V. Johnson and D.J. Kilian. 1978. Decontamination of the skin of swine following phenol exposure: A Comparison of the relative efficacy of water versus polyethylene glycol/industrial methylated spirits. **Toxicol Appl. Pharmacol** 43: 199-206.
- Salamon, M.H. and O.M. Glendenning. 1957. Tumour promotion in mouse skin by sclerosing agents. **Br. J. Cancer** 11: 434-444.
- Schlicht, M.P. *et al.* 1992. Systemic and neurotoxic effects of acute and repeated phenol administration (Abstract No. 1047). **Toxicologist** 12: 274.
- Shinzo, T., I. Chiaki and K. Takayoshi. 1989. **Reactivities of New Color Reagent Phenanthro[9,10-*d*]imidazole-2-N-chloroimide with Phenolic Compounds**. Analytical Sciences 1989(5): 43-47.
- Skvortsova, N.N. and I.V. Vysochina. 1976. Changes in biochemical and physiological indices in animals produced by the combined effect of benzo(a)pyrene and phenol. **Environ Health Perspect** 13: 101-106.
- Sommers, L.E. 1997. Chemical Composting of Sewage and Analysis of their Potential Use as Fertilizers. **J. Environ. Qual.** 6(2): 225-232.
- Turtle, W.R.M. and T. Dolan. 1992. A case of rapid and fatal absorption of carbolic acid through the skin. **Lancet.** 2: 1273-1274.
- U.S. EPA. 1986. **Quality Criteria for Water**. Office of Water Regulations and Standards. United States Environmental Protection Agency. Washington DC. EPA440/5-86/001.
- Verschueren, K. 1996. **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, New York. USA.

Windus-Podehl, G., C. Lyftog, L. Zieve and G. Brunner. 1983. Encephalopathic effect in rats. **J. Lab Clin. Med.** 101(4): 586-592.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	7.63	7.65	7.65	7.65	0.01	84.70
4	7.22	7.20	7.22	7.21	0.01	85.58
5	4.82	4.80	4.82	4.82	0.01	90.36
6	5.35	5.37	5.36	5.36	0.01	89.28
7	8.32	8.35	8.33	8.33	0.01	83.34
8	9.98	9.96	9.94	9.96	0.02	80.08

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	3.21	3.20	3.22	3.21	0.01	93.58
4	5.85	5.87	5.86	5.86	0.01	88.28
5	6.35	6.33	6.31	6.33	0.02	87.32
6	6.60	6.58	6.57	6.58	0.01	86.84
7	7.70	7.68	7.69	7.69	0.01	84.62
8	10.40	10.38	10.36	10.38	0.02	79.24

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาบ่งกวน

ระยะเวลาบ่ง กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	5.50	5.48	5.49	5.49	0.01	89.02
30	4.66	4.67	4.66	4.67	0.01	90.66
60	5.64	5.66	5.66	5.65	0.01	88.70
90	5.85	5.87	5.86	5.86	0.01	88.28
120	6.35	6.34	6.35	6.35	0.01	87.30

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสตัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาบ่งกวน

ระยะเวลาบ่ง กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	8.06	8.02	8.03	8.04	0.02	83.92
30	3.18	3.20	3.18	3.19	0.01	93.62
60	7.35	7.33	7.35	7.34	0.01	85.32
90	9.75	9.73	9.71	9.73	0.02	80.54
120	10.10	10.07	10.08	10.08	0.02	79.84

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และระยะเวลาสัมพัทธ์

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	8.40	8.39	8.40	8.40	0.01	83.20
30	4.91	4.93	4.91	4.92	0.01	90.16
60	7.14	7.13	7.12	7.13	0.01	85.74
90	7.55	7.55	7.57	7.56	0.01	84.88
120	8.05	8.02	8.03	8.03	0.01	83.94

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และระยะเวลาสัมพัทธ์

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	4.16	4.15	4.18	4.16	0.01	91.68
30	3.39	3.40	3.38	3.39	0.01	93.22
60	3.76	3.75	3.76	3.76	0.01	92.48
90	4.85	4.87	4.87	4.87	0.01	90.26
120	5.05	5.04	5.07	5.05	0.02	89.90

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	4.84	5.03	4.84	4.90	0.11	90.32
100	11.99	11.99	12.18	12.05	0.11	88.01
200	27.78	27.58	27.78	27.71	0.12	86.15
300	46.94	46.94	46.44	46.77	0.29	84.35
400	70.48	70.68	70.48	70.55	0.12	82.38
500	99.18	99.18	99.08	99.15	0.06	80.17

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	3.35	3.45	3.35	3.38	0.06	93.30
100	7.90	8.11	7.90	7.97	0.12	92.10
200	19.24	19.14	19.24	19.21	0.06	90.40
300	35.42	35.42	35.22	35.35	0.12	88.22
400	51.61	51.61	51.71	51.64	0.06	87.10
500	69.19	68.99	69.19	69.12	0.12	86.16

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี และปริมาณสไลด์

ปริมาณสไลด์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	7.94	7.96	7.94	7.95	0.01	84.10
1.0	4.89	4.91	4.89	4.90	0.01	90.20
2.0	2.41	2.41	2.39	2.40	0.01	95.20
3.0	1.87	1.89	1.91	1.89	0.02	96.22
4.0	1.63	1.63	1.61	1.62	0.01	96.76
5.0	1.34	1.36	1.34	1.35	0.01	97.32

ตารางผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย
จังหวัดเพชรบุรี

ปริมาณ สไลด์ (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
1.0	50	4.90	0.05	2.26	0.4435	0.2041	0.3531	0.6902
2.0	50	2.40	0.05	1.19	0.8403	0.4217	0.0755	0.3802
3.0	50	1.89	0.05	0.80	1.2471	0.5291	-0.0959	0.2765
4.0	50	1.62	0.05	0.60	1.6536	0.6173	-0.2184	0.2095
5.0	50	1.34	0.05	0.49	2.0551	0.7452	-0.3128	0.1271

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี และปริมาณสไลด์

ปริมาณสไลด์ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	4.13	4.10	4.11	4.11	0.02	91.78
1.0	3.50	3.52	3.50	3.51	0.01	92.98
2.0	2.82	2.84	2.83	2.83	0.01	94.34
3.0	2.27	2.29	2.31	2.29	0.02	95.42
4.0	1.97	1.98	1.98	1.98	0.01	96.04
5.0	1.78	1.81	1.79	1.80	0.02	96.40

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสไลด์จากบ่อน้ำบาดาลเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย
จังหวัดสุพรรณบุรี

ปริมาณ สไลด์ (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
0.5	50	4.11	0.05	4.59	0.2179	0.2433	0.6617	0.6138
1.0	50	3.51	0.05	2.32	0.4302	0.2849	0.3663	0.5453
2.0	50	2.83	0.05	1.18	0.8480	0.3534	0.0716	0.4518
3.0	50	2.29	0.05	0.80	1.2576	0.4367	-0.0995	0.3598
4.0	50	1.98	0.05	0.60	1.6660	0.5051	-0.2217	0.2967
5.0	50	1.80	0.05	0.48	2.0747	0.5556	-0.3170	0.2553

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตร
สารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรสารละลายฟีนอล ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ ฟีนอลที่ เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ ฟีนอล
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่				
	1	2	3				
50	11.50	11.19	11.50	11.40	0.18	11.50	88.50
100	19.24	19.33	19.33	19.30	0.05	19.33	80.67
150	42.27	42.27	42.17	42.24	0.06	42.27	57.73
200	50.71	50.81	50.81	50.78	0.06	50.81	49.19
250	51.91	52.01	51.91	51.94	0.06	51.91	48.09

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของสไลด์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย
โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตร
สารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรสารละลายฟีนอล ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ ฟีนอลที่ เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ ฟีนอล
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่				
	1	2	3				
50	9.70	9.90	9.70	9.77	0.12	9.70	90.30
100	13.67	13.77	13.67	13.70	0.06	13.67	86.33
150	39.89	39.89	40.09	39.96	0.12	39.89	60.11
200	49.82	49.92	49.82	49.85	0.06	49.82	50.18
250	50.81	50.81	50.71	50.78	0.06	50.81	49.19

ตารางผนวกที่ 15 การดูดัชนีฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อน้ำบาดาลเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัด เพชรบุรี และฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดัชนีฟีนอล				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	90.32	90.32	90.12	90.25	0.12
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	80.20	79.80	80.20	80.07	0.23
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	60.14	60.14	59.74	60.01	0.23
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	47.42	47.82	47.42	47.55	0.23

ตารางผนวกที่ 16 การดูดัชนีฟีนอลของสลัดจ์จากบ่อน้ำบาดาลเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัด สุพรรณบุรี และฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดัชนีฟีนอล				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	93.10	93.10	93.50	93.23	0.23
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	81.40	81.00	81.40	81.27	0.23
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	61.14	61.14	60.94	61.07	0.12
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	48.22	48.02	48.22	48.15	0.12

ตารางผนวกที่ 17 การดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

บริษัท	ปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูดซับ
	ก่อน การดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	3.81	1.64	1.76	1.54	1.65	0.11	56.69
B	5.06	1.88	1.92	1.31	1.71	0.34	66.21
C	3.13	0.47	0.59	0.83	0.63	0.18	78.97
D	3.96	1.83	2.02	2.54	2.13	0.37	51.26
E	5.36	1.77	1.72	1.65	1.71	0.07	68.10
F	8.77	1.30	1.43	1.37	1.36	0.06	84.72

ตารางผนวกที่ 18 การดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F ของสลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี

บริษัท	ปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูดซับ
	ก่อน การดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	3.81	0.28	0.44	0.22	0.31	0.12	93.44
B	5.06	1.25	0.81	0.97	1.01	0.22	82.41
C	3.13	0.05	0.09	0.20	0.11	0.08	96.43
D	3.96	0.37	0.63	0.59	0.53	0.14	84.60
E	5.36	1.29	1.19	1.27	1.25	0.05	76.68
F	8.77	0.54	0.20	0.47	0.4	0.18	94.18

ตารางผนวกที่ 19 แสดงคุณภาพของน้ำจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F

พารามิเตอร์	บริษัท A	บริษัท B	บริษัท C	บริษัท D	บริษัท E	บริษัท F	ค่ามาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม
TDS (มิลลิกรัม/ลิตร)	567	491	365	272	535	447	ไม่มากกว่า 3,000
TSS (มิลลิกรัม/ลิตร)	410	4,160	125	125	953	931	ไม่มากกว่า 50
Alkalinity (มิลลิกรัม/ลิตรของ CaCO ₃)	158.75	209.75	191.25	120	465	870	ไม่ได้กำหนด
Hardness (มิลลิกรัม/ลิตร ของ CaCO ₃)	535	295	750	1,000	930	1,065	ไม่ได้กำหนด
COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	1,800	15,200	200	1,000	2,160	2,880	ไม่เกิน 120
BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	145	1,478	30	150	92	25	ไม่มากกว่า 20
Sulfide (มิลลิกรัม/ลิตร)	5.56	2.70	0.92	1	1	0.2	ไม่มากกว่า 1
pH	6.70	6.40	7.0	8.3	6.6	7.3	5.5-9.0
Temperature (°C)	41.30	33.10	37.0	39.0	42.8	43.7	ไม่มากกว่า 40
Turbidity (NTU)	196	986	220	118	936	92	ไม่ได้กำหนด
DO (มิลลิกรัม/ลิตร)	1.29	0.34	0.97	2.21	1.79	1.69	ไม่ได้กำหนด
EC (ไมโครซีเมนต์)	1,127	1,040	731	543	1,171	893	ไม่ได้กำหนด
% Sulfate	0.10	0.16	0.14	0.07	0.07	0.15	ไม่ได้กำหนด
Calcium	214	118	125	125	953	931	ไม่ได้กำหนด

ตารางผนวกที่ 19 (ต่อ)

พารามิเตอร์	บริษัท	บริษัท	บริษัท	บริษัท	บริษัท	บริษัท	ค่ามาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม
	A	B	C	D	E	F	
Magnesium	78.003	43.011	365	272	535	447	ไม่ได้กำหนด
Total Phenol (มิลลิกรัม/ลิตร)	3.81	5.06	3.13	3.96	8.77	5.36	ไม่มากกว่า 1

ตารางผนวกที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ	ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ
	ฟีนอล		ฟีนอล
3	84.70 ^d	3	93.58 ^A
4	85.58 ^C	4	88.28 ^B
5	90.36 ^A	5	87.32 ^C
6	89.28 ^B	6	86.84 ^D
7	83.34 ^E	7	84.62 ^E
8	80.08 ^F	8	79.24 ^F

หมายเหตุ XX_x : ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 21 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปักกวนทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ระยะเวลาปักกวน (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาปักกวน (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
10	89.02 _B	10	83.92 _C
30	90.66 _A	30	93.62 _A
60	88.70 _C	60	85.32 _B
90	88.28 _D	90	80.54 _D
120	87.30 _E	120	79.84 _E

หมายเหตุ XX_x : ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
10	83.20 _E	10	91.68 _C
30	90.16 _A	30	93.22 _A
60	85.74 _B	60	92.48 _B
90	84.88 _C	90	90.26 _D
120	83.94 _D	120	89.90 _E

หมายเหตุ XX_x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 23 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล ทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
50	90.32A	50	93.30A
100	88.01B	100	92.10B
200	86.15C	200	90.40C
300	84.35D	300	88.22D
400	82.38E	400	87.10E
500	80.17F	500	86.16F

หมายเหตุ XXx: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ทางสถิติโดยวิธี LSD

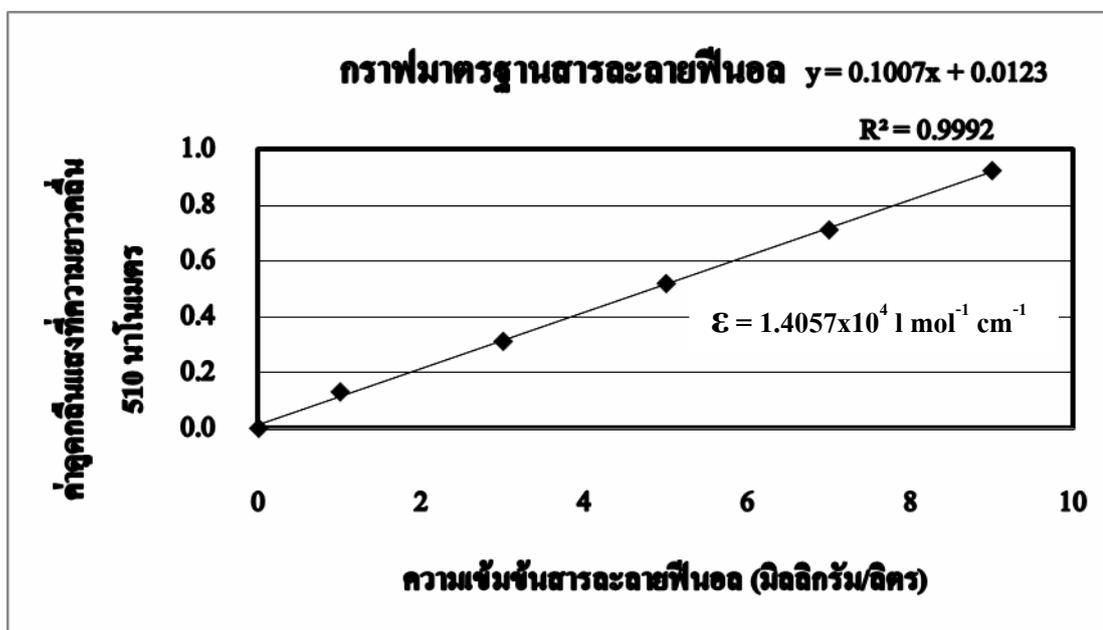
สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
0.5	84.10F	0.5	91.78F
1.0	90.20E	1.0	92.98E
2.0	95.20D	2.0	94.34D
3.0	96.22C	3.0	95.42C
4.0	96.76B	4.0	96.04B
5.0	97.32A	5.0	96.40A

หมายเหตุ XXx : ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 25 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสลัดจ์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของฟีนอลจาก
สารละลายมาตรฐานฟีนอล 20 มิลลิกรัม/ลิตรทางสถิติโดยวิธี LSD

สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี		สลัดจ์จากบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงการแหลมผักเบี้ย จังหวัดสุพรรณบุรี	
ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ปริมาณสลัดจ์ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
0.50	92.70 _E	0.5	96.15 _E
0.75	93.25 _D	1.0	97.10 _D
1.00	95.15 _C	2.0	98.35 _C
1.50	96.15 _{BA}	3.0	98.90 _{BA}
2.00	96.20 _{AB}	4.0	99.00 _{AB}

หมายเหตุ XX_x : ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายเชิดพงศ์ เหลียวพัฒนพงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 18 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลตรัง
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ประมง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคลุ่มน้ำฝักเบ็ญ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ