



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยกกสามเหลี่ยมและบอน

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by using *Scirpus grossus* L.f.
and *Colocasia esculenta* Schott

นามผู้วิจัย นายอิสระ ตั้งสุวรรณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์พิลาณี ไวกนอมสัตย์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กาญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยกกสามเหลี่ยมและบอน

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by using *Scirpus grossus* L.f. and
Colocasia esculenta Schott

โดย

นายอิสระ ตั้งสุวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิต)

พ.ศ. 2551

อิสระ ตั้งสุวรรณ 2551: การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วย
กกสามเหลี่ยมและบอน ปริญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 104 หน้า

ฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับจากผงกกสามเหลี่ยมและผงบอน ถูกตรวจวัดในรูปแบบ
quinoneimine ด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ได้ทำการศึกษา
ปัจจัยที่มีผลต่อสถานะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (4-8) ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัสความ
เข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (50-250 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณของตัวดูดซับ (20-100 กรัม/ลิตร)
นอกจากนี้กระบวนการดูดซับของผงกกสามเหลี่ยมและผงบอน สอดคล้องกับสมการไอโซ
เทอรั่มของแลงเมียร์ และฟรุนดิชตามลำดับ จากสถานะที่เหมาะสมของการดูดซับถูกนำมา
ประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิต
กระดาษและเยื่อกระดาษ

Itsara Tungsuwan 2008 : Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by using *Scirpus grossus* L.f. and *Colocasia esculenta* Schott. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 104 pages.

The remained phenol after its adsorptive extraction from *Scirpus grossus* L.f. and *Colocasia esculenta* SCHOTT powder can be determined by spectrophotometrically at 510 nm as quinoneimine. The effects of pH (4-8), shaking time or digestion time, contact time, initial concentration of phenol (50-250 mg/L) and amount of adsorbent (20-100 g/L) are reported. In addition, the adsorption process of *S. grossus* L.f. and *C. esculenta* SCHOTT powder are conformed with Langmuir and Freundlich models respectively. The system has been applied to the determination of phenol and its derivatives in wastewater from paper industries.

_____	_____	___ / ___ / ___
Student's signature	Thesis Advisor's signature	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้กรุณาใช้เวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พิลาณี ไวกนอมสัจย์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท อุตสาหกรรมกระดาษ คราฟท์ไทย จำกัด, บริษัท ปัญจพล เปเปอร์ อินดัสตรี จำกัด และบริษัทอื่นๆ ที่ได้อนุเคราะห์น้ำ ตัวอย่างในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ คุณภรทมน โสกันธิกา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณแม่บัวคำ ตั้งสุวรรณ และครอบครัว ที่ได้เมตตา อบรมสั่งสอน ให้ความรู้จนถึงปัจจุบันและคุณน้ำธีระศักดิ์ คำภีระ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยตลอดจนจบ การศึกษาในครั้งนี้ และช่วยเหลือสิ่งต่างๆ รวมถึงขอขอบคุณพี่ๆสิ่งแวดล้อมรุ่นที่ 29 เพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่นที่ 30 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจในการศึกษาวิจัยทดลอง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อิสระ ตั้งสุวรรณ

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	48
อุปกรณ์	48
วิธีการ	49
ผลและวิจารณ์	56
ผล	56
วิจารณ์	80
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล	5
2 ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอล ในสิ่งแวดล้อม	8
3 ค่า LD ₅₀ ของฟีนอลในสัตว์ทดลอง	11
4 แสดงฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน	15
5 กฎหมาย และข้อกำหนดบังคับประเภทที่ใช้ควบคุมฟีนอลในประเทศไทย และประเทศต่างๆ	17
6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและค่าพีเอช	57
7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาปั่นกวาน	59
8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาสัมผัส	60
9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและความเข้มข้นของฟีนอล	62
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและปริมาณ(กรัม)	63
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	70
12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	72
13 ร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ	73
14 ร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ	74
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม	76
16 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ของกกสามเหลี่ยม	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและปริมาณ	78
18	การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากปฏิกิริยาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ของบอน	79
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและค่าพีเอช	90
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและค่าพีเอช	90
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและระยะเวลาปั่นกวน	91
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและระยะเวลาปั่นกวน	91
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและระยะเวลาดำสัณ	92
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและระยะเวลาดำสัณ	92
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและความเข้มข้นของฟีนอล	93
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและความเข้มข้นของฟีนอล	93
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและปริมาณกกสามเหลี่ยม	94
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับของกกสามเหลี่ยม	94
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและปริมาณบอน	95
12	ไอโซเทอร์มการดูดซับของบอน	95
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	96
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
15 การดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	97
16 การดูดซับฟีนอลของบอนโดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	97
17 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล จากปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และF ของกกสามเหลี่ยม	98
18 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล จากปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และF ของบอน	98
19 แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และF	99
20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD	100
21 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD	100
22 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD	101
23 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี LSD	101
24 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนทางสถิติโดยวิธี LSD	102
25 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเทียบจากค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียของบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษต่างๆทางสถิติโดยวิธี LSD	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเกิดปฏิกิริยาของฟินอล	14
2	การระบุตำแหน่ง ortho (<i>o</i>), meta (<i>m</i>) และ para (<i>p</i>) ในฟินอล	15
3	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	20
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	21
5	แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	22
6	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	22
7	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	24
8	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	24
9	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	27
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	การแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช	36
17	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์โลส	37
18	โครงสร้างของไซเลม	38
19	หน่วยย่อยในโครงสร้างลิกนิน	39
20	กกสามเหลี่ยม (<i>Scirpus grossus</i> L.f.)	41
21	บอน (<i>Colocasia esculenta</i> Schott)	43
22	(ก) กกสามเหลี่ยมที่บดละเอียด และ (ข) บอนที่บดละเอียด	49
23	การเกิดสีของสารละลายฟินอลหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยา	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอน และค่าพีเอช	57
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและ ระยะเวลาปั่นกววน	58
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและ ระยะเวลาสัมผัส	60
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและความ เข้มข้นของฟีนอล	61
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน	63
29	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้กกสามเหลี่ยม	64
30	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุนดิชโดยใช้กกสามเหลี่ยม	65
31	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้บอน	67
32	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุนดิชโดยใช้บอน	68
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม ร้อยละฟีนอลที่ เหลือและ ปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	70
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	71
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและการฟื้นฟู สภาพกกสามเหลี่ยม	73
36	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและการฟื้นฟูสภาพบอน	74
37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณกกสามเหลี่ยม	76
38	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณบอน	78
ภาพผนวกที่		
1	กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล	103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biochemical oxygen demand
COD	=	Chemical oxygen demand
LSD	=	Least Significant Different
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TSS	=	Total suspended solid
TDS	=	Total dissolved solid
DO	=	Dissolved oxygen
EC	=	Electrical conductance

การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยกกสามเหลี่ยมและบอน

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by using *Scirpus grossus* L.f. and *Colocasia esculenta* Schott.

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านต่างๆ อย่างรวดเร็วทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม วัฒนธรรม และอื่นๆ อีกมากมาย การขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วก็เป็นผลหนึ่งของการพัฒนา ซึ่งทำให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมากมาย และปล่อยของเสียที่ไม่ต้องการให้เกิดผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเน่าเสีย ขยะเป็นพิษ และฝนกรด เป็นต้น ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่เกิดขึ้นเป็นปัญหารุนแรงในหลายพื้นที่ของประเทศไทยคือ ปัญหาเรื่องน้ำเน่าเสีย สาเหตุหลักๆ ที่ทำให้เกิดน้ำเน่าเสียมาจากน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเนื่องจากปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จำนวนมากทำให้น้ำที่ทิ้งมีปริมาณมาก และมีสารพิษต่างๆ หลากหลายชนิด หากมิได้มีการบำบัดน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำที่ถูกปล่อยทิ้ง ถ้าน้ำทิ้งมีปริมาณมากก็จะทำให้เป็นอันตรายต่อผู้ที่นำน้ำไปใช้อุปโภคหรือบริโภคมากด้วยเช่นกัน

ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจัดเป็นสารปนเปื้อนประเภทหนึ่งที่เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลัน และพิษแบบเรื้อรังกับมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ นอกจากนี้ยังเกิดการสะสมในสัตว์ แหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ การผลิตสี ตัวทำละลาย การผลิตยา และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้ฟีนอลในกระบวนการผลิต และน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้ในบ้านเรือน และห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไป โดยตามมาตรฐานควบคุมสารประกอบฟีนอล ได้กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานให้มีสารประกอบฟีนอลได้มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววิธีที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมีหลายวิธีคือ การบำบัดทางชีวภาพ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่ การดูดซับ

ดังนั้นจึงศึกษาหาวิธีที่มีประสิทธิภาพและเสียค่าใช้จ่ายต่ำและเป็นวัชธุรรมชาติจึงใช้กกสามเหลี่ยม(*Scirpus grossus* L.f.) และบอน(*Colocasia esculenta* Schott) ซึ่งเป็นพืชที่หาได้ทั่วไปในท้องถิ่น สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว มีความปลอดภัยในการนำมาใช้เป็นตัวกลาง และมีโครงสร้างที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้เป็นการดูดซับ นอกจากนี้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล เพื่อให้เกิดการลดปริมาณฟีนอลก่อนออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและพัฒนาใช้ในการดูดซับอนุพันธ์อื่นๆต่อไปในอนาคตได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยกกสามเหลี่ยมและบอน
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยกกสามเหลี่ยมและบอน
3. เพื่อนำกกสามเหลี่ยมและบอนที่ได้สภาวะเหมาะสมแล้วไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ

การตรวจเอกสาร

1. ฟีนอล

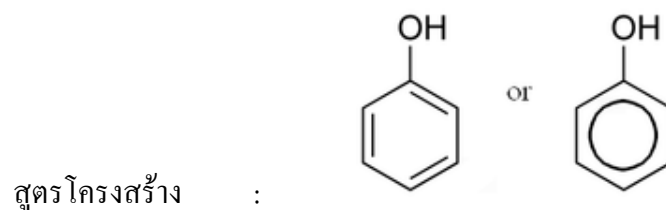
1.1 การบ่งลักษณะ

ชื่อสามัญ : phenol

ชื่อเคมี : phenol

ชื่ออื่น : acide carbolique

สูตรโมเลกุล: C_6H_6O (C 76.57%, H 6.43%, O 17.00%)



น้ำหนักโมเลกุล : 94.11

1.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล

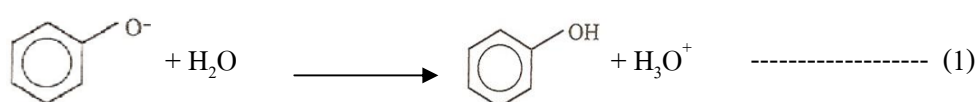
ฟีนอลเป็นผลึกไม่มีสีหรือสีขาว ถ้าไม่บริสุทธิ์จะมีสีชมพูอ่อนๆ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดูดความชื้น ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนจึงมีชื่อเรียกที่รู้จักกันทั่วไปว่ากรดคาร์โบลิก (carbolic acid) คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล แสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล		
จุดหลอมเหลว	40.85°C	Merck, 1996
จุดเดือด	182 °C	Merck, 1996
จุดวาบไฟ	85°C (open cup) 79°C (closed cup)	Verschueren, 1996 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

1.3 การกระจายตัวของฟีนอล (คณิตา, 2542)

ฟีนอลที่พบในสิ่งแวดล้อมไม่ได้มีเพียงสปีชีส์เดียว โดยจะพบอยู่ในรูปสปีชีส์ใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดังปฏิกิริยาที่(1)



ในกรณีที่มีน้ำมีค่า pH มากกว่า pK_a ของฟีนอล ภายใต้สภาวะดังกล่าวสมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวาเนื่องจากมี H_3O^+ น้อย ทำให้ฟีนอลอยู่ในรูปฟีนอเลต ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$) เป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้ามพบว่าถ้ามีค่า pH น้อยกว่า pK_a ฟีนอล สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางซ้ายเนื่องจากมี H_3O^+ มาก ทำให้ฟีนอลอยู่ในรูปฟีนอล ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)

องศาการแตกตัวของกรดอ่อน(Degree of dissociation weak acids, α) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงสัดส่วนการกระจายตัวของสปีชีส์ของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะต่างๆ และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2)

$$\alpha = \frac{\text{ความเข้มข้นของอนุโมลกรดที่แตกตัวออกมา}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \quad \text{-----} \quad (2)$$

α_0 = ใช้สำหรับอนุโมลที่ไม่มีการเสีย H^+

α_1 = ใช้สำหรับอนุโมลที่มีการเสีย H^+

ในกรณีที่สารอินทรีย์เป็นกรดโมโนโปรติก ค่า α_0 และ α_1 สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่า K_a ของสารและค่า pH ของสารละลาย โดยใช้สมการ

$$\alpha_0 = \frac{[H^+]}{[H^+] + K_a} \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{K_a}{[H^+] + K_a} \quad \text{-----} \quad (4)$$

1.4 การนำไปใช้ประโยชน์

โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ฟีนอลทั่วโลกในปี ค.ศ. 2001 มากถึง 7.8 ล้านตัน (Kujawki *et al.*, 2004) ซึ่งในโรงงานส่วนใหญ่ใช้ฟีนอลในการผลิตฟีนอลเรซินบิสฟีนอล A คาโปแลมแท้ม และผลิตภัณฑ์ตัวอื่นๆ เช่น อัลคิลฟีนอล สีย้อม อินดิเคเตอร์ ในห้องปฏิบัติการจะใช้ฟีนอลเป็นสารรีเอเจนต์ และใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ (Disinfectant) เป็นสารละลายเดี่ยวหรือสารละลายผสมกับยาฆ่าเชื้อโรคตัวอื่น ฟีนอลมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย (Bacteriostatic) มีความเข้มข้น 0.2 % มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Bacteriocide) ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1% และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราได้ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1.3% นอกจากนี้ ยังอาจใช้ในการผลิตสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น ครีซอล ไชนีนอล เป็นต้น

มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และยังใช้เป็นตัวทำละลายเพื่อสกัดสารประกอบอะโรมาติก น้ำทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมันที่มีฟีนอลปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในส่วนต่างๆ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Crude desalting)

การกลั่นลำดับส่วน(Crude oil fractionation) การดึงธาตุคาร์บอนออก(Carbon rejection) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมัน(Isomerization unit) เป็นต้น

1.5 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม

ฟินอลเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจากแหล่งต่างๆ คือ

1.5.1 อุตสาหกรรม จากกระบวนการผลิตและการใช้ฟินอลในการผลิตสารเคมีชนิดต่างๆ

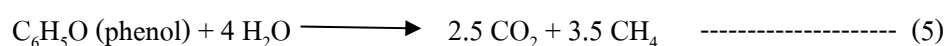
1.5.2 บ้านเรือนและห้องปฏิบัติการ จากการใช้ฟินอลเป็นสารฆ่าเชื้อ

1.5.3 รถยนต์ ไอเสียรถยนต์มีฟินอล ผสมกันอยู่เล็กน้อยที่ความเข้มข้น 1.2-7.7 มิลลิเมตร/ลูกบาศก์เมตร (Verschuere, 1996)

1.5.4 การย่อยสลายของเบนซินโดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในอากาศ (IPCS, 1994)

1.6 การเปลี่ยนแปลงของฟินอลในสิ่งแวดล้อม

การย่อยสลายโดยชีวภาพและการเปลี่ยนรูปโดยชีวภาพ (biodegradation and biotransformation) ฟินอลเป็นสารที่ถูกย่อยสลายโดยชีวภาพ (biodegradable) ได้อย่างรวดเร็ว จากการศึกษาโดยวิธี static flask-screening method พบว่าฟินอลในน้ำเสียชุมชนที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ถูกย่อยสลายโดยชีวภาพได้หมดภายใน 2 สัปดาห์ ซึ่งฟินอลถูกย่อยสลายโดยชีวภาพในสิ่งแวดล้อมในสถานะที่ขาดออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน ดังสมการ



การย่อยสลายของฟินอลเป็นการย่อยสลายจนได้ธาตุ (mineralization) ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ความเข้มข้นของ ฟินอลตั้งแต่ 20 มิลลิกรัม/ลิตรจนถึง 200 มิลลิกรัม/ลิตร

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

1.7 ความเข้มข้นในสิ่งแวดล้อม

1.7.1 การสลายและการคงสภาพ

การแตกสลายของฟีนอลในอากาศเกิดโดยปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลalkoxyl และ peroxy ทั้งนี้ ปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล มีความสำคัญที่สุด การแตกสลายทางชีวภาพของฟีนอลในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดินเกิดขึ้นได้ทั้งใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในสิ่งแวดล้อมในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม

สิ่งแวดล้อม	ค่าครึ่งชีวิต(half-life, t _{1/2})	คำอธิบาย
อากาศ	2.28 ชั่วโมง-22.8 ชั่วโมง	ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในอากาศ คำนวณจากปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ hydroxyl ในอากาศซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง
น้ำผิวดิน	5.3 ชั่วโมง-56.5 ชั่วโมง (0.22วัน-2.4วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในน้ำผิวดิน คำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน
น้ำใต้ดิน	12 ชั่วโมง-168 ชั่วโมง (0.5วัน-7วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลในน้ำใต้ดิน คำนวณจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำแบบใช้ออกซิเจน
ดิน	24 ชั่วโมง-240 ชั่วโมง (1วัน-10วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของฟีนอลดิน คำนวณจากการศึกษา aerobic soil die-away study

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2542)

1.7.2 ความเข้มข้น

ฟินอลเป็นสารที่ปนเปื้อนในอากาศบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น หรือบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ โดยตรวจไม่พบหรือพบที่ความเข้มข้นต่ำมากในอากาศบริเวณเขตชนบท ทั้งนี้เนื่องจากฟินอลสลายตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ ฟินอลที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติอยู่ในปริมาณต่ำ ทั้งนี้เพราะฟินอลถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 5.3 – 5.6 ชั่วโมงเท่านั้น รายงานฟินอลที่ตรวจพบแม่น้ำในประเทศเนเธอร์แลนด์มีความเข้มข้น 2.5-6.5 ไมโครกรัม/ลิตร, 0.3 ไมโครกรัม/ลิตร สำหรับทะเลสาบ และ 1.5 ไมโครกรัม/ลิตร สำหรับบริเวณปากแม่น้ำ ความเข้มข้นของฟินอลในแม่น้ำสหรัฐอเมริกาอยู่ในระดับใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.5 ไมโครกรัม/ลิตร

1.7.3 การรับสารของมนุษย์

โดยอาศัยหลักการของการประเมินความเสี่ยง (risk assessment) รายงานค่า reference dose ของฟินอลโดยการกิน (RfDo) เท่ากับ 6.00×10^{-1} มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน

1.8 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในสิ่งแวดล้อม

1.8.1 การดูดซึม

ฟินอลถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของคนและสัตว์ได้อย่างรวดเร็วโดยทุกวิถีทางที่ได้รับ คือ โดยการกิน การหายใจ และทางผิวหนัง จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าอัตราการดูดซึมผ่านทางผิวหนัง ขึ้นอยู่กับความกว้างของบริเวณที่ได้สัมผัส และการดูดซึมได้ดีขึ้นอยู่ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น และพบว่าฟินอลถูกดูดซึมได้เร็วที่สุดในลำไส้ใหญ่ของสัตว์ทดลอง รองลงมาได้แก่ การดูดซึมในลำไส้เล็ก ส่วนอัตราการดูดซึมในกระเพาะอาหารจะช้ากว่ามาก ฟินอลถูกดูดซึมผ่านทางผิวหนังอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์ต่อระบบต่างๆ ในร่างกาย การได้รับสัมผัสทางผิวหนังจึงอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ จากการศึกษาในหนูพบว่าอัตราการดูดซึมผ่านทางผิวหนังสูงถึง 66-80% ของขนาดที่ได้รับ และแกะ มีค่าสูงกว่า 95% ของปริมาณฟินอลที่ได้รับ (25 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว) และจากการทดลองในคนที่ได้รับฟินอลในขนาด 6-20 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยการสูดดมเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือในรับสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณการดูดซึมสูงถึง 70-80% ของขนาดที่ได้รับฟินอลที่ระดับความเข้มข้น

ระหว่าง 5-10% สามารถทำให้โปรตีนของผิวหนังเสื่อมสภาพ (denature) ซึ่งจะไปขัดขวางการดูดซึมได้ แต่อย่างไรก็ตามสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโปรตีนกับฟีนอลไม่คงทนและเมื่อฟีนอลแยกตัวหลุดออกมาอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายในเวลาต่อมาได้

1.8.2 การแพร่กระจาย

ภายหลังการดูดซึมเข้าร่างกายฟีนอลจะแพร่กระจายไปตามเนื้อเยื่อแทบทุกชนิด โดยส่วนใหญ่จะพบฟีนอลในความเข้มข้นสูงที่ตับ นอกจากนี้พบการแพร่กระจายไปตามเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น ไต ม้าม ต่อมหมวกไต ต่อมธัยมัส ระบบประสาท ปอดและในกระแสเลือด เป็นต้น

1.8.3 การสะสมในร่างกาย

ฟีนอลและเมทาโบไลต์โดยเฉพาะที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ดีไม่พบรายงานการสะสมฟีนอลในร่างกาย

1.8.4 การขับออกจากร่างกาย

การศึกษาในมนุษย์พบว่า 90% ของฟีนอลที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายถูกขับออกทางปัสสาวะภายในเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนใหญ่พบในรูปของ phenyl sulfate (70%) และ phenyl glucuronide นอกจากนี้ยังตรวจพบ quinol sulfate และ phenyl glucuronide ในปริมาณเพียงเล็กน้อย และ/หรือเมทาโบไลต์ที่สามารถจับกับ macromolecules เช่น โปรตีนและ DNA

1.9 ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

1.9.1 พิษต่อสัตว์

ฟีนอลมีพิษปานกลางต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ค่า LD_{50} ในสัตว์กักตุนที่ได้รับฟีนอล ทางปาก มีค่าระหว่าง 300-600 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ค่า LD_{50} ในหนู rat (หนูพุกขาว) และกระต่ายที่ได้รับ phenol ทางผิวหนัง มีค่าเท่ากับ 670 และ 1,400 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามลำดับ LD_{50} ในหนู rat (หนูพุกขาว) ที่ได้รับโดยการฉีดเข้าช่องท้อง (intraperitoneal injection) มี

ค่าอยู่ในช่วง 127-223 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ค่า LD₅₀ ในสัตว์ทดลองสปีชีส์ต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า LD₅₀ ของฟิโนลในสัตว์ทดลอง

สปีชีส์	วิธีได้รับ	มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว	สัตว์ทดลอง
หนู	ทางปาก	300	
หนู	ทางปาก	340-530	2-7% น้ำ
	ทางปาก	445-520	น้ำ
	ทางปาก	400	น้ำ
	ผิวหนัง	670(570-780)	
	ฉีดเข้าช่องท้อง	127-223	น้ำ
กระต่าย	ทางปาก	400-600	2-7% น้ำ
	ผิวหนัง	850(600-1,200)	
	ผิวหนัง	1,400(740-2,670)	

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2542)

สัตว์ทดลองที่เสียชีวิตจากการได้รับฟิโนล ที่ความเข้มข้นสูงนั้นมีสาเหตุมาจากฤทธิ์ในการกดระบบประสาทส่วนกลางของฟิโนล ลักษณะอาการของการเกิดพิษจากฟิโนลไม่ขึ้นกับวิธีการได้รับสารเข้าสู่ร่างกาย ความเป็นพิษที่พบในสัตว์ทดลอง ได้แก่ ประสาทและกล้ามเนื้อไวต่อการกระตุ้นมากเกินไป (neuromuscular hyperexcitability) เช่น ประสาทกล้ามเนื้อกระตุกและชัก อัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้นในระยะแรกและกลับช้าลงและไม่เป็นจังหวะ สมองเสื่อม ความดันโลหิตสูงเล็กน้อยในตอนแรก ซึ่งต่อมาจะลดลงมาก น้ำลายไหล (salivation) หายใจขัด และอุณหภูมิของร่างกายลดลง มีฤทธิ์กัดผิวหนังและเยื่อในลำคอและทางเดินอาหารเมื่อกินฟิโนลเข้าไป (Deichmann and Keplinger, 1963) นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของปอดและเส้นใยประสาท ทำลายเนื้อเยื่อของตับ ไต และต่อมขั้วมัสและยับยั้งการตอบสนองของรูม่านตาต่อแสง รูม่านตาคำหนดเล็กผิดปกติ (meiosis) (Schlicht *et al.*, 1992)

1.9.2 พิษต่อมนุษย์

ระดับความเป็นพิษ (range of toxicity) มีรายงานการเสียชีวิตในมนุษย์ (ผู้ใหญ่) ที่ได้รับฟีนอล โดยการกินในปริมาณเพียง 1 กรัม ส่วนการได้รับสัมผัสทางผิวหนังอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้เช่นกัน พบผู้ป่วยเสียชีวิตจากการกรดของสารละลาย phenol (ความเข้มข้น 80-100%) ที่บริเวณแก้ม หิ้งศีรษะ สะโพก ต้นขา และอุ้งอวัยวะ (Turtle and Dolan, 1992) ผู้ป่วยอีกรายหนึ่ง ทำ 2-4-dichlorophenol บริสุทธิ์ หกรร่างกายเป็นบริเวณกว้างน้อยกว่า 10% ของพื้นที่ร่างกาย พบว่าผู้ป่วยชักและหมดสติภายในเวลา 20 นาที นอกจากนี้มีรายงานการเสียชีวิตจากการใช้สารละลายฟีนอลทาสะดือโดยมีผ้าพันแผลปิดทับสนิท (Hinkel and Kintzel, 1968) และผู้ป่วย 1 รายเสียชีวิตเมื่อใช้สารละลายฟีนอล สารละลายฟีนอลร้อยละ 2 โดยปริมาตร ทาแผลไฟไหม้เป็นบริเวณกว้างมากกว่า 30% ของพื้นที่ร่างกาย

พิษเฉียบพลัน ฟีนอล ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายไม่ว่าจะรับสารโดยการรับประทาน การสูดดมหรือสัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากฟีนอล มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรงทำให้เกิดเป็นแผลไหม้ในบริเวณที่ได้รับสัมผัสโดยตรง เช่น ช่องปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ตา และผิวหนัง หากเข้าตาอาจทำให้มีอาการตาสู้แสงไม่ได้ (photophobia) กระจกตาเป็นแผลหรืออาจถึงกับตาบอดได้ phenol ถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็วและอาจทำให้เสียชีวิตภายในเวลา 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) เช่น พบจุดสีน้ำตาลบนข้อนิ้ว หลายแห่งและมีรายงานในคนที่สัมผัสฟีนอล(8.5%)จากทำรายงานพบว่ามีผิวหนังด่างขาว (leukoderma) นอกจากนี้การใช้สเปรย์(spray) หรือยาอมที่มีส่วนผสมของฟีนอล อาจทำให้เจ็บคอ บ่อยๆ

1.10 ผลต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม

1.10.1 สิ่งมีชีวิตในน้ำ

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

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

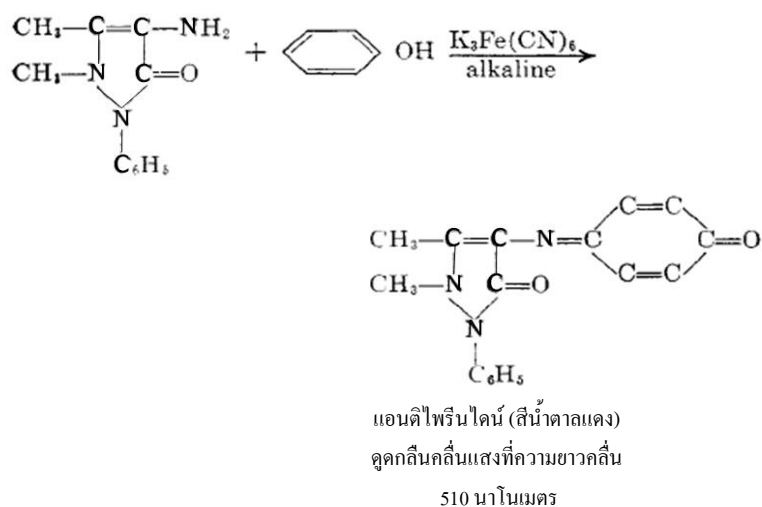
1.10.2 สิ่งมีชีวิตบนบก

การศึกษาเมตาโบลิซึมของฟินอล ในสัตว์บกชนิดต่างๆ นอกจากสัตว์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการพบว่าปฏิกิริยา conjugation มีความแตกต่างกัน (French *et al.*, 1974) รายงานว่าแมว (*Felis catus*) สิงโต (*Panthera leo*) ชะมดแอฟริกา (*Viverra civetta*) และ forest genet (*Genetta pardina*) ขับฟินอล ออกจากร่างกายในรูป conjugate กับ sulfate ทั้งหมดโดยไม่อยู่ในรูป conjugate กับ glucuronide ซึ่งตรงข้ามกับหนู rat (หนูพุกขาว) ที่ขับฟินอลออกในรูป conjugate กับ sulfate และ glucuronide ในอัตราส่วนร้อยละ 54 และ 42 ตามลำดับ ความแตกต่างในกระบวนการเมตาโบลิซึมในสัตว์ชนิดต่างๆ นี้เป็นหัวข้อสำคัญหนึ่งที่ใช้อธิบายความเป็นพิษของสารเคมีที่แตกต่างกันในสัตว์ชนิดต่างๆ

1.11 ดัชนีฟินอล (phenol index)

ดัชนีฟินอลบ่งบอกถึงฟินอล และอนุพันธ์ของฟินอลที่สามารถทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-AAP) เกิดเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine

ฟินอลถูกใช้เป็นตัวแทนของฟินอลและอนุพันธ์ของฟินอลในการเกิดปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีนและเฟอริกไซยาไนด์ไอออนในสภาวะที่เป็นเบส ได้สารละลายสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine ดังปฏิกิริยา

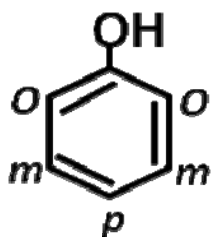


ภาพที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาของฟีนอล

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

เนื่องจากสารประกอบฟีนอลมีหลายชนิด ซึ่งอาจทำให้เราไม่สามารถทราบองค์ประกอบของน้ำเสียได้ล่วงหน้า จึงต้องใช้ฟีนอลเป็นมาตรฐานในการสร้างกราฟมาตรฐานและสารประกอบฟีนอลใดๆ ก็จะถูกรายงานในรูปฟีนอลนี้ทั้งสิ้นวิธีนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีฟีนอลในช่วง 0-50 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร (ธงชัย และวิบูลย์ลักษณ์, 2540)

โดยใช้ 4-อะมิโนแอนติไพรีน(4-AAP) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี เป็นวิธีที่มีความสะดวกและไม่ซับซ้อนนักแต่มีข้อจำกัดของการใช้วิธีนี้คือ ไม่สามารถตรวจหาสารประกอบสำหรับอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีหมู่ฟังก์ชัน แอลคิล ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$), เอริล (aryl, C_6H_5), ไนโตร (NO_2), ไนโตรโซ ($\text{N}=\text{O}$) และแอลดีไฮด์ (-CHO) ที่เกาะอยู่บนตำแหน่งพารา(para position) ของฟีนอล จะไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน โดยที่ตำแหน่งพาราในฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจะทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน(Realinin, P.A. 1981)



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

ตารางที่ 4 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
b) Diphenols (ฟีนอลที่มี OH 2 หมู่)	
Pyrocatechol	1.30

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Compound	4-AAP method $\epsilon' \times 10^4$
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-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: Tanabe *et al.* (1989)

1.12 มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ

มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลในประเทศไทยและต่างประเทศ
แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 กฎหมายและข้อกำหนดบางประเภทใช้ควบคุมฟีนอลในประเทศไทยและประเทศต่างๆ

ประเทศ	มาตรฐาน
ไทย	- o กระทรวงอุตสาหกรรมออกพระราชบัญญัติโรงงานให้น้ำทิ้งจากโรงงานมีสารประกอบฟีนอลไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตรงกับพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ที่ออกโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม - o นอกจากนี้ยังมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมกำหนดให้มีฟีนอลไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และคุณภาพน้ำตามแหล่งผิวดิน - o ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมกำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 เพื่อการอนุรักษ์สัตว์น้ำ เพื่อการประมง กิจกรรมและกีฬาทางน้ำต้องมีฟีนอลไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
ประชาคมยุโรป (EEC)	o กฎหมายกำหนดให้น้ำที่ใช้ชำระร่างกายต้องมีฟีนอลเท่ากับ หรือน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
ญี่ปุ่น	o กฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นของน้ำดื่มไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากแหล่งมลพิษที่มีสารประกอบฟีนอลได้สูงสุด 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
เม็กซิโก	- o กฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำทะเลชายฝั่งและบริเวณปากแม่น้ำเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร - o กฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบฟีนอลในแหล่งน้ำสำหรับดื่ม เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร - o แหล่งน้ำสำหรับพักผ่อน แหล่งน้ำสรงน้ำสำหรับสัตว์และพืชเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542)

2. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัว จากนั้นจึงนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วย

จุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

2.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

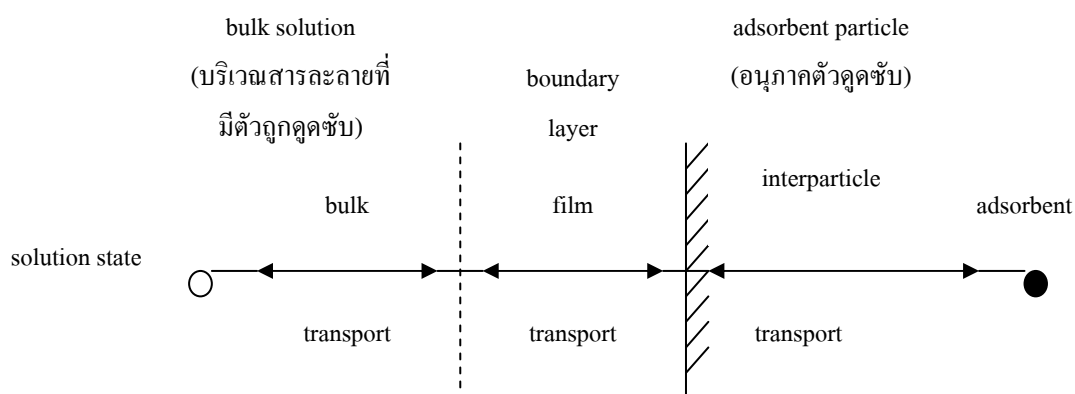
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

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

การยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

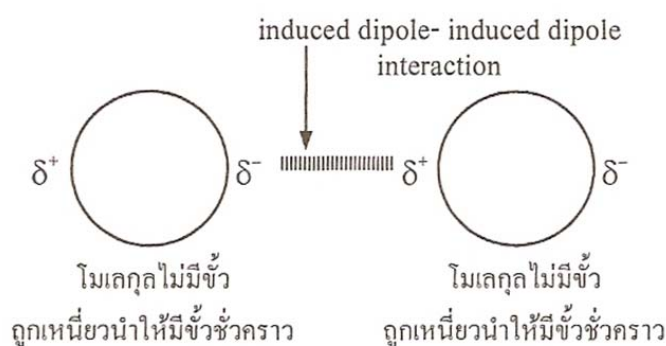
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

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

ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

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

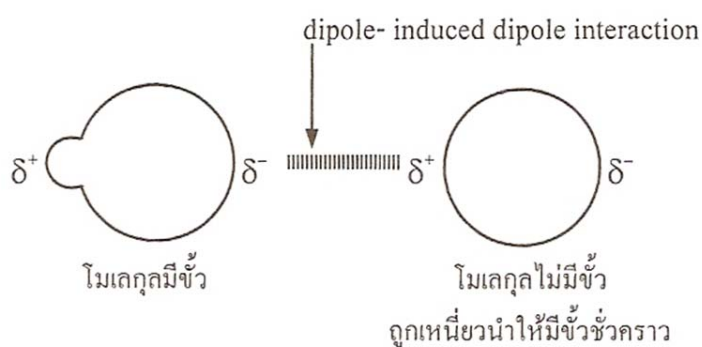
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย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



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

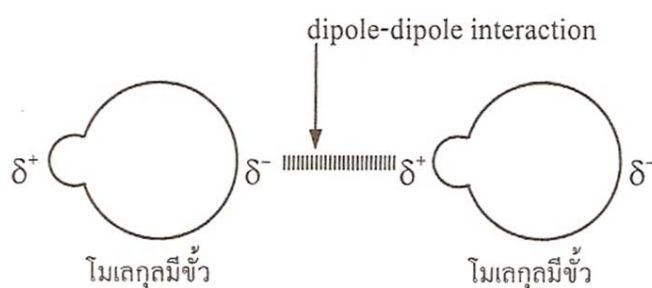
ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ค. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวก

จึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

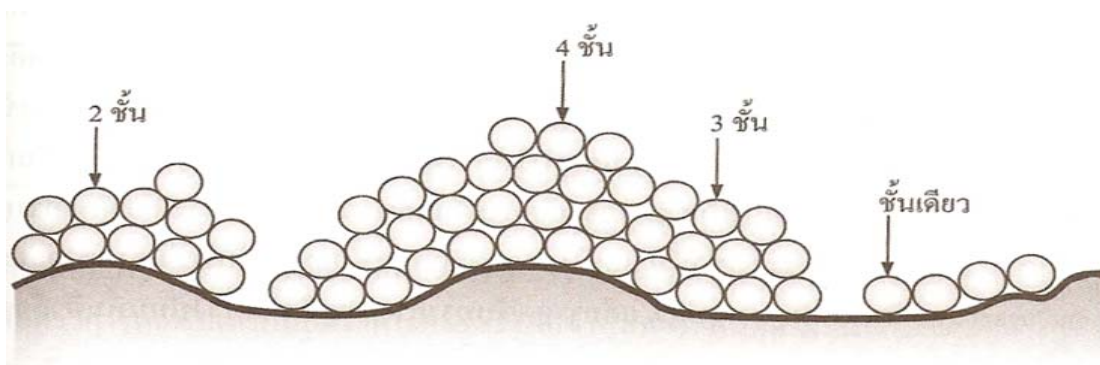
แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์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

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

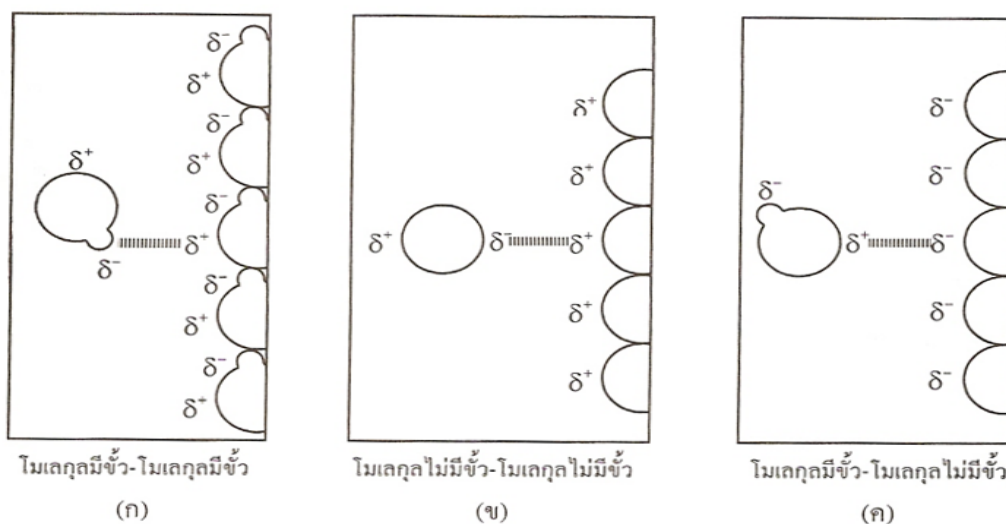
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

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) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้า และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ อย่างไรก็ตามหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



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



ภาพที่ 8 การชี้คเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 6 ลักษณะการชี้คเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ มีดังนี้

ก. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ข. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ค. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยประมาณ 2-10 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุนเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่ปรากรูพรุนมีขนาดเล็กก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่าแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

กับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกขับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

2.5.3 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

2.5.4 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.5.5 อัตราเร็วการป่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การป่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการป่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการป่นกววนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2.5.6 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

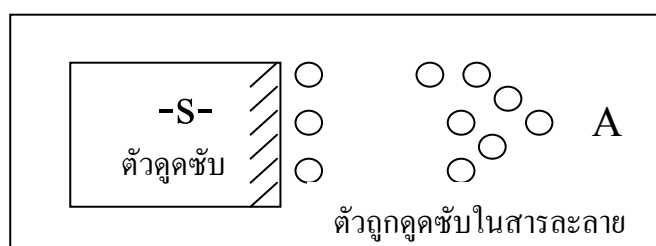
2.5.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.5.7 เวลาสัมผัส

เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอีกเลย

2.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 9 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)

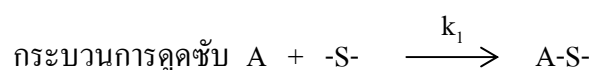
เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นตอนต้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ระบบเข้าสู่สมดุล ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายซับออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมล/ลิตร ในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

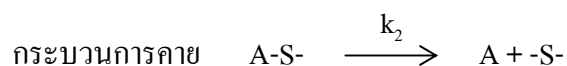
(1 - q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

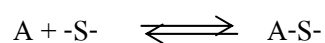
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล $K = \frac{q}{C} \text{----- (7)}$

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมา
ของตัวดูดซับ จากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ
(หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mol/g และ mg/kg)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ (หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร)

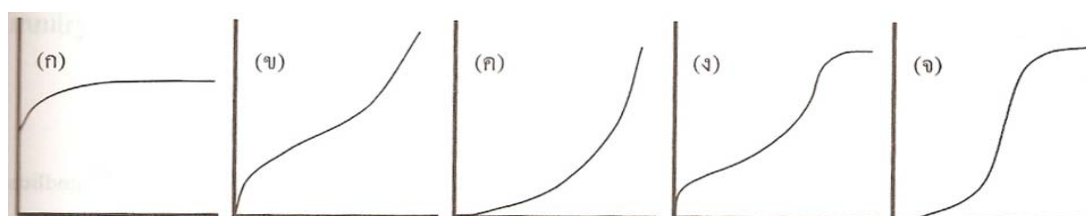
C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย (หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l)

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

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

จากภาพที่ 8 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

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

$$q = KC^{1/n} \quad \text{-----} \quad (8)$$

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----} \quad (9)$$

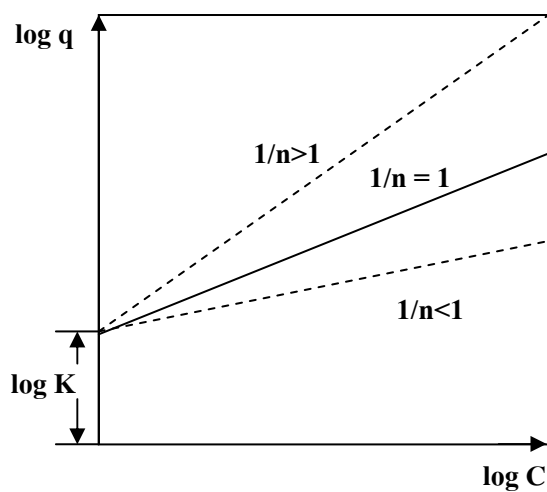
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (mg/l)

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



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

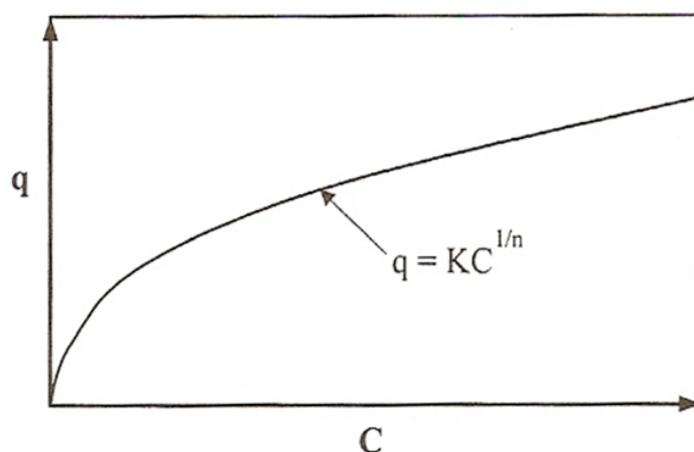
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

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

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

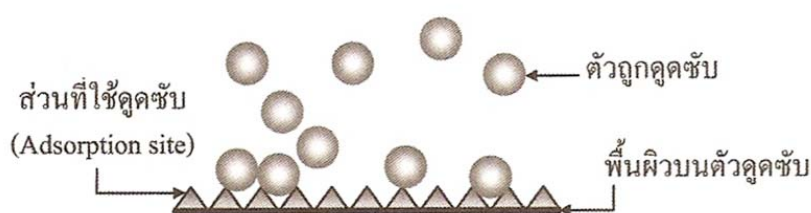
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (8) ได้ดังภาพที่ 10 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

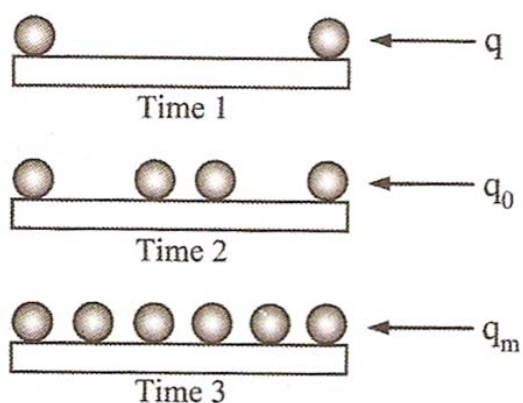
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ ไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 13 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 14 การดูดซับของแก๊สเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว
ที่มา: นิพนธ์ และกณิดา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (5) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (5) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \text{----- (10)}$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (10) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

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

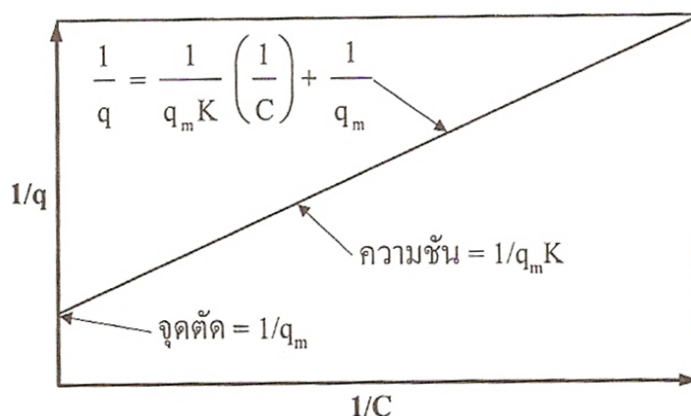
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

จุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)

2.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

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

2.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตร/กรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

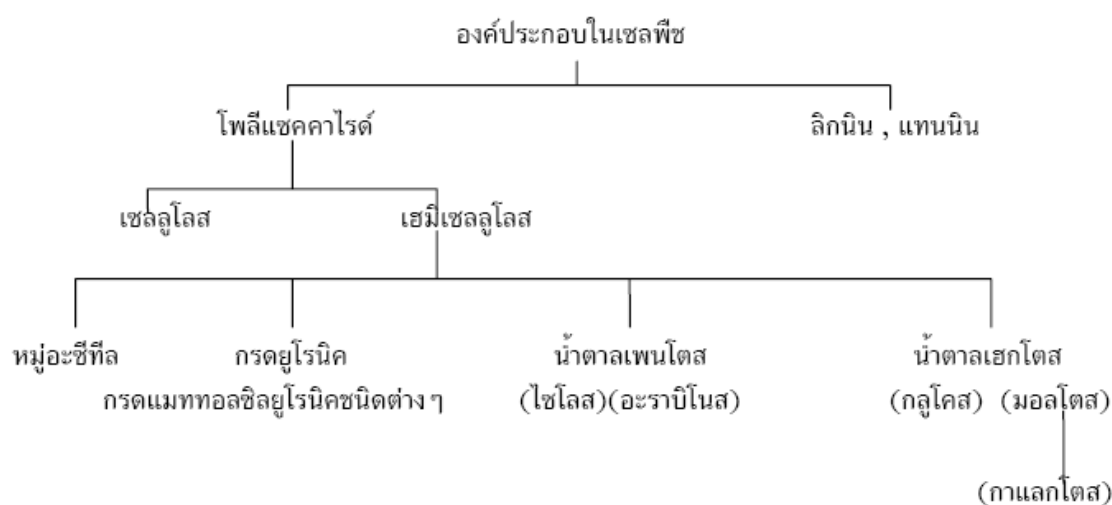
2.8.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) เถ้าแกลบดำ เป็นต้น

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

3. องค์ประกอบในเซลล์พืช

องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเซลล์พืช แบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ลิกนิน (lignin) และ โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) โดยในส่วนของโพลีแซคคาไรด์สามารถแบ่งย่อยได้เป็นเซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 16 การแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช

ที่มา: จันทรฉาย (2541)

3.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็น โพลีแซคคาไรด์ สารประกอบที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เพราะเป็น สารประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับ ผนังเซลล์พืช เช่น เนื้อไม้จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 50 นอกจากนั้นยังเกิดใน รูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย จัดเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุล

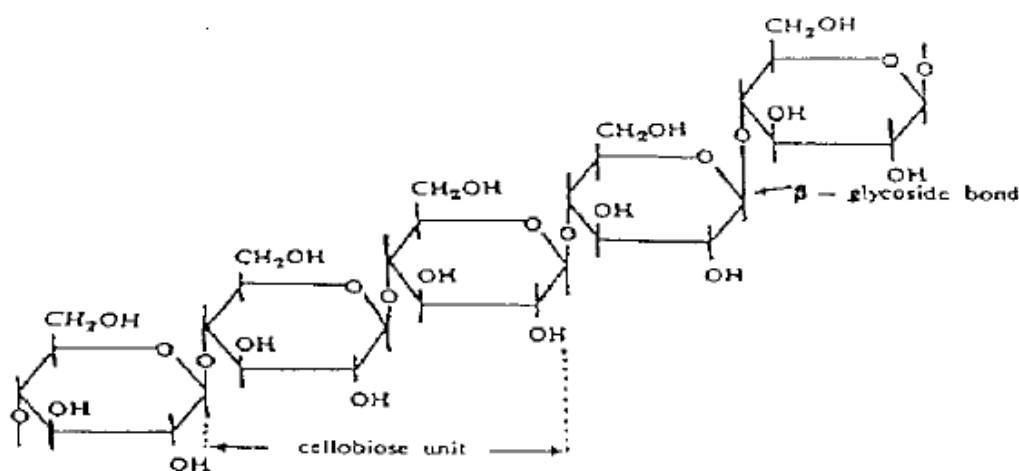
ของ D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วย D-glycoside และ ความยาวของโซ่จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 200 ถึง 2,500 หน่วย ซึ่งถ้าไฮโดรไลสเซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลโลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลสเต็มที่จะได้ D-glucose แสดงในภาพที่ 8

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ ไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายด่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรด หรือด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่าง ได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

3.1.1 α - cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 17.5

3.1.2 β - cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 17.5

3.1.3 γ - cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 17.5 และสารละลายเจือจาง

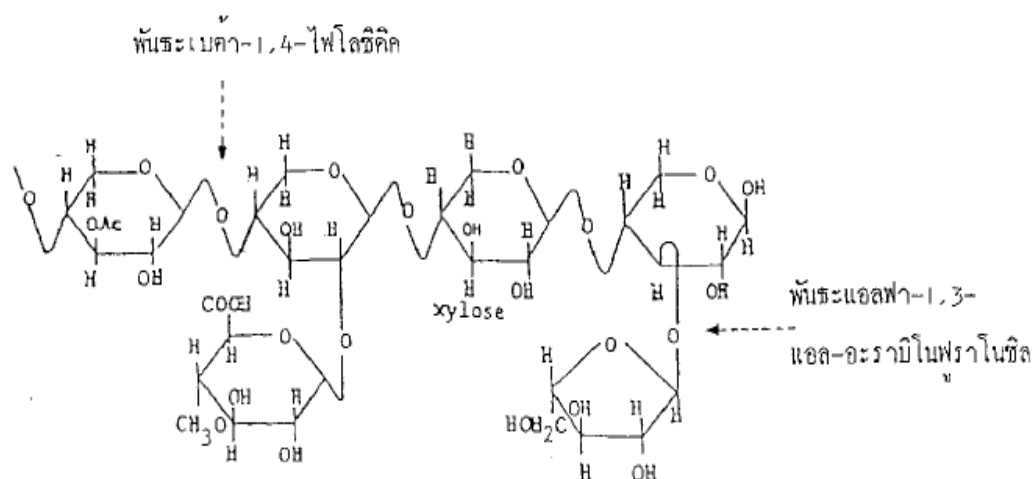


ภาพที่ 17 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: จันทรฉาย (2541)

3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตสที่มีลักษณะเป็น heterogeneous โดยประกอบด้วยโพลิแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดโมเลกุลมีความยาว 30 – 50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลัก คือ xylan เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลสที่ต่อกันด้วยพันธะเบตา-1,4-ไซโลซิดิก (β -1,4-xylosidic linkage) เป็นเส้นตรงเฉพาะไซโลสอย่างเดียว หรือมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลิแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆป็นอยู่แสดงในภาพที่ 9 เฮมิเซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในด่างและถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส



ภาพที่ 18 โครงสร้างของไซแลน (Ac = Acetyl Group)

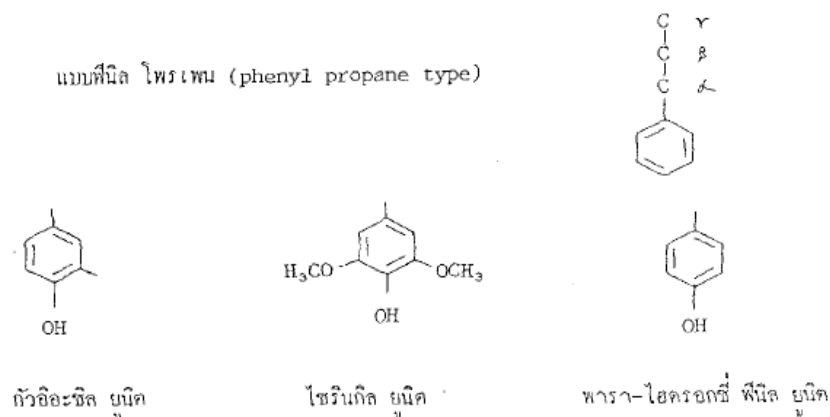
ที่มา: จันทรฉาย (2541)

3.3 ลิกนินและแทนนิน

ลิกนินและแทนนินจัดอยู่ในพวก heterogeneous organic polymer จัดอยู่ภายในโครงสร้างของพืชโดยอยู่รอบๆเซลลูโลสและป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซิล(-OCH₃) หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และส่วนที่เป็นฟีนอลิก โดยปกติไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียวแต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบ ประกอบด้วยหน่วยต่างๆ เหล่านี้ คือ ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane) กัวอีอะซิล ยูนิ

(guaiacyl unit) ไซริงกิล ยูนิต (syringyl unit) และพารา-ไฮดรอกซีฟีนิล ยูนิต (para-hydroxyphenyl unit) ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนินแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 19 หน่วยย่อยในโครงสร้างลิกนิน

ที่มา: จันทรฉาย (2541)

4. พืชที่ทำการศึกษา

4.1 กกสามเหลี่ยม (ดวงพร, 2544)

วงศ์ : Cyperaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Scirpus grossus* L.f.

ชื่อสามัญไทย : กกสามเหลี่ยม (กรุงเทพฯ, ภาคกลาง) กกคมบาง
(ประจวบคีรีขันธ์) มะนิ่ว มะเนี้ยว (เหนือ) หัวกระดาน หัวหิน (ภาคตะวันตกเฉียงใต้)

4.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลำต้น ตั้งตรงและมีไหลขนานไปตามพื้นดิน ลำต้นตามขวางเป็นรูปสามเหลี่ยม
ที่บริเวณฐานหนา พุ่มต้นสูงประมาณ 1-2 เมตร

ใบ ค่อนข้างแข็ง แผ่นใบแคบ เรียวยาวรูปใบหอก ขอบใบเรียบ ใบยาว
ประมาณ 50-100 ซม.

ดอก ช่อดอกเรียงแบบซี่มเชิงหั่น (corymbosus) ยาว 10-20 ซม. ประกอบด้วยช่อดอกย่อย ทั้งมีก้าน และไม่มีก้านดอก ดอกย่อยยาว 5-10 ซม.

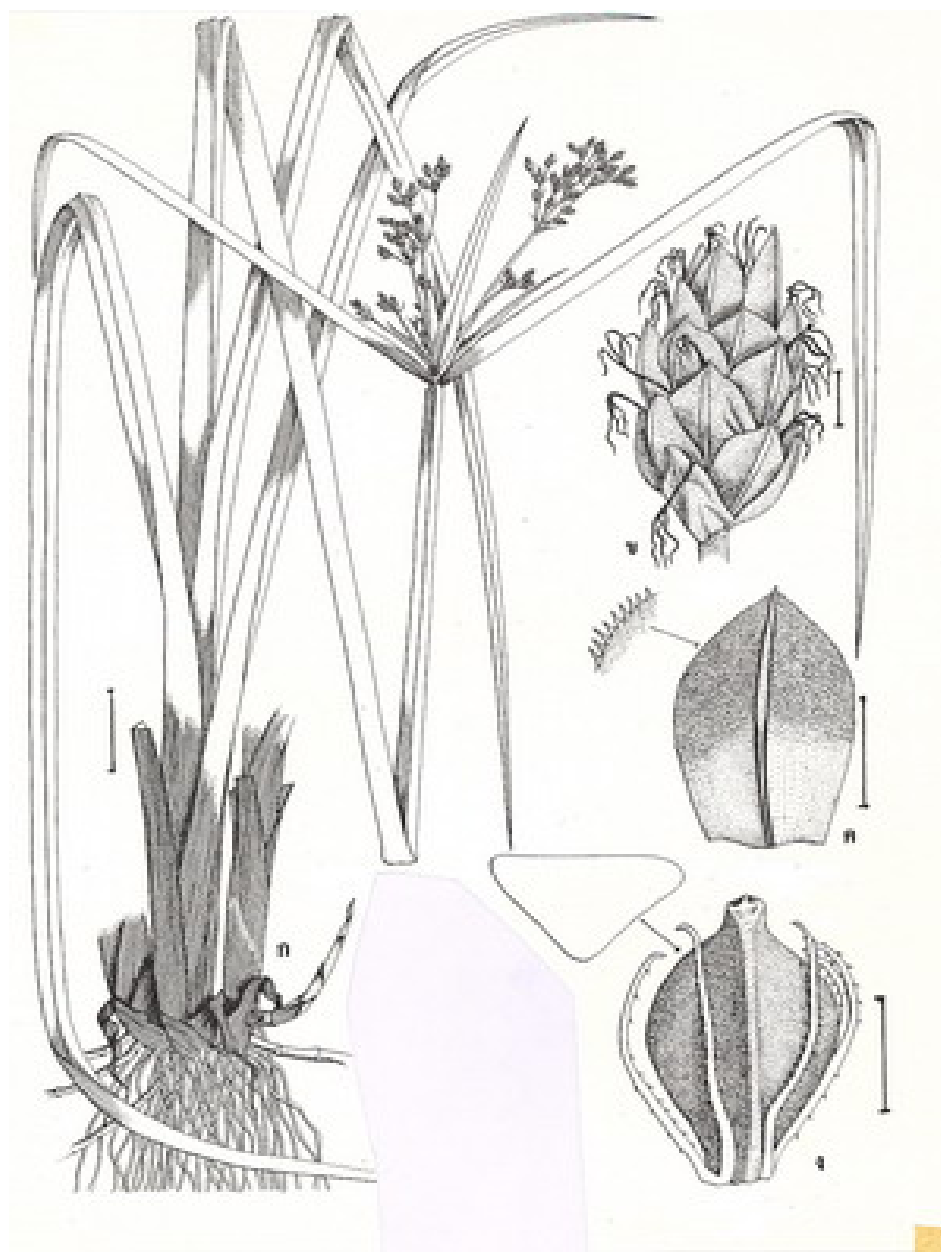
ผล แบบผลแห้งเมล็ดล่อน (achene)

4.1.2 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

ชอบที่ชื้นแฉะ ที่น้ำขัง ในนาข้าว พบมากในหนองน้ำ และที่มีน้ำท่วมขังแพร่กระจายทั่วประเทศไทย เป็นวัชพืชหลายฤดู ขยายพันธุ์โดยใช้ไหลไม่ค่อยพบว่าขยายพันธุ์โดยเมล็ด

4.1.3 ประโยชน์

ใช้ทอเสื่อ ฝ้ายเปดานหรือหลังคาบ้าน



ภาพที่ 20 กกสามเหลี่ยม (*Scirpus grossus* L.f.)

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

4.2 บอน (ดวงพร, 2544)

ชื่อวงศ์ : Araceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Colocasia esculenta* Schott

ชื่อสามัญไทย บอน กล้วยไท ลิ้นปี่ กล้วยบ้อง พอ บอนเขียว บอนจินดำ บอนน้ำ ผีอก

4.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลำต้น มีไหล (stolon) แตกกอรอบๆ มีรากแตกออกเป็นกระจุกทางด้านล่าง

ใบ เป็นใบเดี่ยวมีขนาดใหญ่ แผ่นใบกว้างและอวบน้ำ ใบแตกออกรอบต้น จึงทำให้มีลักษณะเป็นกอ โคนก้านใบแผ่กว้างหุ้มประกบกันไว้ ก้านใบยาวอวบพองจึงทำให้ลอยน้ำได้

ดอก ช่อดอกขนาดเล็กชนิดช่อเชิงลดมีกาบ (spadix) เกิดบริเวณซอกใบ มีกาบหุ้มช่อดอกสีน้ำตาลห่อหุ้มช่อดอก ตอนล่างของดอกตัวเมียไม่มีกลีบดอก

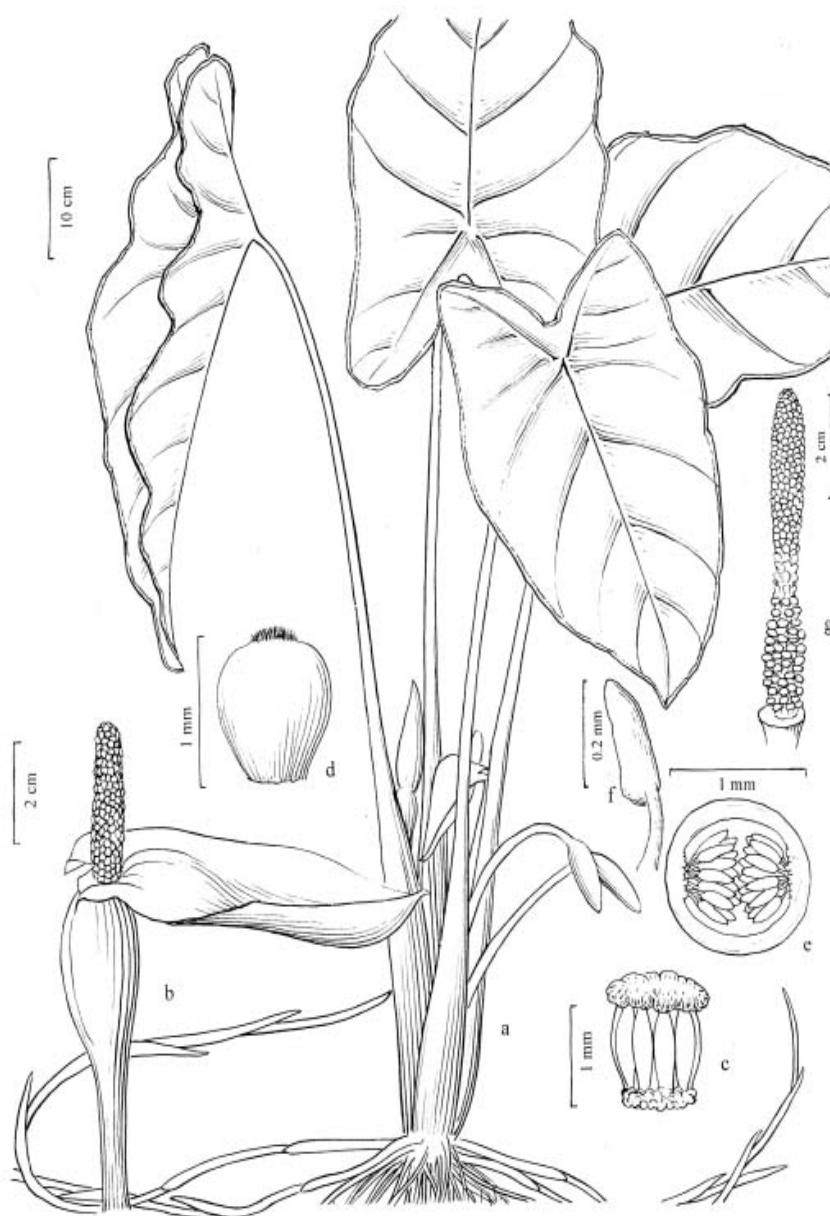
ผล ผลมีเนื้อหลายเมล็ด (berry) สีเขียว ภายในมีเมล็ดหลายเมล็ด

4.2.2 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

เป็นพืชลอยน้ำ เจริญเติบโตเป็นกอ ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดและส่วนของลำต้น พบขึ้นตามแหล่งน้ำทั่วประเทศไทย

4.2.3 ประโยชน์

หัว เป็นยาระบาย ขับปัสสาวะ ขับน้ำนม ห้ามเลือด ลำต้น ใช้พอกแผล น้ำจากลำต้นต้มน้ำ แก้พิษแมลงป่อง แก้ไข้ น้ำจากก้านใบ ยาห้ามเลือด ยากระตุ้น และทำให้เลือดมาเลี้ยงบริเวณนั้นมาก ทำให้บวมแดง ขาง กำจัดหูด



ภาพที่ 21 บอน (*Colocasia esculenta* Schott) a. ลักษณะต้น b. ลักษณะช่อดอก c. ลักษณะอับ
เรณูชิดกัน d. ดอกตัวเมีย e. ภาคตัดขวางของรังไข่ f. ส่วนขยายของรังไข่ g. ช่อดอก
แบบช่อเชิงลดมีกาบ

ที่มา : Chun-Lin Long and Liu Ke-Ming (2001)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กานดา และคณะ (2545) ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เถ้าแกลบดำ ชางเป็นวัสดุเหลือทิ้งในทางการเกษตรมาเป็นตัวดูดซับสารฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์จากการทดลองได้ใช้วิธีแบบครั้ง โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 10.75 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณเถ้าแกลบดำ 4 กรัม สภาพความเป็นกรดที่ 7 ใช้รอบความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตรวจหาปริมาณฟีนอลที่เหลือในน้ำทิ้งโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี พบว่า มีค่าปริมาณการดูดซับฟีนอล 91.78% และจากผลการศึกษาแบบคอลัมน์โดยใช้ คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรบรรจุด้วยเถ้าแกลบ 5 และ 10 กรัม พบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าถึง 73.98 และ 99.16 ตามลำดับ

จตุพร และคณะ (2545) ทำการศึกษาการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ ผักตบชวา โสน และบอน ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำพืชมาล้างให้สะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.3 มิลลิเมตร นำพืชที่ได้มาอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาระยะเวลา ค่า pH ประสิทธิภาพการดูดซับที่มวลพืชต่าง ๆ กัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของพืชทั้ง 3 ชนิดที่มวลพืช 1 กรัมเท่ากัน ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่า จำนวนวันที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของผักตบชวาและบอนสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ 4 วัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 87.04% และ 58.80% ตามลำดับ ส่วนจำนวนวันที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของโสนคือ 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 87.59% ค่า pH วันที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของผักตบชวา คือ pH 7 สามารถดูดซับได้ 77.04% บอนและโสนสามารถดูดซับได้ดีที่ pH เท่ากันคือ 5 โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 70.78% และ 83.72% ตามลำดับ ที่มวลพืช 1 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลของโสนสูงกว่าผักตบชวาและบอน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 61.45%, 45.80% และ 40.37% ตามลำดับ ส่วนการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับที่น้ำหนักพืชต่าง ๆ กัน พบว่า สมการ Freundlich ของผักตบชวา คือ $y = 0.5858x + 0.3656$ ที่ $R^2 = 0.398$ สมการของบอน คือ $y = 1.2809x + 0.6837$ ที่ $R^2 = 0.3433$ สมการของโสน คือ $y = 0.7114x + 0.3812$ ที่ $R^2 = 0.8668$ และมีค่าคงที่ที่คำนวณได้ของผักตบชวา โสน และบอน คือ 2.3206, 4.8273 และ 2.4055 ตามลำดับ

นุกดา และคณะ (2546) ทำการศึกษาการถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของ จอกหูหนูและผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพล ต่อการดูดซับฟีนอล โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพีช ปริมาณมวลแห้งของพีชเวลาที่ ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล และค่า pH ผลการศึกษาพบว่าจอกหูหนูมี ความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ $91.8(\pm 6.73)\%$ เมื่อใช้มวลแห้งของพีชปริมาณ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่ pH 7 มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเขย่าเป็นเวลา อย่างน้อย 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูขึ้นอยู่กับชนิด อนุพันธ์ของฟีนอลที่ใช้ โดยความสามารถในการดูดซับสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > ฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล ในกรณีผักตบชวา ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ปริมาณของพีช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลจากการศึกษา พบว่าผักตบชวาสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ $48.1(\pm 7.04)\%$ เมื่อใช้มวลแห้งของพีชปริมาณ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและทำการเขย่าเป็นเวลา อย่างน้อย 1 ชั่วโมงโดยความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล > ฟีนอล จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่า สมดุลของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถอธิบายได้โดยไอโซเทอร์มของฟ รุนดลิช ไอโซเทอร์มการดูดซับของจอกหูหนูคือ $y = 1.5953x + 0.4154$ ที่ $R^2 = 0.7804$ และไอโซเท รอร์มการดูดซับของผักตบชวาคือ $y = 4.3598x + 2.3775$ ที่ $R^2 = 0.6071$ จากการคำนวณสมการไอโซ เทอร์มของการดูดซับสำหรับพีชทั้งสองชนิด ค่า K และ $1/n$ สำหรับจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ 0.38 และ เท่ากับ 1.5953 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า K และ $1/n$ สำหรับผักตบชวามีค่าเท่ากับ 0.004 และเท่ากับ 4.3598 ตามลำดับ

สันทัต (2544) ได้ทำการศึกษาการใช้ระบบบำบัดแบบ GAC-SBR ในการกำจัดฟีนอลและ สารอินทรีย์ ซึ่งในการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล และ COD ที่สูงที่สุดของ GAC ในระบบ SBR มีค่าเท่ากับ 240 และ 761 มิลลิกรัมต่อ GAC 1 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่การดูดซับ ฟีนอลและ COD ในสภาวะปกติมีค่าเท่ากับ 213 และ 685.1 มิลลิกรัมต่อ GAC 1 กรัม ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและ COD ในวันที่ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดมีค่าร้อยละ 60 และ 50 ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไป 3 วันประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง สำหรับปริมาณ GAC ในระบบ SBR ที่เหมาะสมคือ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาเก็บกัก 1 วัน น้ำเสียที่ผ่านระบบ มี ค่า COD และ ฟีนอล เท่ากับ 16 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่ในระบบ SBR น้ำเสียที่ผ่าน ระบบมีค่า COD และ ฟีนอล เท่ากับ 122 และ 3.1 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากการทดลอง ระยะเวลาที่เก็บกัก 3, 5 และ 10 วันของน้ำเสียที่ผ่าน SBR พบว่ามีค่า COD เท่ากับ 48, 32 และ 16

มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และมีปริมาณฟีนอลเท่ากับ 0.35, 0.18 และ 0.018 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ที่เวลาเก็บกักเท่ากันน้ำเสียที่ผ่านระบบ GAC-SBR มีปริมาณ COD เท่ากับ 16, 14.5 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับและมีปริมาณฟีนอลเท่ากับ 0.08, 0.023 และ 0.018 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่า GAC ช่วยในการกำจัดฟีนอลและ COD ของระบบ SB

Aksu and Yener (1998) ได้ศึกษาการใช้มวลแห้งของตะกอนเร่งมาใช้ในการดูดซับ phenol, *o*-chlorophenol และ *p*- chlorophenol โดนมียปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ค่า pH เริ่มต้น, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบฟีนอลและหมู่แทนที่ ค่าสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ 86.1 มิลลิกรัมต่อกรัม *o*-chlorophenol ได้ 102.4 มิลลิกรัมต่อกรัม *p*- chlorophenol ได้ 116.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ในช่วง 1-3 และจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลเริ่มต้นก็ทำให้ค่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ผลการศึกษามีอิทธิพลของหมู่แทนที่พบว่า phenol *o*-chlorophenol และ *p*- chlorophenol มีค่าความจุในการดูดซับ 90%, 50% และ 59% ตามลำดับ

Calace *et al.* (2002) ศึกษาถึงการใช้ตะกอนกระดาษ (paper mill sludge) มาใช้ในการดูดซับ โดยสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลที่ทำการศึกษาคือ ฟีนอล, 2-คลอโรฟีนอล, 3-คลอโรฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล, 2-ไนโตรฟีนอล, 4-ไนโตรฟีนอล, 2,4-ไดคลอโรฟีนอล, 3,4-ไดคลอโรฟีนอล, 3,5-ไดคลอโรฟีนอล และ 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล พบว่าลำดับความสามารถในการดูดซับคือ 2-ไนโตรฟีนอล = 4-ไนโตรฟีนอล < 2-คลอโรฟีนอล < ฟีนอล < 4-คลอโรฟีนอล < 3-คลอโรฟีนอล < 2,4-ไดคลอโรฟีนอล < 3,4-ไดคลอโรฟีนอล = 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล < 3,5-ไดคลอโรฟีนอล ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมมติฐานของ Hill ซึ่งสมมติฐานให้พื้นผิวตัวดูดซับเป็น homogenous แสดงให้เห็นว่าตะกอนกระดาษสามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร

Rao and Viraraghan (2002) ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของ *Aspergillus niger* มาใช้ในการดูดซับฟีนอล พบว่าการใช้มวลแห้งของ *Aspergillus niger* ด้วยกรดซัลฟูริกที่มี pH 5.1 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ในการทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดฟีนอลได้ประมาณ 66% ที่ค่า pH เริ่มต้น 5.1 และความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

Rengaraj *et al.* (2002) ได้ศึกษาถึงการนำแอคติเวตเตดคาร์บอนที่ทำมาจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (Palm Seed Coat Carbon : PSCC) มาใช้ในการดูดซับฟีนอลเปรียบเทียบกับ Commercial

Activated Carbon (CAC) โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ เวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นฟีนอล ปริมาณตัวดูดซับ และ pH พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4-9 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ PSCC 2 กรัม และ CAC 3 กรัม ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับ 96% และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของ PSCC คือ 3 ชั่วโมง และ CAC คือ 6 ชั่วโมง จากผลการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับและเวลา พบว่า PSCC มีประสิทธิภาพดีกว่า CAC จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ PSCC มาใช้ในการบำบัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Srivastava and Tyagi (1995) ได้ทำการศึกษากำจัดสารประกอบฟีนอล 4 ตัว ได้แก่ 2,4,6-ไตรไนโตรฟีนอล, 4-ไนโตรฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล และ 1,3-ไดไฮดรอกซีเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ที่ผลิตจากของเสียลักษณะเป็นของเหลวขึ้นจากการเผาเชื้อเพลิงเหลวของโรงงานผลิตปุ๋ย จากการศึกษาพบว่า 2,4,6-ไตรไนโตรฟีนอล จะถูกดูดซับได้ดีที่สุด และตามมาด้วย 4-ไนโตรฟีนอล และ 4-คลอโรฟีนอล สำหรับ 1,3-ไดไฮดรอกซีเบนซีนถูกดูดซับน้อยที่สุดเนื่องจากหมู่ไนโตรและคลอไรด์เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน ส่วนหมู่ไฮดรอกซีเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน การเกิดการดูดซับที่ผิวของคาร์บอนเกิดกลไกแบบ Donor – Acceptor Complex โดยหมู่คาร์บอกซิบนพื้นผิวคาร์บอนเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอนและวงอะโรเมติกจะรับอิเล็กตรอน ซึ่งถ้าหมู่แทนที่บนวงเบนซีนเป็นแบบหมู่ดึงอิเล็กตรอนจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงเบนซีนลดลงการรับอิเล็กตรอนจึงเกิดได้ดี

Munaf *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษากำจัดฟีนอลจากน้ำเสียโดยใช้เกลบข้าวขนาด 240 ไมโครเมตร การศึกษาใช้เทคนิคแบบคอลัมน์ โดยบรรจุเกลบข้าว 3 กรัมลงในคอลัมน์ใช้น้ำเสีย 250 มิลลิลิตร พบว่าสามารถกำจัดฟีนอลจากน้ำเสียของโรงงานผลิตไม้อัดได้ 59.9% (ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย 1.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) และสามารถกำจัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลได้ 37.5% (ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย 3.29 มิลลิกรัมต่อลิตร)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1 อุปกรณ์

- 1.1 pH meter รุ่น 315
- 1.2 เครื่องเขย่า (shaker) Model VRN-480 GEMMY Orbit Shaker
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น AB 204-S
- 1.4 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- 1.5 ตะแกรงแยกขนาด
- 1.6 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด
- 1.7 เดสซิเคเตอร์
- 1.8 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 20 D

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 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)

2.7 กกสามเหลี่ยมและบอน

วิธีการ

1. การเตรียมกกสามเหลี่ยมและบอน

1.1 นำลำต้นกกสามเหลี่ยมและบอนมาหั่นเป็นชิ้นบางๆ ตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นจนกรอบและแห้ง หลังจากนั้นก็นำไปบดให้ละเอียดเก็บผงไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.2 ทำการวัดค่าฟิโอสเริ่มต้นของต้นกกสามเหลี่ยมและต้นบอนโดยชั่งปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าฟิโอสของสารละลาย พบว่าค่าฟิโอสของต้นกกสามเหลี่ยมและต้นบอนมีค่าเท่ากับ 5.5 และ 6.1 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 (ก) กกสามเหลี่ยมที่บดละเอียด และ (ข) บอนที่บดละเอียด

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 จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ แล้วเขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.1.2 การเตรียมสารละลายบัพเฟอร์

ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ จำนวน 16.9 กรัม เติมน้ำกลั่นไปละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 143 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายลงในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ เขย่าให้เข้ากันแล้วปิดจุก จะได้สารละลายที่ต้องการ

2.1.3 การเตรียมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน

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

2.1.4 การเตรียมสารละลายโพแตสเซียมเพอร์ไอซยาไนต์

ชั่งโพแตสเซียมเพอร์ไอซยาไนต์ จำนวน 8.0 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ จำนวน 10, 30, 50, 70 และ 90 มิลลิลิตร ตามลำดับลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด แล้วปิเปตสารละลายบัพเฟอร์ สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน และสารละลายโพแตสเซียมเพอร์ไอซยาไนต์ ที่เตรียมไว้ อย่างละ

2 มิลลิกรัม ตามลำดับ ลงในสารละลายฟีนอลทั้ง 5 ขวด เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก (สารละลายในแต่ละขวดจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 1, 3, 5, 7, 9 มิลลิกรัมลิตร ตามลำดับ)

2.3 ตั้งสารละลายที่ได้ในข้อ 2.2 ไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง



ภาพที่ 23 การเกิดสีของสารละลายฟีนอลหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยา

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

4. การวางแผนการทดลอง

4.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของกกสามเหลี่ยมและบอน โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของกกสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 ชำ

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

4.2 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของของกกลสามเหลี่ยมและบอน จากการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของกกลสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 กรัม

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

4.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของกกลสามเหลี่ยมและบอน โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของกกลสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 กรัม

ทำการทดลองโดยชั่งผงกกลสามเหลี่ยมและบอน ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงกกลสามเหลี่ยมและบอนที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.4 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นฟีนอลต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของกกสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงกกสามเหลี่ยมและบอน ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้น 50, 100, 150, 200, และ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.3 หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงกกสามเหลี่ยมและบอนที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างของผงกกสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงกกสามเหลี่ยมและบอน ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 4.2 ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3 หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงกกสามเหลี่ยมและบอนที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ตัวอย่างของกกสามเหลี่ยมและบอนชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองในข้อ 4.1 ปล่อยให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุกกสามเหลี่ยมและบอน ปริมาณ 20

กรัม และเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำกกสามเหลี่ยมและบอนทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการใช้งานแล้วจาก คอลัมน์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ฟิ้งในที่ร่มให้แห้ง หลังจากนั้นนำกกสามเหลี่ยมและ บอนที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพปริมาณ 1 กรัม มาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจาก สารละลายมาตรฐานฟีนอล เปรียบเทียบกับกกสามเหลี่ยมและบอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดย ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ใช้สภาวะที่ เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบสท์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วย วิธี 4-AAP

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A, B, C, D, E และ F โดยใช้ผงกกสามเหลี่ยมและบอน ชนิดละ 3 กรัม

เนื่องจากน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษทั้ง 6 แห่งนี้ มี สภาวะที่แตกต่างจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองแบบเบสท์ ดังตารางภาคผนวกที่ 19 แต่การศึกษานี้ทำการทดลองดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้ จากการทดลองแบบเบสท์

นำน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F มาตรวจวัดคุณภาพน้ำและหาปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยรายงานในรูปของ ปริมาณฟีนอลเริ่มต้นก่อน จากนั้นศึกษาหาปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เหมาะสมในการดูด ซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ ดังกล่าว ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบสท์ ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานฟีนอลที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 มิลลิกรัม/ลิตร (ซึ่งใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่พบในน้ำเสียจริง) หลังจากนั้นนำน้ำเสียมาทดลองโดยใช้สภาวะที่

เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ ของสลัดจ์แต่ละแหล่ง แล้วนำไปวิเคราะห์หาฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับด้วยวิธี 4-AAP

5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 10 เดือน ตั้งแต่เดือน กันยายน พ.ศ. 2550 ถึงเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551

ผลและวิจารณ์

ผล

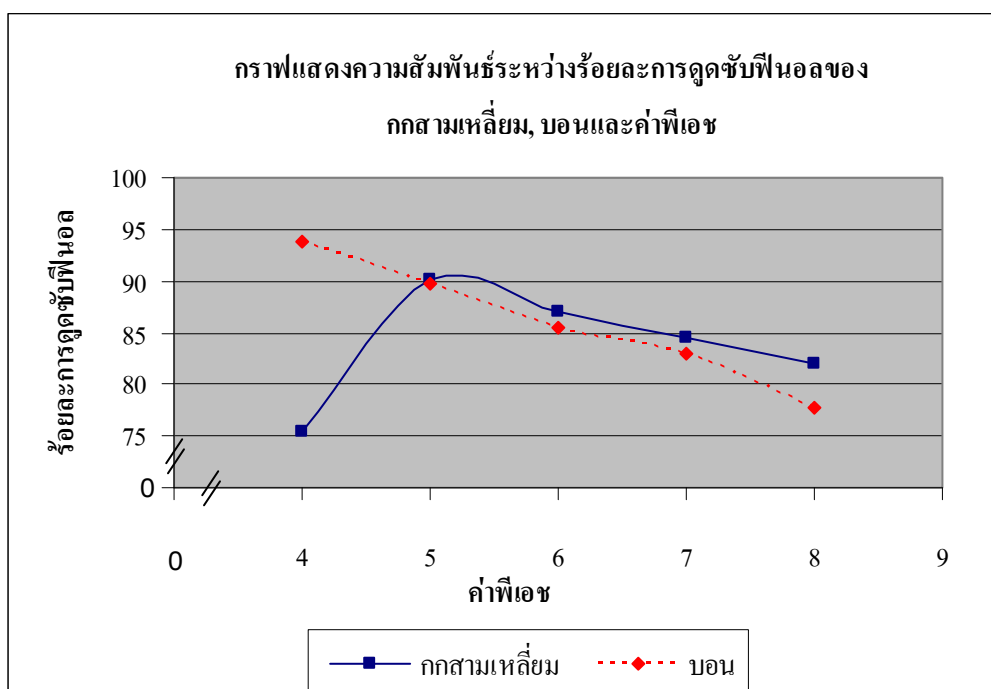
การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นฟีนอล ปริมาณกกลสามเหลี่ยมและบอน และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้สมการฟรุนดลิช และแลงเมียร์ การทดลองการดูดซับโดยผ่านคอลัมน์ และการฟื้นฟูสภาพกกลสามเหลี่ยมและบอนหลังผ่านการใช้งาน รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษบริษัท A, B, C, D, E และ F ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. อิทธิพลพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของกกลสามเหลี่ยมและบอน

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

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยสำหรับกกลสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ร้อยละ 90.06 ที่ค่าพีเอช 5 และพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง สำหรับบอนพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ร้อยละ 93.80 เมื่อค่าพีเอชเป็น 4 และประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อพีเอชมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 24 ตารางที่ 6

ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและคำพืเอช



ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและคำพืเอช

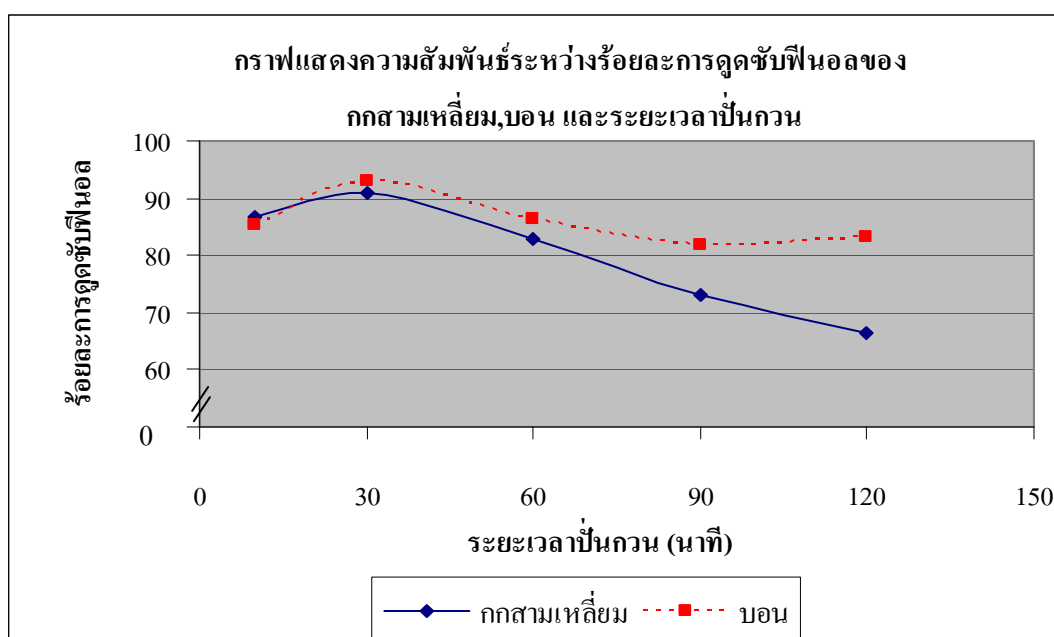
คำพืเอช	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กกสามเหลี่ยม	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ บอน
4	75.42	93.80
5	90.06	89.66
6	87.12	85.50
7	84.60	82.96
8	81.98	77.82

ความสามารถในการดูดซับที่ลดลง อาจมีสาเหตุมาจากการแข่งขันเข้าจับบริเวณดูดซับของ
พีระหว่างไฮโดรเจนไอออน, ไฮดรอกไซด์ไอออนและสารละลายฟีนอลเมื่อสารละลายเป็นกรด
และเบสมากเกินไป (Low *et al.*, 1995) นอกจากนี้เมื่อสารละลายเป็นเบสสารประกอบฟีนอลซึ่งมีค่า
pKa เท่ากับ 9.96 จะอยู่ในรูปฟีนอลซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วที่สามารถละลายน้ำได้ จึงเป็นอีกสาเหตุ
หนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลมีค่าลดลง

2. อิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของกกสามเหลี่ยมและบอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับกกสามเหลี่ยมและบอน ตามลำดับ ใช้ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ทำการทดลองปรับระยะเวลาปั่นกวนตามเวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาปั่นกวน โดยทั้งกกสามเหลี่ยมและบอนมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงที่สุดที่ร้อยละ 90.84 และ 93.02 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาปั่นกวนเมื่อระยะเวลาปั่นกวนเป็น 30 นาทีและเมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงดังภาพที่ 25 ตารางที่ 7



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาปั่นกวน

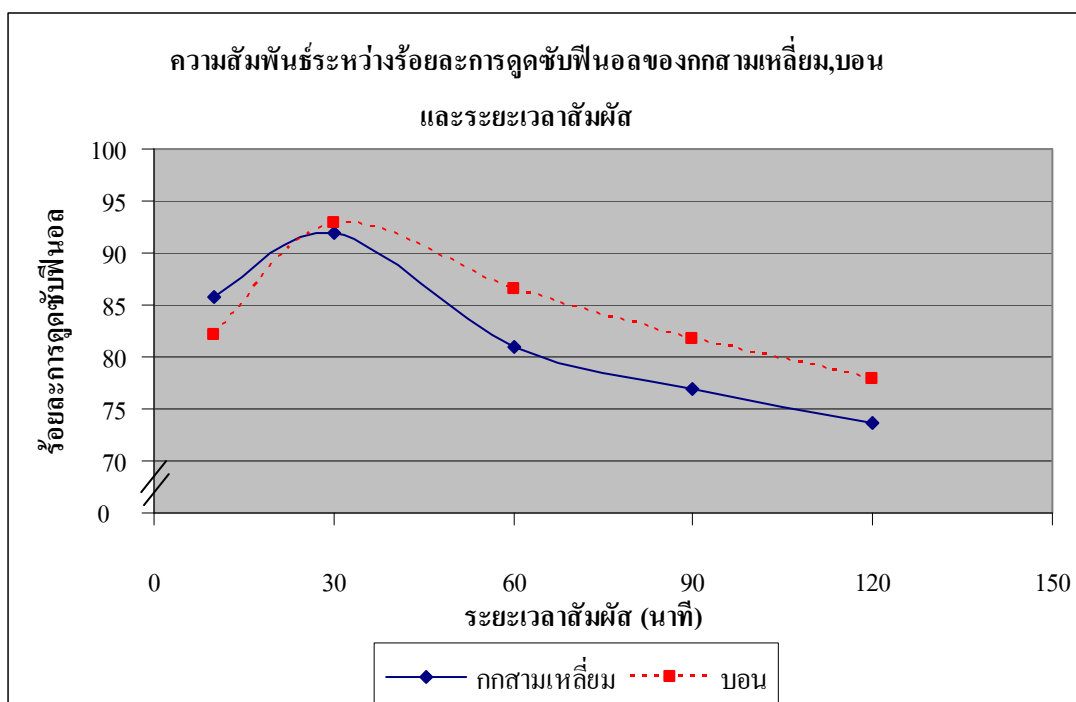
ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาปั่นกววน

ระยะเวลาปั่นกววน (นาท)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน
10	86.74	85.38
30	90.84	93.02
60	82.84	86.22
90	73.06	81.72
120	66.56	83.14

3. อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและบอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับกกสามเหลี่ยมและบอน ตามลำดับ ใช้ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม นำไปแช่ยาที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาท เป็นเวลา 30 นาท และทดลองการแปรผันของระยะเวลาสัมผัสโดยตั้งทิ้งไว้แล้วเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาท ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส โดยทั้งกกสามเหลี่ยมและบอนมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงที่สุดที่ร้อยละ 91.94 และ 93.44 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาสัมผัสเมื่อระยะเวลาปั่นกววนเป็น 30 นาท จากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 26 ตารางที่ 8



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกลสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาสัมผัส

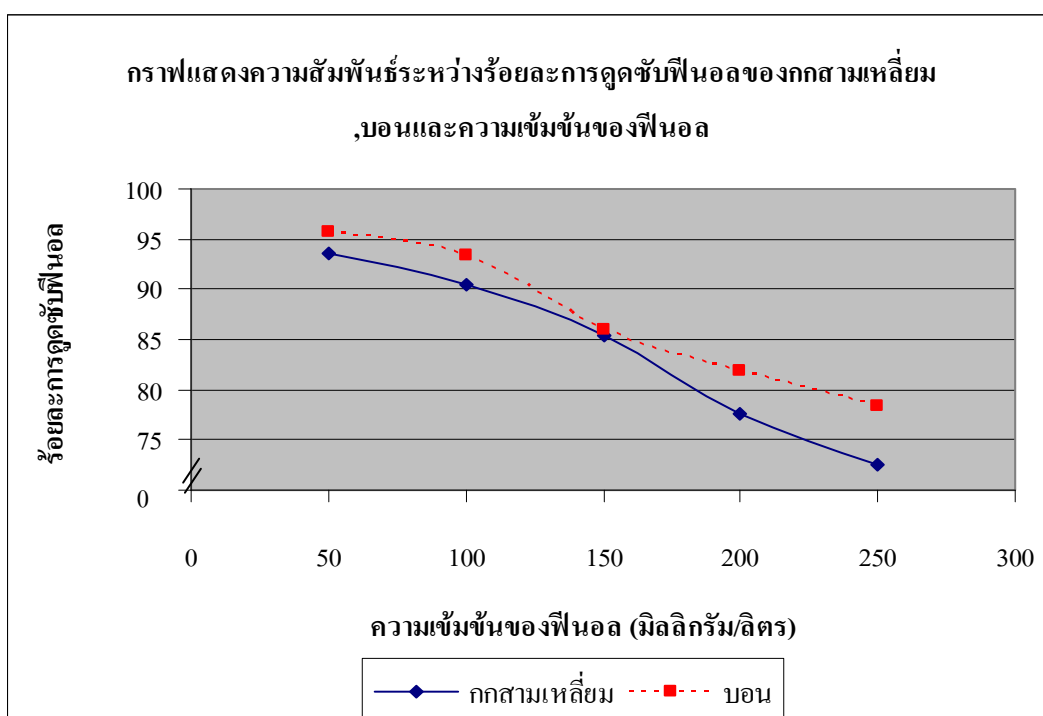
ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกลสามเหลี่ยม, บอนและระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กกลสามเหลี่ยม	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ บอน
10	85.76	82.06
30	91.94	92.86
60	81.00	86.54
90	76.90	81.66
120	73.66	77.82

4. อิทธิพลความเข้มข้นของฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลต่อการดูดซับของกกสามเหลี่ยมและบอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน คือ 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับกกสามเหลี่ยมและบอน ตามลำดับ ใช้ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลลดลง เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลเพิ่ม โดยทั้งกกสามเหลี่ยมและบอนมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด ที่ร้อยละ 93.64 และ 95.78 ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 27 และตารางที่ 9



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและความเข้มข้นของฟีนอล

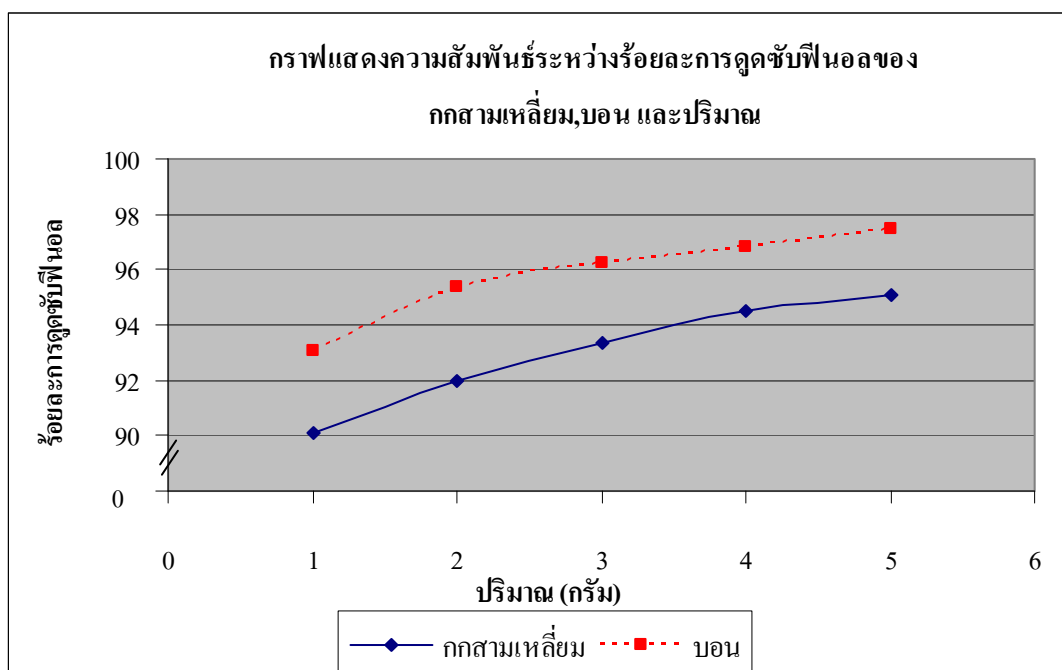
ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม, บอนและความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กกสามเหลี่ยม	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ บอน
50	93.64	95.78
100	90.38	93.38
150	85.44	85.90
200	77.58	81.92
250	72.62	78.40

5. อิทธิพลของปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เหมาะสม และไอโซเทอร์มในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและบอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับกกสามเหลี่ยมและบอน ตามลำดับ ใช้ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนแตกต่างกัน คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลขึ้นอยู่กับปริมาณตัวดูดซับ โดยเมื่อปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เพิ่มขึ้นด้วย ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ร้อยละ 95.08 และ 97.50 เมื่อใช้กกสามเหลี่ยมและบอน 5 กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 10



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณกกลสามเหลี่ยมและบอน

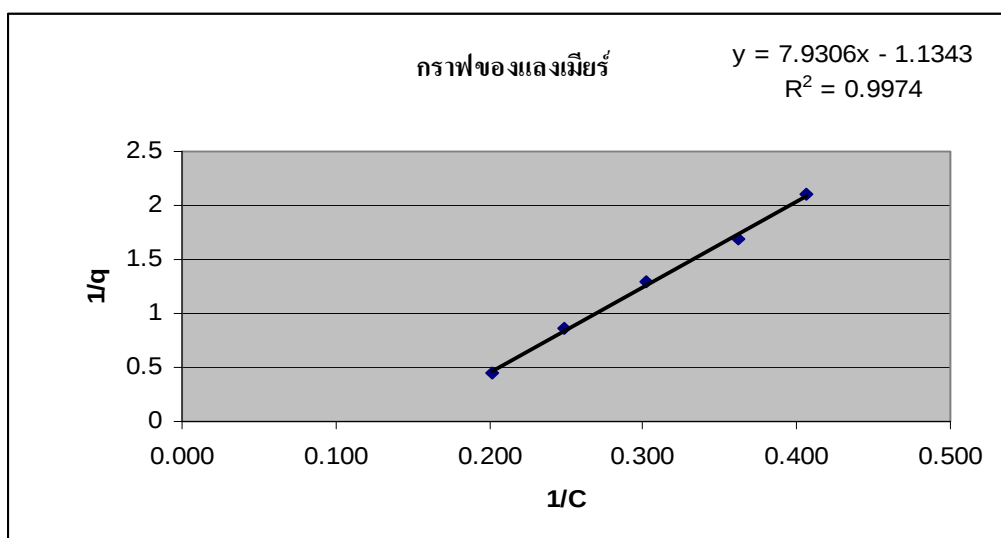
ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกลสามเหลี่ยม, บอนและปริมาณ

ปริมาณ(กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กกลสามเหลี่ยม	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ บอน
1	90.12	93.06
2	91.96	95.36
3	93.38	96.22
4	94.48	96.80
5	95.08	97.50

เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นกับขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อกกลสามเหลี่ยมและบอนขนาดเท่ากัน ปริมาณกกลสามเหลี่ยมและบอนที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณกกลสามเหลี่ยมและบอนมากขึ้นประสิทธิภาพใน

ดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1 กรัม

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของกกลสามเหลี่ยมเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลทั้ง 2 แบบ มีค่า 0.9974 และ 0.9747 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลโดยกกลสามเหลี่ยมจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว และพบว่าปริมาณกกลสามเหลี่ยม 1 กรัมสามารถดูดซับฟีนอลได้เท่ากับ 2.25 มิลลิกรัม



ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้กกลสามเหลี่ยม

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 11

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{-----} \quad (11)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 7.963 \frac{1}{C} - 1.1343 \quad \text{-----} \quad (12)$$

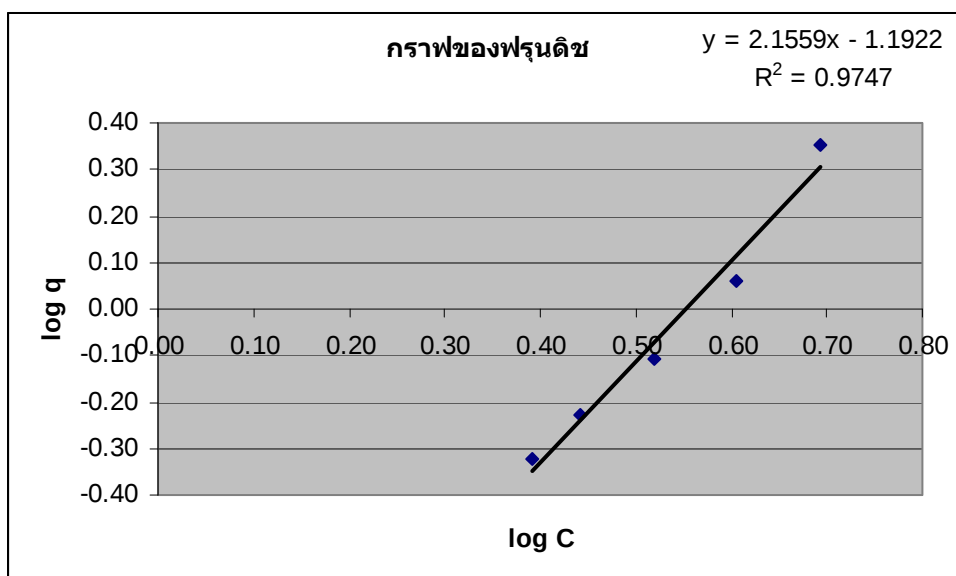
จากสมการที่ 12 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 7.963 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -1.1343 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 7.9630$$

$$\frac{1}{q_m} = -1.1343$$

$$\text{ดังนั้น} \quad K = -0.14$$

จากไอโซเทอร์มการดูดของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟินอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของกกสามเหลี่ยม



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุติชโดยใช้กักสามเหลี่ยม

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุติชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 13

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{----- (13)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = -1.1922 + 2.1559 \log C \quad \text{----- (14)}$$

จากสมการที่ 14 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 2.1559 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -1.1922 นั่นคือ

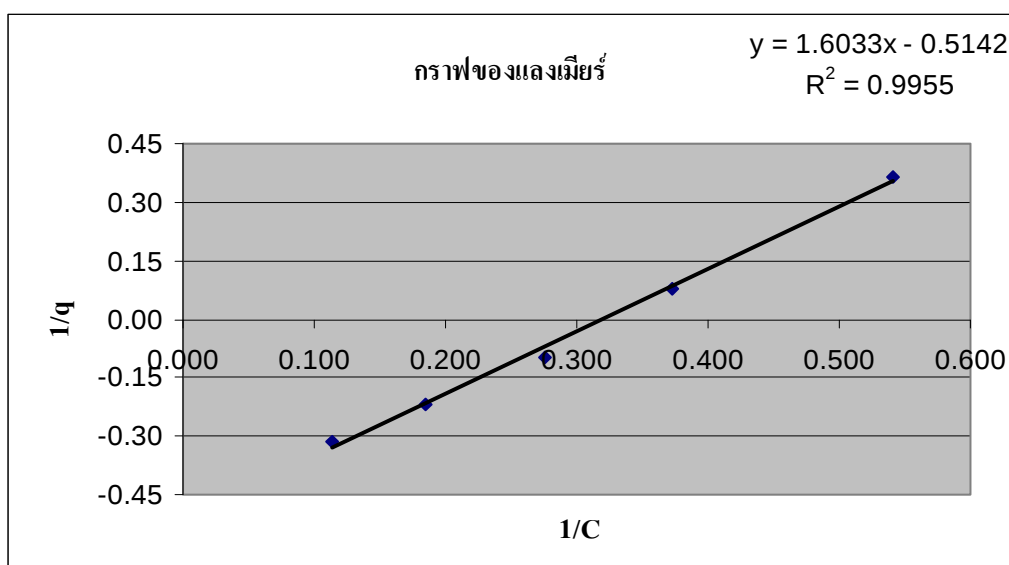
$$\log K = -1.1922$$

$$1/n = 2.1559$$

$$n = 0.46$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุנדลิชสำหรับกกสามเหลี่ยม พบว่าค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าเป็นบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่าฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของกกสามเหลี่ยม

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลของบอน เมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุנדลิช ดังภาพที่ 31 และ 32 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลทั้ง 2 แบบ มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 0.9955 และ 0.9989 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุנדลิช



ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยใช้บอน

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 15

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (15)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 1.6033 \frac{1}{C} - 0.5142 \quad \text{----- (16)}$$

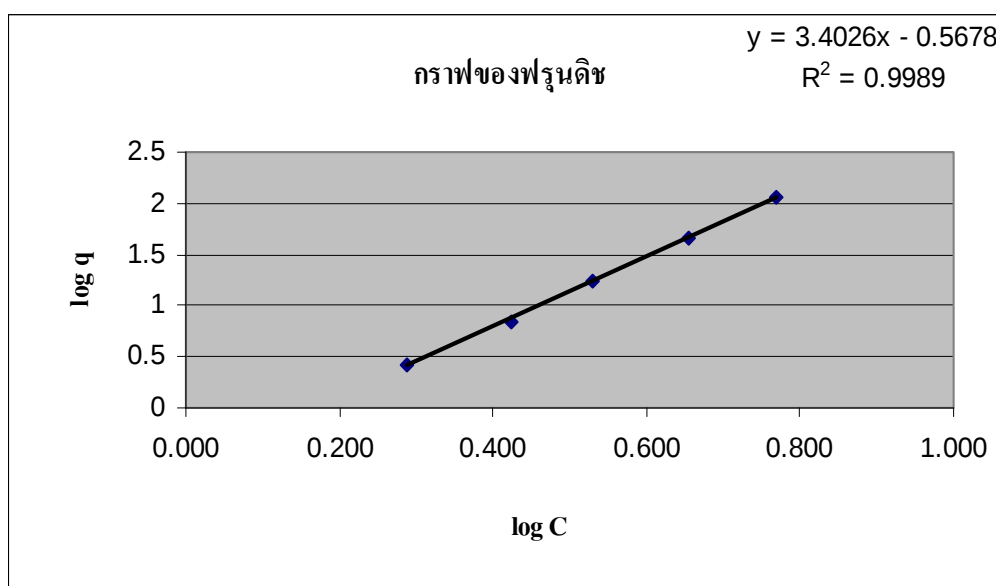
จากสมการที่ 16 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.6033 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.5142 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 1.6033$$

$$\frac{1}{q_m} = -0.5142$$

ดังนั้น $K = -0.32$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟินอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของบอน



ภาพที่ 32 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรอนดิชโดยใช้บอน

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรอนดิชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 17

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----} \quad (17)$$

$$\log q = -0.5678 + 3.4026 \log C \quad \text{-----} \quad (18)$$

จากสมการที่ 18 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 3.4026 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.5678 นั่นคือ

$$\log K = -0.5678$$

$$1/n = 3.4026$$

$$n = 0.29$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวได้ว่าบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่าฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของบอน

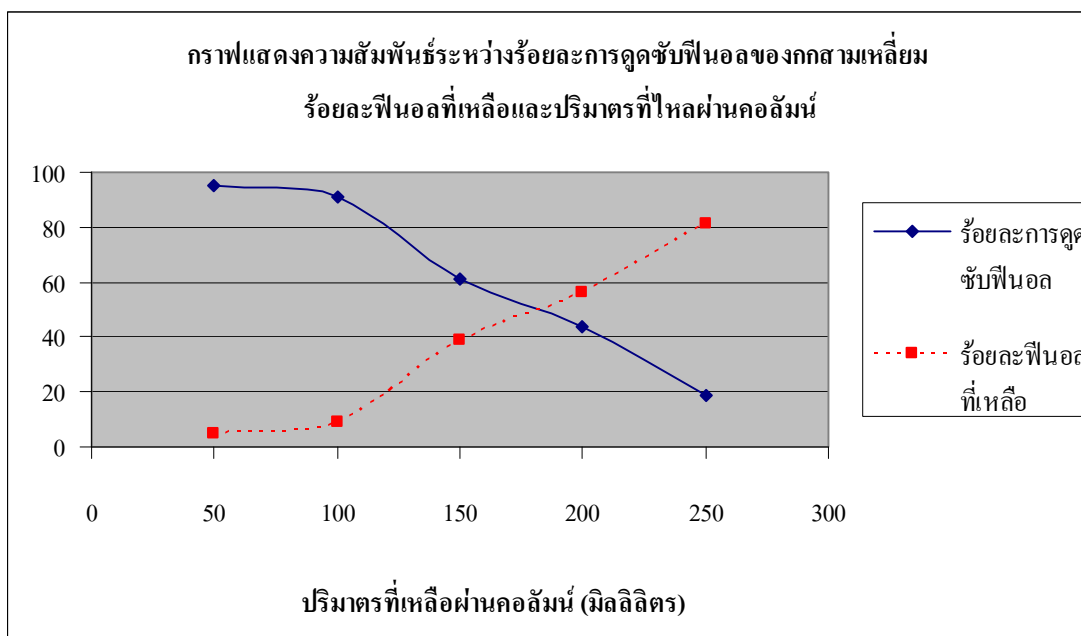
6. ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ของกกสามเหลี่ยมและบอน

6.1 กกสามเหลี่ยม

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุกกสามเหลี่ยม จำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลของกกสามเหลี่ยมจะมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95.1 ซึ่งเห็นได้จากปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่เหลืออยู่ มีค่าน้อยเท่ากับร้อยละ 4.90 และสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของกก

สามเหลี่ยมมีการดูดซับฟีนอลเอาไว้ และหากมีปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลกรองผ่านกกสามเหลี่ยมในคอลัมน์ต่อไปอีก พื้นที่ผิวของกกสามเหลี่ยมในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว (อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ) และสุดท้ายกกสามเหลี่ยมจะหมดสภาพในการดูดซับดัง ดังภาพที่ 33 และตารางที่ 11



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม ร้อยละฟีนอลที่เหลือและปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

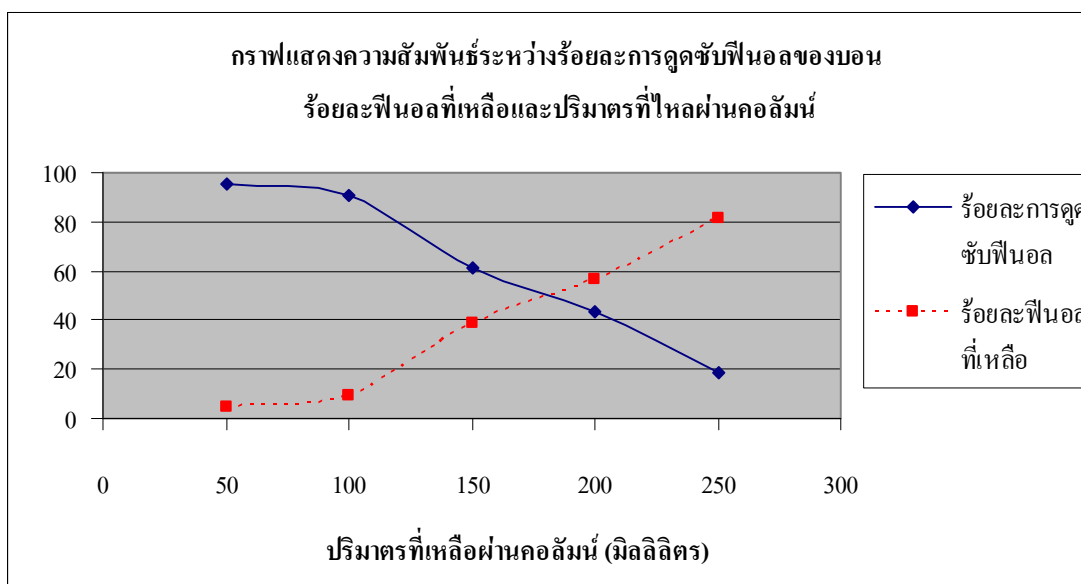
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม ร้อยละฟีนอลที่เหลือและปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	95.10	4.90
100	90.70	9.30
150	61.34	38.66
200	43.62	56.38
250	18.58	81.42

6.2 บอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุ กกสามเหลี่ยม จำนวน 20 กรัม แล้วเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ปริมาตรสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลของบอนจะมีค่าสูงเท่ากับร้อยละ 97.74 ซึ่งเห็นได้จากปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่เหลืออยู่ มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.26 และสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของบอนจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของบอนมีการดูดซับฟีนอลเอาไว้ และหากมีปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลกรองผ่านบอนในคอลัมน์ต่อไปอีก พื้นที่ผิวของบอนในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว (อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ) และสุดท้ายบอนจะหมดสภาพในการดูดซับดังภาพที่ 34 และตารางที่ 12



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และ ปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

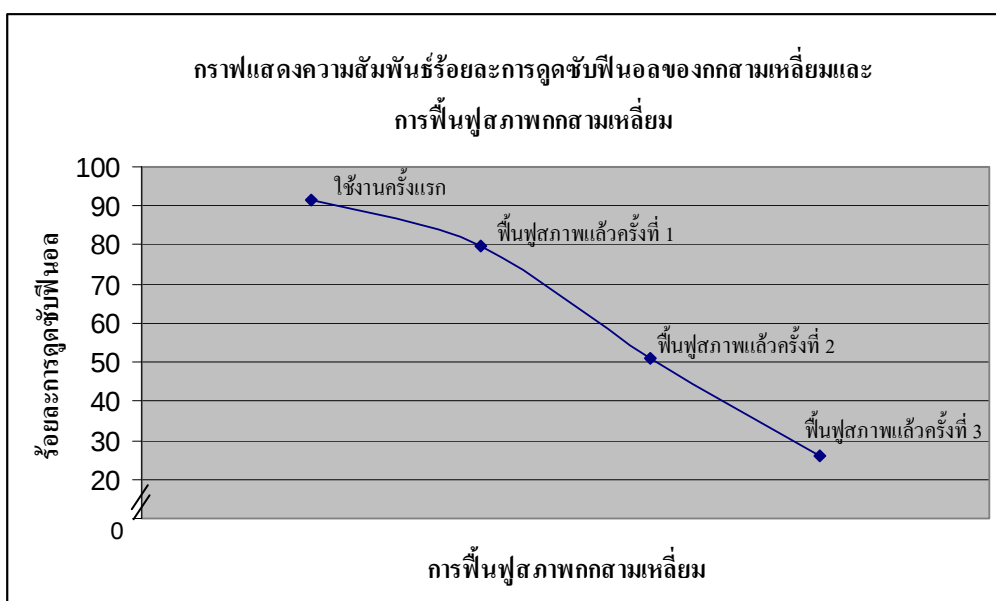
ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่าน คอลัมน์(มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	97.74	2.26
100	89.86	10.14
150	65.98	34.02
200	50.8	49.2
250	29.38	70.62

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว

7.1 กกสามเหลี่ยม

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ใช้กกสามเหลี่ยมโดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้ว ปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 35 และตารางที่ 13



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและการฟื้นฟูสภาพกกสามเหลี่ยม

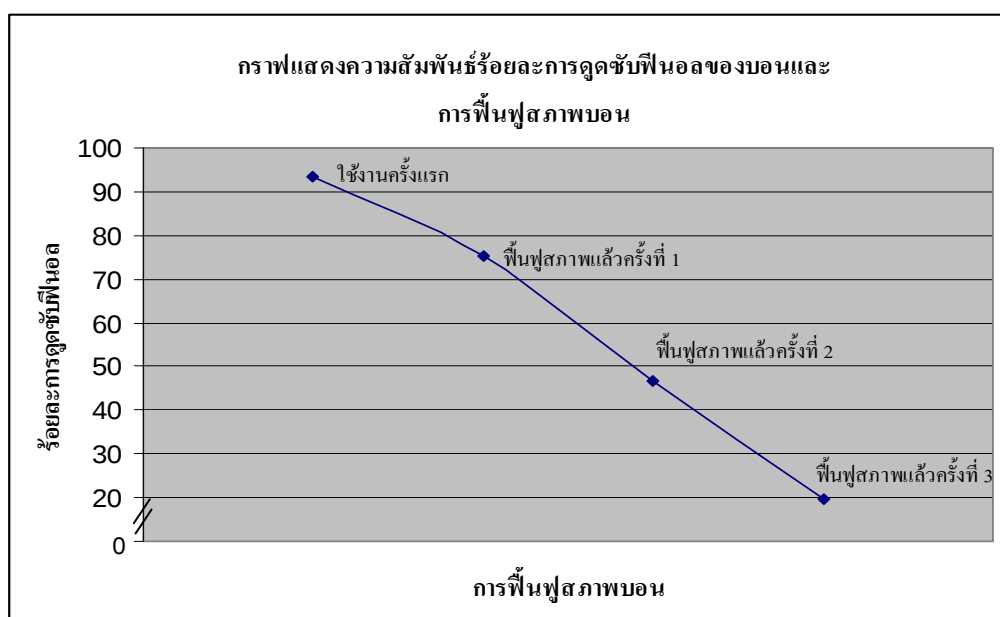
ตารางที่ 13 ร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กกสามเหลี่ยม
ใช้งานครั้งแรก	91.29
ฟื้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 1	79.83
ฟื้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 2	51.06
ฟื้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 3	25.99

จากผลการทดลองภาพที่ 35 และตารางที่ 13 เมื่อนำกกสามเหลี่ยมที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้วมาทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับกกสามเหลี่ยมที่ใช้งานครั้งแรก และยังพบอีกว่าสามารถนำกกสามเหลี่ยมกลับมาใช้ได้ใหม่หลังจากการฟื้นฟูสภาพได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

7.2 บอน

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้บอนโดยผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟ้นฟูสภาพมาแล้วปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลโดยศึกษาการฟ้นฟูสภาพของบอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว จำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 36 และตารางที่ 14



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและการฟ้นฟูสภาพบอน

ตารางที่ 14 ร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและการฟ้นฟูสภาพตัวดูดซับ

การฟ้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอน
ใช้งานครั้งแรก	93.32
ฟ้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 1	75.39
ฟ้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 2	46.88
ฟ้นฟูสภาพแล้วครั้งที่ 3	19.84

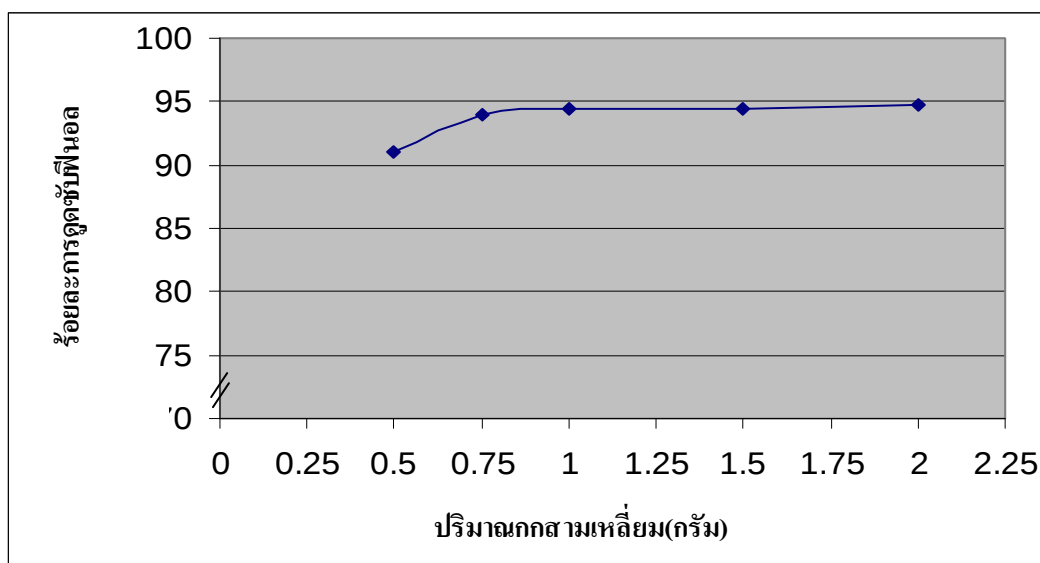
จากผลการทดลองภาพที่ 36 และตารางที่ 14 เมื่อนำบอนที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้วมาทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับบอนที่ใช้งานครั้งแรกและยังพบอีกว่าสามารถนำบอนกลับมาใช้ได้ใหม่หลังจากการฟื้นฟูสภาพได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

8. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F

8.1 กกสามเหลี่ยม

การทดลองเพื่อหาปริมาณกกสามเหลี่ยมที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กระดาษและเยื่อกระดาษ(เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียจริง) ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบสท์ โดยใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 5 โดยใช้ปริมาณกกสามเหลี่ยมแตกต่างกัน ได้แก่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกกสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณกกสามเหลี่ยมที่ 2.00 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 94.80 สำหรับกกสามเหลี่ยมที่ปริมาณ 0.5, 0.75, 1.00 และ 1.50 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้เท่ากับ ร้อยละ 91.10, 93.90, 94.40 และ 94.50 ตามลำดับ ดังภาพที่ 37 และตารางที่ 15



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณกสสามเหลี่ยม

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกสสามเหลี่ยม

ปริมาณ(กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ กสสามเหลี่ยม
0.50	91.10
0.75	93.90
1.00	94.40
1.50	94.50
2.00	94.80

ผลของปริมาณกสสามเหลี่ยมต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล จากการทดลองพบว่า ปริมาณกสสามเหลี่ยม 2.00 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด และประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลน้อยที่สุด เมื่อใช้ปริมาณกสสามเหลี่ยม 0.50 กรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับขึ้นกับขนาดของอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อ กสสามเหลี่ยมมีขนาดเท่ากัน ปริมาณกสสามเหลี่ยมที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า และยังพบอีกด้วยว่า เมื่อใช้ปริมาณกสสามเหลี่ยมมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล คือ 1.00 กรัม

จากนั้นจึงทำการทดลองจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ซึ่งมีฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ในน้ำเสีย ทำการปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ คือ พีเอชเท่ากับ 5 ใช้กักสามเหลี่ยมปริมาณที่เหมาะสมดังกล่าว คือ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ของกักสามเหลี่ยม

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการ
			ดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
A	5.36	0.51	90.48
B	8.77	2.20	74.91
C	3.13	0.97	69.00
D	3.96	0.38	90.40
E	5.06	1.05	79.25
F	3.81	1.03	72.97

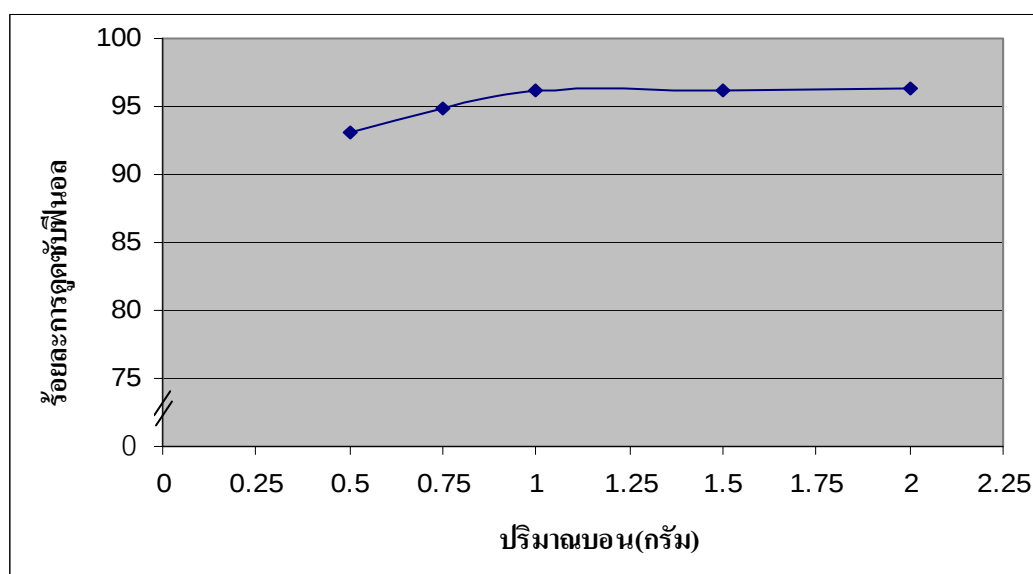
จากตารางที่ 16 นำตัวอย่างก่อนการทดลองของจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ซึ่งมีฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ 5.36, 8.77, 3.13, 3.96, 5.06 และ 3.81 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากทำการดูดซับด้วยกักสามเหลี่ยมในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.48, 74.91, 69.00, 90.40, 79.25 และ 72.97 ตามลำดับ

8.2 บอน

การทดลองเพื่อหาปริมาณบอนที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ(เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียจริง) ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้

สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอช เท่ากับ 4 โดยใช้ปริมาณบอนด์แตกต่างกัน ได้แก่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณบอนด์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ปริมาณบอนด์ 2.00 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.35 สำหรับบอนด์ที่ปริมาณ 0.5, 0.75, 1.00 และ 1.50 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานได้เท่ากับ ร้อยละ 93.15, 94.80, 96.15 และ 96.25 ตามลำดับ ดังภาพที่ 38 และตารางที่ 17



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลและปริมาณบอนด์

ตารางที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนด์และปริมาณ

ปริมาณ(กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนด์
0.50	93.15
0.75	94.80
1.00	96.15
1.50	96.25
2.00	96.35

จากนั้นจึงทำการทดลอง จากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ซึ่งมีฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปน ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ใช้ บอนปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F ของบอน

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
A	5.36	0.48	91.04
B	8.77	1.62	81.53
C	3.13	1.26	59.74
D	3.96	0.03	91.91
E	5.06	0.97	80.83
F	3.81	1.21	68.24

จากตารางที่ 18 นำตัวอย่างก่อนการทดลองของบริษัทจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F มีฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลเจือปนอยู่ 5.36, 8.77, 3.13, 3.96, 5.06 และ 3.81 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากทำการดูดซับด้วยบอนในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในตัวอย่าง มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.04, 81.53, 59.74, 91.91, 80.83 และ 68.24 ตามลำดับ

วิจารณ์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกสามเหลี่ยมและบอน โดยทำการทดลองแบบแบบทซ์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นฟีนอล ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน การทดลองการดูดซับโดยผ่านคอลัมน์ การฟื้นฟูสภาพกกสามเหลี่ยมและบอน หลังจากผ่านการใช้งาน และการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และF เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาทดสอบทางสถิติ (Least Significant Different, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า

1. ผลของพีเอช กกสามเหลี่ยมสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 5 และที่พีเอชต่างๆ มีประสิทธิภาพดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนบอนสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุดที่พีเอช 4 และที่พีเอชต่างๆ มีประสิทธิภาพดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังตารางผนวกที่ 20

2. ผลของระยะเวลาปั่นกววนที่ระยะเวลาปั่นกววน 30 นาที เป็นระยะเวลาปั่นกววนที่กกสามเหลี่ยมและบอนดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกระยะเวลาปั่นกววนดังตารางผนวกที่ 21

3. ผลของระยะเวลาสัมผัสที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสที่กกสามเหลี่ยมและบอนดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกระยะเวลาสัมผัส ได้แก่ 10, 60, 90 และ 120 นาที ดังตารางผนวกที่ 22

4. ผลของความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ มีผลของการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทั้งกกสามเหลี่ยมและบอนมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกความเข้มข้น ได้แก่ 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางผนวกที่ 23

5. ผลของปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน ปริมาณ 1 กรัม พบว่าผลของการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ 2, 3, 4 และ 5 กรัม ดังตารางผนวกที่ 24 แต่ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ เลือกใช้กกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม

6. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่ากกสามเหลี่ยมสามารถดูดซับฟีนอลได้น้อยกว่าบอน โดยอัตราการไหลของกกสามเหลี่ยมช้ากว่าบอนจึงทำให้น้ำเสียสังเคราะห์สัมผัสกับผิวของบอนเป็นเวลานานกว่าจึงทำให้เกิดการดูดซับฟีนอลได้มากขึ้น

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของกกสามเหลี่ยมและบอนลดลงจากการที่พื้นผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับก่อนจะฟื้นฟูสภาพ รวมทั้งการฟื้นฟูสภาพอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับไปด้วย

8. ผลของปริมาณกกสามเหลี่ยมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเทียบจากค่าใกล้เคียงปริมาณ 1 กรัม พบว่าผลของการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ 1.5, 2 กรัมตามลำดับแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ 0.5, 0.75 ดังตารางผนวกที่ 25 ส่วนปริมาณบอน 1 กรัม พบว่าผลของการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ 1.5 กรัมแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับปริมาณ 0.5, 0.75 และ 2 กรัม ดังตารางผนวกที่ 25

9. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอลบริษัทอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์และเยื่อกระดาษ A B C D E และ F พบว่าร้อยละการดูดซับฟีนอลมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ที่ใช้ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เป็นเหตุมาจากไม่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอนของฟีนอลที่เจือปนมากับน้ำเสียจากบริษัทต่างๆ ในขณะที่ใช้กกสามเหลี่ยมและบอนในการทดลองนั้นมีปริมาณที่เดิม จึงส่งผลทำให้ร้อยละการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียจาก บริษัทอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์และเยื่อกระดาษ A B C D E และ F มีค่าน้อยกว่าร้อยละการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์นั่นเอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกสามเหลี่ยมและบอน โดยทำการทดลองแบบเบกซ์และคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของค่าพีเอช พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกสามเหลี่ยมและบอนคือ 5 และ 4 ตามลำดับ สามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 90.06 และ 93.80 ตามลำดับโดยปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาณ 1 กรัมเท่ากัน

2. ผลของระยะเวลาปั่นกววน พบว่าระยะเวลาปั่นกววนที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกสามเหลี่ยมคือ 30 นาที สามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 90.84 สำหรับบอนระยะเวลาปั่นกววนที่เหมาะสมคือ 30 นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 93.02 โดยกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลองปริมาณ 1 กรัมเท่ากัน

3. ผลของระยะเวลาสัมผัส พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกสามเหลี่ยมคือ 30 นาที สามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 91.94 สำหรับบอนระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 30 นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 93.44 โดยกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลองปริมาณ 1 กรัมเท่ากัน

4. ผลของความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการทดลองครั้งนี้เลือกความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและบอนได้ลดลง โดยกกสามเหลี่ยมและบอนสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 93.64 และ 95.78 ตามลำดับ และปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาณ 1 กรัมเท่ากัน

5. ผลของปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลอง พบว่าปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เพิ่มมากขึ้นสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

สำหรับปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ อยู่ที่ ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม โดยกกสามเหลี่ยมและบอนสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 95.08 และ 97.50 ตามลำดับ

6. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบ คอลัมน์ พบว่ากกสามเหลี่ยมสามารถดูดซับฟีนอลได้ใกล้เคียงกับบอน ที่ปริมาตรของฟีนอลไหลผ่านคอลัมน์เท่ากันคือ 50 มิลลิลิตร กกสามเหลี่ยมและบอนสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 95.10 และ 97.74 ตามลำดับ แต่อัตราการไหลของกกสามเหลี่ยมจะเร็วกว่าบอน คือ 4.80 และ 0.82 มิลลิลิตร/นาที่ ตามลำดับ

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของกกสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่า กกสามเหลี่ยมหลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 แล้วสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 79.83, 51.06 และ 25.99 ตามลำดับ และบอนหลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 แล้วสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 75.39, 46.88 และ 19.84 ตามลำดับซึ่งกกสามเหลี่ยมและบอนดูดซับฟีนอลลดลงจากที่ใช้งานครั้งแรกตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟู กกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้งานครั้งแรกสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 91.29 และ 93.32 ตามลำดับ

8. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และ F กกสามเหลี่ยมสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 90.48, 74.91, 79.25, 72.97, 69.00 และ 90.40 ตามลำดับ สำหรับบอนพบว่า สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 91.04, 81.53, 80.83, 68.24, 59.74 และ 91.91 ตามลำดับ

9. ผลของปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่ใช้ในการทดลองโดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเทียบจากค่าใกล้เคียง พบว่าปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เพิ่มมากขึ้นสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ สำหรับปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอนที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ อยู่ที่ปริมาณกกสามเหลี่ยมและบอน 1 กรัม โดยกกสามเหลี่ยมและบอนสามารถดูดซับฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 95.08 และ 97.50 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมาในครั้งนี ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่าง เพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจดังนี้

1. ควรมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกกลสามเหลี่ยมและบอน เพื่อทราบถึงกลไกของการดูดซับ
2. ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพการดูดซับของกกลสามเหลี่ยมและบอนในการดูดซับสารชนิดอื่น เพื่อจะสามารถใช้กกลสามเหลี่ยมและบอนได้ประสิทธิภาพสูงสุด
3. ควรศึกษาแนวทางในการกำจัดกกลสามเหลี่ยมและบอนที่ผ่านการดูดซับฟีนอล เพื่อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของฟีนอลออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกครั้ง
4. ควรมีการศึกษาหาวัสดุชนิดอื่นที่สามารถดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เพื่อจะได้เป็นวัสดุทดแทน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **พินอล**. กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กานดา สรณกุลพานิช, ชูชัย ล้ออุทัย และพิสุทธิ์ อนุรัตน์. 2545. **การดูดซับพินอลในน้ำเสียโดยใช้ถ่านแกลบดำ**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2542. **เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีวิเคราะห์1**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550. **วัชพืชและการจัดการ** (Online). www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/weed/weedsspp.htm 8 มกราคม 2551.
- จตุพร โหงวแข่ง, ธีรรัตน์ จรัสกุล และสุรธานี บุญยสถิตย์. 2545. **การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทร์ฉาย อึ้งอรุณภักดี. 2541. **การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่โดยใช้รูปถ่ายและฟางข้าว**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานาฏยสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร. คณะสาธารณสุขศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ดวงพร สุวรรณกุล. 2544. **วัชพืชในประเทศไทย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธิสักดิ์. 2540. **คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย**. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

- นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ และคณิดา ตั้งคณาภิรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มุกดา พัฒนาวณิชชัย, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และสุกัญญา กำมะเลศ. 2546. การใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล. ปรินญา นิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2543. Removal of Organics matter and phenol compounds from the waste water by using granular activated carbon-sequence batch reactor system. **Thammasart International Technology**. 1(4):38-48.
- Aksu, Z. and J. Yener. 1998. Investigation of the Biosorption of Phenol and Monochlorinated Phenols on the Dried Activated Sludge. **Process Biochemistry**, 33 : 649-655.
- Calace, N., Nardi, E., Petronio, B.M. and M. Pietroletti. 2002. Adsorption of Phenols by Papermill sludges. **Environmental Pollution**, 118 : 315-319.
- Chun-Lin Long and Liu. Ke-Ming. 2001. *Colocasia lihengiae* (Araceae: Colocasieae), a new species from Yunnan, China. Botanical Bulletin of Academia Sinica, Vol. 42, 313-317. (Online). www.ejournal.sinica.edu.tw/bbas/content/2001/4/bot424-10.html, January 8, 2008.
- Clayton G.D., and F.E. Clayton (Eds). 1994: **Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 2B, Toxicology**, 4th ed. John Wiley & Sons, New York, Ny., p. 1605-1613
- Deichmann W.B. and M.L. Keplinger. 1963. **Phenols and phenolic compounds**. In:Patty FA ed. Industrial hygiene and toxicology. New York, Interscience Publishers, pp. 2567-2627.
- Freitag D., Ballhorn L., Geyer H., 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.

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

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

Low, K.S., Lee, C.K and C.H. Tai. 1995. Biosorption of Basic Dyes by Water Hyacinth Roots. **Bioresource Technology.** 52(1): 79-83.

Kujawki W., Warszawski A., Ratajezak w., Porcbski T., Capala W. and I. Ostrowska. 2004. Adsorption of Pervation and Adsorption to the Phenol Removal from Watewater. **Separation Purification Technology.**

Maron, S.H. and C.F. Prutton. 1961. **Principles of Physical Chemistry.** 3rd ed. Macmillan, Co. New York.

Moskvin A. L., Mozhukhin A. V., Mukhina E. A. 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.

Munaf, E., Zein, R. and I. Kurniadi. 1997. The Use of Rice Husk for Removal of Phenols from Wastewater as Studied Using 4-Aminoantipyrine Spectrophotometer Method. **Environ. Tech.** 18 : 355-358

Rao, J.R. and T. Viraraghan. 2002. Biosorption of Phenol from Aqueous Solution by *Aspergillus niger* biomass. **Bioresource Technology,** 85 : 165-171.

Realini P.A. 1981. Determination of priority Pollutant Phenols in Water by HPLC. J.Chromatogr.Sci., vol. 19, pp. 124.

- Rengaraj, S., Seung-Hyeon Moon, Sivabalan, R., Arabindoo, B. and V. Murugesan. 2002. Agricultural Solid Waste for Removal of Organics: Adsorption of Phenols from Water and Wastewater by Palm Seed Coat Activated Carbon. **Waste Management**, 22 : 543-548.
- Schlicht M.P., Moser V.C., Sumrell B.M., Berman E., and R.C. MacPhail. 1992. Systemic and neurotoxic effects of acute and repeated phenol administration (Abstract No. 1047). **Toxicologist** 12: 274.
- Shinzo Tanabe, Chiaki Ise and Kosugi Takayoshi. 1989. **Reactivities of New Color Reagent Phenanthro[9,10-*d*]imidazole-2-N-chloroimide with Phenolic Compounds**. Analytical Sciences 1989 (5):43-47.
- Srivastava, S.K. and R. Tyagi. 1995. Competitive Adsorption of Substituted Phenols by Activated Carbon Developed from the Fertilizer Waste Slurry. **Wat. Res.** 29(2) : 483-488.
- 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 Edition. USA: Van Nostrand Reinhold.

ภาคผนวก

แสดงผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	12.59	12.20	12.29	12.36	0.20	75.42
5	5.17	4.97	4.78	4.97	0.20	90.06
6	6.24	6.63	6.44	6.44	0.19	87.12
7	8.00	7.61	7.51	7.70	0.26	84.60
8	9.27	9.07	8.68	9.01	0.30	81.98

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	2.98	3.21	3.12	3.10	0.12	93.80
5	5.17	4.97	5.36	5.17	0.20	89.66
6	7.31	7.31	7.12	7.25	0.11	85.50
7	8.00	8.97	8.58	8.52	0.49	82.96
8	11.42	10.83	11.03	11.09	0.30	77.82

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและระยะเวลาปั่นกวน

ระยะเวลาปั่น กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	6.44	6.92	6.53	6.63	0.26	86.74
30	4.87	4.48	4.38	4.58	0.26	90.84
60	8.10	8.39	8.58	8.36	0.25	82.84
90	13.66	13.27	13.47	13.47	0.20	73.06
120	16.49	16.79	16.88	16.72	0.20	66.56

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและระยะเวลาปั่นกวน

ระยะเวลาปั่น กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูด ซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	7.12	7.31	7.51	7.31	0.20	85.38
30	3.31	3.51	3.65	3.49	0.17	93.02
60	6.92	6.63	7.12	6.89	0.25	86.22
90	9.37	9.07	8.97	9.14	0.20	81.72
120	8.41	8.78	8.09	8.43	0.34	83.14

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม และระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	7.31	6.92	7.12	7.12	0.20	85.76
30	3.80	4.19	4.09	4.03	0.20	91.94
60	9.37	9.46	9.66	9.50	0.15	81.00
90	11.71	11.51	11.42	11.55	0.15	76.90
120	12.88	13.37	13.27	13.17	0.26	73.66

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูด ซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	8.97	9.07	8.87	8.97	0.10	82.06
30	3.51	3.99	3.21	3.57	0.40	92.86
60	7.02	6.63	6.53	6.73	0.26	86.54
90	9.17	9.07	9.27	9.17	0.10	81.66
120	11.12	11.03	11.12	11.09	0.06	77.82

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมและความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	3.31	3.02	3.21	3.18	0.15	93.64
100	4.58	4.87	4.97	4.81	0.20	90.38
150	7.115	7.41	7.31	7.28	0.15	85.44
200	11.25	11.21	11.17	11.21	0.04	77.58
250	13.76	13.47	13.86	13.69	0.20	72.62

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	2.04	2.33	1.94	2.11	0.20	95.78
100	3.51	3.31	3.12	3.31	0.20	93.38
150	7.12	6.92	7.12	7.05	0.11	85.90
200	9.07	8.97	9.07	9.04	0.06	81.92
250	10.53	10.83	11.03	10.80	0.25	78.40

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม
และปริมาณกกสามเหลี่ยม

ปริมาณ สามเหลี่ยม(กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	4.97	4.87	4.97	4.94	0.06	90.12
2	3.99	4.09	3.99	4.02	0.06	91.96
3	3.51	3.21	3.21	3.31	0.17	93.38
4	2.53	2.92	2.82	2.76	0.20	94.48
5	2.43	2.53	2.43	2.46	0.06	95.08

ตารางผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของกกสามเหลี่ยม

ปริมาณ กกสามเหลี่ยม (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	50	4.94	0.05	2.253	0.4439	0.2024	0.3528	0.6937
2	50	4.02	0.05	1.149	0.8703	0.2488	0.0603	0.6042
3	50	3.31	0.05	0.778	1.2853	0.3021	-0.1090	0.5198
4	50	2.76	0.05	0.59	1.6949	0.3623	-0.2291	0.4409
5	50	2.46	0.05	0.475	2.1053	0.4065	-0.3233	0.3909

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนและปริมาณบอน

ปริมาณบอน (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	3.51	3.31	3.60	3.47	0.15	93.06
2	2.33	2.42	2.32	2.36	0.05	95.36
3	1.87	1.94	1.87	1.89	0.04	96.22
4	1.53	1.74	1.53	1.60	0.12	96.80
5	1.32	1.32	1.25	1.30	0.04	97.50

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของบอน

ปริมาณบอน (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	50	3.47	0.05	2.33	0.4299	0.2882	-0.3666	-0.5403
2	50	2.36	0.05	1.19	0.8396	0.4237	-0.0759	-0.3729
3	50	1.89	0.05	0.80	1.2492	0.5291	0.0966	-0.2765
4	50	1.53	0.05	0.61	1.6529	0.6536	0.2182	-0.1847
5	50	1.30	0.05	0.49	2.0534	0.7692	0.3125	-0.1139

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยมร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	2.55	2.65	2.16	2.45	0.26	4.90	95.10
100	4.78	4.39	4.78	4.65	0.22	9.30	90.70
150	19.28	19.36	19.36	19.33	0.05	38.66	61.34
200	27.92	28.52	28.13	28.19	0.31	56.38	43.62
250	40.79	40.56	40.78	40.71	0.13	81.42	18.58

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของบอนร้อยละฟีนอลที่เหลือและปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	1.36	1.06	0.97	1.13	0.20	2.26	97.74
100	4.78	5.07	5.36	5.07	0.29	10.14	89.86
150	16.98	16.79	17.28	17.01	0.25	34.02	65.98
200	24.40	24.60	24.79	24.60	0.20	49.20	50.80
250	35.05	35.34	35.54	35.31	0.25	70.62	29.38

ตารางผนวกที่ 15 การดูดซับฟีนอลของกกสามเหลี่ยม โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอล				S.D.	ร้อยละการดูดซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
ใช้งานครั้งแรก	4.09	4.58	4.38	4.35	0.25	91.29
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	10.54	10.05	9.66	10.08	11.67	79.83
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	24.40	24.21	24.79	24.47	6.87	51.06
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	36.61	37.39	37.00	37.00	0.39	25.99

ตารางผนวกที่ 16 การดูดซับฟีนอลของบอน โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอล				S.D.	ร้อยละการดูดซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
ใช้งานครั้งแรก	3.21	3.31	3.51	3.34	0.15	93.32
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	12.21	12.45	12.25	12.30	12.03	75.39
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	26.76	26.39	26.54	26.56	7.40	46.88
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	40.17	39.97	40.10	40.08	31.79	19.84

ตารางผนวกที่ 17 การดูซ้ำฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ และเยื่อกระดาษ A B C D E และF ของกสสามเหลี่ยม

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูซ้ำ
	ก่อนการ ดูซ้ำ	หลังการดูซ้ำ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	5.36	0.38	0.67	0.48	0.51	0.15	90.48
B	8.77	2.13	2.33	2.13	2.20	0.12	74.91
C	5.06	0.96	1.18	1.01	1.05	0.12	79.25
D	3.81	0.97	0.77	1.36	1.03	0.30	72.97
E	3.13	1.55	0.38	0.97	0.97	0.59	69.00
F	3.96	0.28	0.48	0.38	0.38	0.10	90.40

ตารางผนวกที่ 18 การดูซ้ำปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจาก บริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ A B C D E และF ของบอน

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูซ้ำ
	ก่อนการ ดูซ้ำ	หลังการดูซ้ำ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	5.36	0.48	0.67	0.28	0.48	0.19	91.04
B	8.77	1.65	1.46	1.74	1.62	0.14	81.53
C	5.06	0.97	0.77	1.16	0.97	0.20	80.83
D	3.81	1.26	1.01	1.36	1.21	0.18	68.24
E	3.13	1.16	1.74	0.87	1.26	0.44	59.74
F	3.96	0.38	0.19	0.38	0.32	0.11	91.91

ตารางผนวกที่ 19 แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจากบริษัทอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อ
กระดาษ 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)	447	535	567	491	365	272	ไม่เกิน 3,000
TSS (มิลลิกรัม/ลิตร)	931	953	410	4,160	125	125	50
Alkalinity (มิลลิกรัม/ลิตร ของ CaCO ₃)	870	465	158.75	209.75	191.25	120	ไม่ได้กำหนด
Hardness (มิลลิกรัม/ลิตร ของCaCO ₃)	1065	930	535	295	750	1,000	-
COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	2,880	2,160	1,800	15,200	200	1,000	ไม่เกิน 120
BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	25	92	145	1,478	30	150	ไม่เกิน 20
Sulfide (มิลลิกรัม/ลิตร)	0.2	1	5.56	2.7	0.92	1	ไม่เกิน 1
pH	7.30	6.6	6.7	6.4	7	8.3	5.5-9.0
Temperature (°C)	43.7	42.8	41.3	33.1	37	39	ไม่เกิน 40 °C
Turbidity (NTU)	92	936	196	986	220	118	ไม่ได้กำหนด
DO (มิลลิกรัม/ลิตร)	1.69	1.79	1.29	0.34	0.97	2.21	ไม่ได้กำหนด
EC (ไมโครซีเมนส์)	893	1171	1,127	1,040	731	543	ไม่ได้กำหนด
% Sulfate	0.15	0.07	0.1	0.16	0.14	0.07	-
Total Phenolic (มิลลิกรัม/ลิตร)	5.36	8.77	3.81	5.06	3.13	3.96	ไม่เกิน 1

ตารางผนวกที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD

กกสามเหลี่ยม		บอน	
ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับฟีนอล
4	75.42 ^E	4	93.80 ^A
5	90.06 ^A	5	89.66 ^B
6	87.12 ^B	6	85.50 ^C
7	84.60 ^C	7	82.96 ^D
8	81.98 ^D	8	77.82 ^E

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 21 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD

กกสามเหลี่ยม		บอน	
ระยะเวลาปั่นกวน (นาท)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาปั่นกวน (นาท)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
10	86.74 ^E	10	85.38 ^B
30	90.84 ^A	30	93.02 ^A
60	82.84 ^B	60	86.22 ^B
90	73.06 ^C	90	81.72 ^C
120	66.56 ^D	120	83.14 ^D

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD

กกสามเหลี่ยม		บอน	
ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
10	85.76 ^E	10	82.06 ^C
30	91.94 ^A	30	92.86 ^A
60	81.00 ^B	60	86.54 ^B
90	76.90 ^C	90	81.66 ^C
120	73.66 ^D	120	77.82 ^D

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 23 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี LSD

กกสามเหลี่ยม		บอน	
ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
50	95.78 ^A	50	93.64 ^A
100	93.38 ^B	100	90.38 ^B
150	85.90 ^C	150	85.44 ^C
200	81.92 ^D	200	77.58 ^D
250	78.40 ^E	250	72.62 ^E

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกากสามเหลี่ยมและบอนทางสถิติโดยวิธี LSD

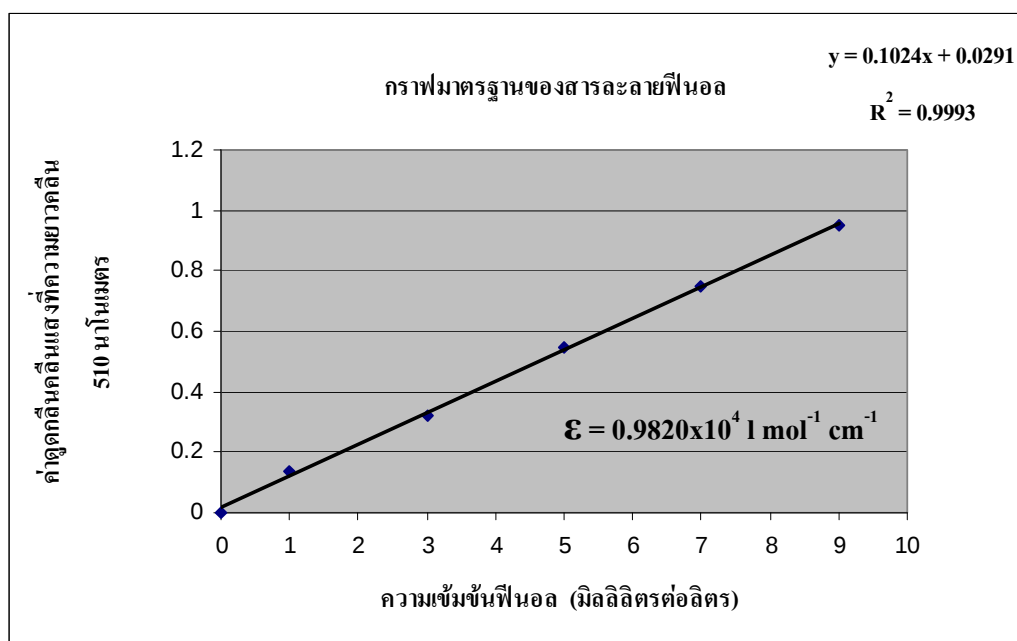
กากสามเหลี่ยม		บอน	
ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
1	90.12 ^A	1	93.06 ^A
2	91.96 ^B	2	95.36 ^B
3	93.38 ^C	3	96.22 ^C
4	94.48 ^D	4	96.80 ^D
5	95.08 ^E	5	97.50 ^E

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 25 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกากสามเหลี่ยมและบอนการดูดซับฟีนอลในน้ำเสีย
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเทียบจากค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียของบริษัท
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษต่างๆทางสถิติโดยวิธี LSD

กากสามเหลี่ยม		บอน	
ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
0.5	93.15 ^A	0.5	93.15 ^A
0.75	94.80 ^B	0.75	94.80 ^B
1	96.15 ^C	1	96.15 ^{CD}
1.5	96.25 ^C	1.5	96.25 ^{DEC}
2	96.35 ^C	2	96.35 ^{EC}

หมายเหตุ XX^x: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอิสระ ตั้งสุวรรณ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสระบุรี
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนแก่งคอย จังหวัด สระบุรี ปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2548
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

