



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

### ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยต้นธูปฤาษีและใบสะเดา

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by *Typha Angustifolia* Linn. and  
*Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton

นามผู้วิจัย นางสาวสุวรรณา หอมชื่น

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตังคณานุกฤษ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์พิลาณี ไวถนอมสัตย์, Ph.D. )

ประธานสาขาวิชา

( ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยต้นธูปฤาษีและใบสะเดา

Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by *Typha Angustifolia* Linn. and  
*Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton

โดย

นางสาวสุวรรณา หอมชื่น

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

สุวรรณภา หอมชื่น 2551: การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วย  
ต้นธูปฤาษีและใบสะเดา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)  
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 101 หน้า

ฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับจากรูปฤาษีและสะเดา ถูกตรวจวัดในรูป quinoneimine ด้วย  
วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสถานะ  
การดูดซับ ได้แก่ พีเอช (3-10) ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล  
(50-500 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณของตัวดูดซับ นอกจากนี้กระบวนการดูดซับของรูปฤาษีและ  
สะเดา สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ตามลำดับ จากสถานะที่  
เหมาะสมของการดูดซับถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย  
จากโรงงานผลิตกระดาษ

Suwannapa Homchuen 2008: Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by *Typha Angustifolia* Linn. and *Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 101 pages.

The remained phenol after its adsorptive extraction from *Typha Angustifolia* Linn. and *Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton can be determined by spectrophotometrically at 510 nm as quinoneimine. The effects of pH (3-10), shaking time or digestion time, contact time, initial concentration of phenol (50-500 mg/L) and amount of adsorbent are reported. In addition, the adsorption process of *Typha Angustifolia* Linn. and *Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton 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

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ดร.นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พิลาณี ไวถนอมสัจด์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริที่ได้สนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณภทรมน โสกันธิกาเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อชานาญและคุณแม่อรวรรณ หอมชื่น ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจเสมอมา รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 30 ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุวรรณา หอมชื่น  
กันยายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุป	78
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	86
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สภาพกรดของฟีนอล	6
2	แสดงฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน	13
3	ส่วนประกอบทางเคมีของไบอะเซตาสด	24
4	ส่วนประกอบทางเคมีของไบอะเซตแห้ง	25
5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต	55
6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรูปถ่ายและไบอะเซตกับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต	56
7	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการปั่นกววน (นาที) กับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต	58
8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัส (นาที) กับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต	60
9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร) กับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต	67
10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าย และร้อยละฟีนอลที่เหลือ	69
11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับ ฟีนอลของไบอะเซตและร้อยละฟีนอลที่เหลือ	70
12	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและการฟื้นฟูสภาพรูปถ่าย	71
13	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับฟีนอลของไบอะเซตและการฟื้นฟูสภาพไบอะเซต	73
14	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรูปถ่ายและไบอะเซตกับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบอะเซต เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร	75

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัท ต่างๆ โดยใช้รูปถ่าย	75
16	ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัท ต่างๆ โดยใช้ใบสะเดา	76
<b>ตารางผนวกที่</b>		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและค่าพีเอช	87
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและค่าพีเอช	87
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและปริมาณรูปถ่าย	88
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและปริมาณ ใบสะเดา	88
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและระยะเวลา ปั่นกวาน	89
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและระยะเวลา ปั่นกวาน	89
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและระยะเวลา สัมผัส	90
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและระยะเวลา สัมผัส	90
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและความเข้มข้น ของฟีนอล	91
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและความเข้มข้น ของฟีนอล	91
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับของรูปถ่าย	92
12	ไอโซเทอร์มการดูดซับของใบสะเดา	92



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าย ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	93
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดา ร้อยละฟีนอลที่เหลือ และปริมาตรฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์	93
15	การดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	94
16	การดูดซับฟีนอลของใบสะเดาที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว	94
17	การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยรูปถ่ายเป็นตัวดูดซับ	95
18	การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยใบสะเดาเป็นตัวดูดซับ	95
19	แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจาก บริษัทต่างๆ	96
20	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD	97
21	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณรูปถ่ายและใบสะเดาทางสถิติโดยวิธี LSD	98
22	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD	98
23	แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมผัสทางสถิติโดยวิธี LSD	99
24	แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลทางสถิติโดยวิธี LSD	99

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	พินอลและอนุพันธ์ของพินอล	4
2	การเกิดปฏิกิริยาของพินอล	12
3	การระบุตำแหน่ง ortho ( <i>o</i> ), meta ( <i>m</i> ) และ para ( <i>p</i> ) ในพินอล	13
4	รูปถ่าย <i>Typha angustifolia</i> Linn.	16
5	สะเดา <i>Azadirachta indica</i> A. Juss. <i>Vas Siamensis</i> Valetton	20
6	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ	27
7	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ	29
8	กราฟความชันระหว่าง log <i>q</i> และ log <i>C</i>	33
9	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	34
10	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกละลายถูกดูดซับจนอิ่มตัว	35
11	กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$	36
12	รูปถ่ายใบคเป็นผง	46
13	สะเดาใบคเป็นผง	46
14	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	48
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับพินอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับค่าพีเอช	53
16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับพินอลกับปริมาณรูปถ่ายและใบสะเดา	55
17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับพินอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับระยะเวลาการปั่นกว	57
18	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับพินอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับระยะเวลาสัมผัส	59
19	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับพินอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพินอล	61
20	ไอโซเทอร์มการดูดซับพินอลของแลงเมียร์โดยรูปถ่าย	62
21	ไอโซเทอร์มการดูดซับพินอลของแลงเมียร์โดยใบสะเดา	64

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยรูปถ่าย	65
23	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิช โดยใบสะเดา	66
24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอล และร้อยละฟีนอลที่เหลือของรูปถ่าย	68
25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอล และร้อยละฟีนอลที่เหลือของใบสะเดา	70
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและการฟื้นฟูสภาพรูปถ่าย	71
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและการฟื้นฟูสภาพใบสะเดา	72
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและปริมาณรูปถ่ายเมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมลิตร	74
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและปริมาณใบสะเดาเมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมลิตร	74
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล	100

## การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วยต้นธูปฤาษีและใบสะเดา

### Adsorption of Phenol and its Derivatives in Solution by *Typha Angustifolia* Linn. and *Azadirachta indica* A. Juss Var. *Siamensis* Valetton

#### คำนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ มนุษย์ได้ใช้น้ำในการทำกิจกรรมต่างๆ และน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุทำให้เกิดมลภาวะทางน้ำ โดยน้ำเสียจะระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินไปอย่างไม่หยุดยั้งได้ก่อให้เกิดมลพิษมากมาย โดยการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆ ในปัจจุบันมีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมให้ผลผลิตมีเพิ่มมากขึ้น อุตสาหกรรมมีการเจริญเติบโตก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นต้องใช้สารเคมีต่างๆ ถ้าสารเคมีเหล่านั้นตกค้างในสิ่งแวดล้อม ก็จะมีผลทำลายระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันของเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ นับวันยิ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษมากขึ้นยิ่งชุมชนมีความเจริญและมีความหนาแน่นของประชากรมากเท่าใด ก็จะมีก่อให้เกิดปัญหามลพิษมากขึ้น น้ำเสียจากชุมชนเป็นปัญหาหลักประการหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก น้ำเสียเหล่านี้สามารถแก้ไขและ/หรือปรับปรุงสภาพให้ดีขึ้นด้วยการบำบัดเพื่อให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมียูอยู่อย่างหลากหลายวิธีการ แต่เทคโนโลยีที่สร้างขึ้นเหล่านี้มักจะต้องใช้การลงทุนที่ค่อนข้างสูงทั้งในด้านเครื่องจักรกลและพลังงาน จึงนำการบำบัดน้ำเสียที่เป็นวิธีที่อาศัยธรรมชาติช่วยเหลือธรรมชาติ โดยการอาศัยพืชเข้ามาช่วยในการบำบัด

สารประกอบฟีนอลิก เป็นสารปนเปื้อนที่พบในสิ่งแวดล้อม ถึงแม้พบการปนเปื้อนในปริมาณน้อยก็สามารถทำให้เกิดปัญหาในด้านกลิ่นและรสต่อการใช้น้ำและเกิดผลกระทบต่อกระบวนการชีวภาพ เป็นสาเหตุให้กลิ่นและรสของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากปกติและมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งการสลายตัวของสารเหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและเป็นสารพิษที่สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (Vidic *et al.*, 1993) ฟีนอลถูกนำมาใช้ในภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม โดยนำมาใช้ในการผลิตพลาสติก ยา สี เรซิน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในการผลิตยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อรา และยาป้องกันการติดเชื้อ

ต้นรูปถายีเป็นวัชพืชชนิดหนึ่ง ในสกุล Typha โดยรูปถายีเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี มีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น นำมาบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชน้ำร่วมกับเครื่องเติมอากาศ นำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทน นำมาทำอาหารสัตว์ นำมาใช้เป็นยาในการรักษาโรคต่างๆ นำมาทำปุ๋ยหมัก จะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูง สะเดาเป็นพืชในสกุล Meliaceae เป็นไม้เอนกประสงค์ นอกจากการใช้ประโยชน์เนื้อไม้แล้วใบและดอกสามารถใช้เป็นอาหารคน ใช้เป็นยารักษาโรค เมล็ดของสะเดายังสามารถนำมาสกัดทำยาฆ่าแมลงได้อีกด้วย ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการนำต้นรูปถายีและใบสะเดา มาใช้ในการกำจัดสารละลายฟีนอล เป็นการนำวัสดุทางธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลายด้วย  
รูปถุภษัและใบสะเดา
2. เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในสารละลาย  
ด้วยรูปถุภษัและใบสะเดา
3. เพื่อนำรูปถุภษัและใบสะเดา ที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ไปประยุกต์ใช้ในการ  
ดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

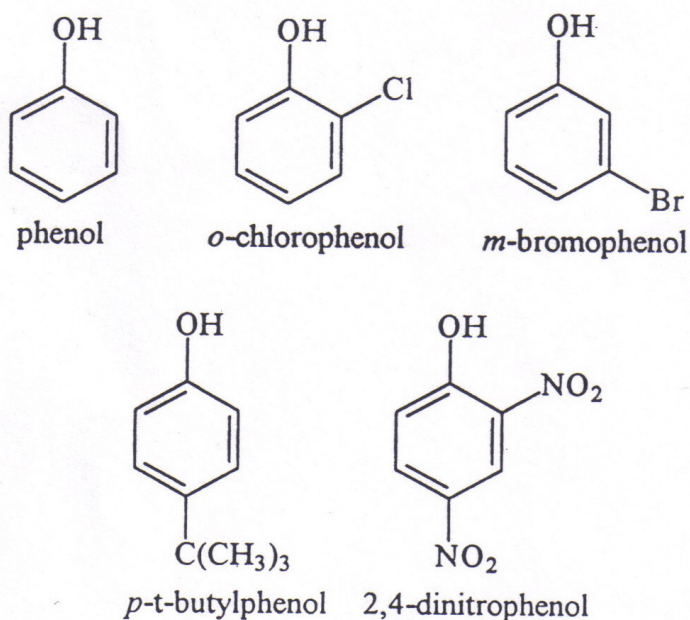
## การตรวจเอกสาร

### 1. ฟีนอล

ฟีนอล คือสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลต่อโดยตรงกับหมู่ฟีนิลหรือเป็นหมู่ฟีนิลซึ่งถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแทนที่ได้ด้วยสูตรทั่วไปเป็น  $\text{ArOH}$  ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) เมื่อ Ar คือหมู่ฟีนิล ซึ่งอาจเป็นหมู่ฟีนิลที่มีหมู่แทนที่หรือหมู่เอริลชนิดต่างๆ เช่น แนฟทิล ฟีนอลมีความแตกต่างจากแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลต่อโดยตรงกับหมู่แอลคิล

#### 1.1 การเรียกชื่อ

การเรียกชื่อฟีนอลใช้เรียกชื่อสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลต่อกับฟีนิล ถ้ามีหมู่อื่นต่ออยู่ด้วยให้เรียกชื่อหมู่แทนที่ ซึ่งต่ออยู่พร้อมทั้งระบุตำแหน่งของหมู่แทนที่และลงท้ายชื่อด้วยฟีนอล ดังตัวอย่างต่อไปนี้

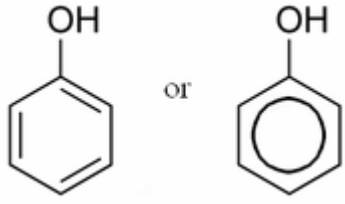


ภาพที่ 1 ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

ที่มา: โสภณ และคณะ (2545)

แต่ถ้ามีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าหนึ่งหมู่หรือมีหมู่อื่นมาต่ออยู่บนวงอะโรมาติกด้วย อาจเรียกชื่อเฉพาะแตกต่างไปจากฟีนอลหรืออนุพันธ์ของฟีนอล

## 1.2 การบ่งลักษณะ

- 1.2.1 ชื่อสามัญ : phenol
- 1.2.2 ชื่อเคมี : phenol
- 1.2.3 ชื่ออื่น : acide carbolique
- 1.2.4 สูตรโมเลกุล :  $C_6H_6O$  (C 76.57%, H 6.43%, O 17.00%)
- 1.2.5 สูตรโครงสร้าง : 
- 1.2.6 น้ำหนักโมเลกุล : 94.11

## 1.3 สมบัติทางกายภาพ

ฟีนอลเป็นของเหลวหรือของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีจุดเดือดสูง อันเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ตัวสารฟีนอลเองสามารถละลายน้ำได้ประมาณ 9 กรัมในน้ำ 100 กรัม ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากฟีนอลเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ สำหรับอนุพันธ์ฟีนอลอื่นๆ นั้นส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ เว้นเสียแต่สารประกอบฟีนอลนั้นมีหมู่ฟังก์ชันอื่น ซึ่งทำให้ละลายได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น กรดซาลิไซลิก ฟีนอลเป็นผลึกรูปเข็ม ไม่มีสี เมื่อโดนอากาศจะมีสีชมพูอ่อนๆ จุดหลอมเหลว 40.85 องศาเซลเซียส จุดเดือด 182 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 79 องศาเซลเซียส สารละลายของฟีนอลเป็นกรดอ่อน โดยมีค่า  $pK_a$  10.0 ฟีนอลละลายได้ในกลีเซอรอล คาร์บอนไดซัลไฟด์ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม อนุพันธ์ของฟีนอลส่วนมากมีสี ขณะที่ตัวสารฟีนอลไม่มีสี แต่ฟีนอลเมื่อถูกออกซิไดส์จะทำให้มีสีไปทางแดงจนถึงแดงเข้ม



#### 1.4 สภาพกรดของฟีนอล

ฟีนอลมีค่า  $pK_a$  เท่ากับ 10.00 แต่ถ้ามีหมู่แทนที่บนวงอะโรมาติก ค่า  $pK_a$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของหมู่แทนที่ ค่า  $pK_a$  ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 8-10 ถ้าหมู่แทนที่เป็นชนิดให้อิเล็กตรอนจะทำให้ค่า  $pK_a$  สูงกว่าของฟีนอลคือสูงกว่า 10 แต่ถ้าหมู่แทนที่เป็นชนิดดึงอิเล็กตรอนค่า  $pK_a$  จะต่ำกว่าฟีนอล นอกจากขึ้นกับชนิดของหมู่แทนที่แล้วยังขึ้นกับตำแหน่งหมู่แทนที่ที่ต่ออยู่บนวงอะโรมาติกด้วย ถ้าอยู่ในตำแหน่งออร์โธและพาราจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $pK_a$  มาก

#### ตารางที่ 1 สภาพกรดของฟีนอล

สารประกอบ	ค่า $pK_a$		
	ออร์โธ	เมตา	พารา
phenol	10.00	10.00	10.00
cresol	10.29	10.09	10.26
fluorophenol	8.80	9.28	9.80
chlorophenol	8.50	9.02	9.40
bromophenol	8.40	8.90	9.30
methoxyphenol	8.50	8.90	9.20
iodophenol	9.98	9.65	10.20
cyanophenol	-	-	7.95
nitrophenol	7.20	8.40	7.15

ที่มา: โสภณ และคณะ (2545)

จากตารางแสดงว่าถ้ามีหมู่แทนที่ต่ออยู่ในตำแหน่งออร์โธหรือพาราของฟีนอล จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพกรดมากกว่าตำแหน่งเมตา ยกตัวอย่างเช่น ไนโตรฟีนอลมีสภาพกรดแก่กว่าฟีนอล เนื่องจากมีหมู่นิโตรเป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอนแต่เมื่อแตกตัวให้โปรตอนไปแล้ว ประจุลบสามารถกระจายเข้าไปอยู่ในวงได้ โดยผลจากการเกิดเรโซแนนซ์ได้มากกว่า ถ้าหมู่ดึงอิเล็กตรอนต่ออยู่ในตำแหน่งออร์โธหรือพารา

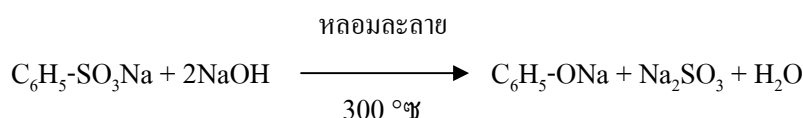
## 1.5 กรรมวิธีการผลิตฟีนอล

กรรมวิธีการผลิตฟีนอลในทางอุตสาหกรรมมีหลายวิธีคือ

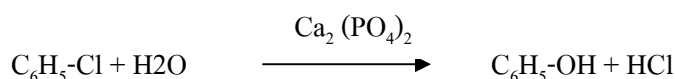
1.5.1 กระบวนการ Hock คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารคิวมินได้เป็นไฮโดรเพอรอกไซด์และถูกแยกสลายต่อกับกรดเจือจางได้เป็นฟีนอลและอะซีโตนจะเห็นได้ว่านอกจากฟีนอลแล้วผลผลิตจากปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งคืออะซีโตน ซึ่งระเหยได้ทำให้ไม่มีกาของเสียจากการผลิตเกิดขึ้น จึงทำให้วิธีนี้เป็นวิธีผลิตฟีนอลทางการค้าที่นิยมกันอย่างมากในปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จากในปี 1993 ประเทศสหรัฐอเมริกาผลิตฟีนอลได้ 1,544,222 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้ 1,447,000 ตันหรือมากกว่า 93% ผลิตโดยวิธีคิวมินออกซิเดชัน

1.5.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันสารโทลูอินได้เป็นกรดเบนโซอิกแล้วตามด้วยปฏิกิริยา oxidative decarboxylation ได้ฟีนอลวิธีนี้เป็นวิธีผลิตฟีนอลทางการค้าของบริษัท Dow Chemical สหรัฐอเมริกา

1.5.3 ปฏิกิริยาซัลโฟเนชันสารเบนซีน ได้เป็นเบนซีนซัลโฟเนต แล้วจึงนำไปหลอมละลายกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 300 °ซ ผลผลิตที่ได้คือ โซเดียมฟีนทซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดจะได้ฟีนอล



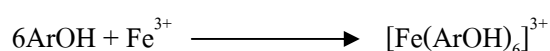
1.5.4 ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำของสารคลอโรเบนซีนด้วยไอน้ำ โดยมี tricalcium phosphate หรือซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



## 1.6 วิธีทดสอบสารจำพวกฟีนอล

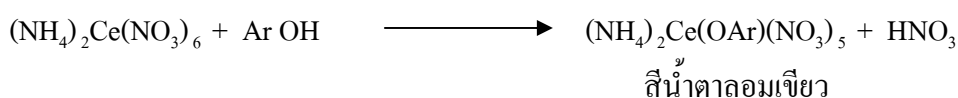
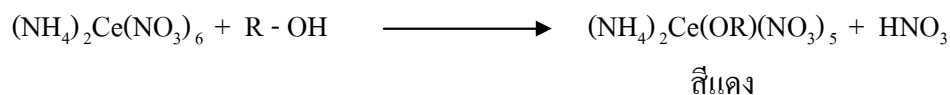
### 1.6.1 การทดสอบเฟอริกคลอไรด์

เมื่อเติมสารละลายเฟอริกคลอไรด์ลงในสารละลายฟีนอลหรืออนุพันธ์ของฟีนอลจะได้สารประกอบคอมเพล็กซ์ที่มีสีม่วง เขียว หรือชมพู เพราะว่าเหล็กจะเกิดเป็นเกลือของฟีนอลและทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ด้วย ดังนั้นเฟอริกจะถูกรีดิวส์เป็นเฟอร์รัสบางส่วน



### 1.6.2 การทดสอบซีริกไนเตรด

ใช้ทดสอบแอลกอฮอล์และฟีนอลถ้าได้สารเชิงซ้อนมีสีแดง แสดงว่าเป็นแอลกอฮอล์ แต่ถ้ามีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลอมเขียวแสดงว่าเป็นฟีนอล



## 1.7 การใช้

1.7.1 ฟีนอลใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ เป็นสารละลายเดี่ยวหรือสารละลายผสมกับยาฆ่าเชื้อตัวอื่น ฟีนอลมีฤทธิ์เป็น bacteriostatic ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.2% มีฤทธิ์เป็น bacteriocide ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1% และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราได้ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.3% ฟีนอลยังใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อชนิดต่างๆ โดยวัดเป็นค่า phenol coefficient (AOAC, 1995)

1.7.2 ใช้ในการผลิตสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น กลีเซอรอล, ไชเลนอล, กรดซาลิซิก, อะนิลีน, ฟีนอลิกเรซิน

## 1.8 ทางไปสู่สิ่งแวดล้อม

ฟินอลเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจากแหล่งต่างๆ คือ

1.8.1 อุตสาหกรรม จากกระบวนการผลิตและการใช้ฟินอลในการผลิตสารเคมีชนิดต่างๆ

1.8.2 บ้านเรือนและห้องปฏิบัติการ จากการใช้ฟินอลเป็นสารฆ่าเชื้อ

1.8.3 รถยนต์ ไอเสียรถยนต์มีฟินอลผสมกันอยู่เล็กน้อยที่ความเข้มข้น 1.2-7.7 มิลลิเมตร/ลูกบาศก์เมตร (Kuwata *et al.*, 1980; Verschueren, 1996)

1.8.4 การย่อยสลายของเบนซิน โดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในอากาศ (IPCS, 1994)

## 1.9 การเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม

ฟินอลในสิ่งแวดล้อมสลายตัวได้อย่างรวดเร็วทั้งในอากาศ น้ำและดิน การสลายตัวของฟินอล ในอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 2.28-22.8 ชั่วโมงเท่านั้น การสลายตัวของฟินอลในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดินเกิดขึ้นทั้งใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน

ฟินอลสะสมได้เพียงเล็กน้อยในสิ่งมีชีวิตในน้ำ bioconcentration factor (BCF) ของฟินอลใน algae *Chlorella fusca* และปลา *Leuciscus idus melanotus* มีค่าเท่ากับ 200 และ 20 ตามลำดับ (Freitag *et al.*, 1985)

## 1.10 พิษของฟินอล

1.10.1 ต่อสัตว์น้ำ เช่น ปลา เมื่อปลาได้รับสารพิษจะถูกกระตุ้นให้ระคายเคืองจนขาดการควบคุม ว่ายน้ำไม่มั่นคง ครีบจะสั้นเทา ในที่สุดจะเสียการทรงตัว หมุนรอบๆ และตายใน

ที่สุด หรืออาจอยู่ในสภาพไร้ความรู้สึก โดยเฉพาะฟินอลและครีซอล จะมีผลต่อการรบกวนประสาทอย่างสูง

1.10.2 ต่อสัตว์ชั้นสูงอื่นๆ เช่นในกบ ไชสันหลังจะถูกรบกวนให้ระคายเคืองจนทำให้กล้ามเนื้อหดเกร็งอย่างรุนแรง ในที่สุดก็จะเป็นอัมพาต

1.10.3 ต่อมนุษย์ ถ้าระดับความเข้มข้นน้อยๆ จะทำให้รู้สึกคลื่นเหียน วิงเวียนเสียการทรงตัว หายใจไม่สม่ำเสมอ ถ้ามีความเข้มข้นมากๆ จะทำให้กล้ามเนื้อเกร็งอย่างรุนแรงและทำให้หัวใจล้มเหลวในที่สุด

## 1.11 ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

### 1.11.1 พิษต่อสัตว์

ฟินอลมีพิษปานกลางต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ค่า  $LD_{50}$  ในสัตว์กักตุนที่ได้รับฟินอล ทางปาก มีค่าระหว่าง 300-600 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ค่า  $LD_{50}$  ในหนู rat และกระต่ายที่ได้รับ ฟินอลทางผิวหนัง มีค่าเท่ากับ 670 และ 1,400 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว ตามลำดับ  $LD_{50}$  ในหนู rat ที่ได้รับโดยการฉีดเข้าช่องท้อง มีค่าอยู่ในช่วง 127-223 มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว

สัตว์ทดลองที่เสียชีวิตจากการได้รับฟินอล ที่ความเข้มข้นสูงนั้นมีสาเหตุมาจากฤทธิ์ในการกดระบบประสาทส่วนกลางของฟินอลลักษณะอาการของการเกิดพิษจากฟินอลไม่ขึ้นกับวิธีการการได้รับสารเข้าสู่ร่างกาย ความเป็นพิษที่พบในสัตว์ทดลอง ได้แก่ ประสาทและกล้ามเนื้อไวต่อการกระตุ้นมากเกินไป (neuromuscular hyperexcitability) เช่น ประสาทกล้ามเนื้อกระตุกและชัก อัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้นในระยะแรกและกลับช้าลงและไม่เป็นจังหวะสม่ำเสมอ ความดันโลหิตสูงเล็กน้อยในตอนแรก ซึ่งต่อมาจะลดลงมาก น้ำลายไหล หายใจขัด และอุณหภูมิของร่างกายลดลง มีฤทธิ์กัดผิวหนังและเยื่อในลำคอและทางเดินอาหาร เมื่อกินฟินอลเข้าไป (Deichmann and Keplinger, 1963) นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของปอดและเส้นใยประสาท ทำลายเนื้อเยื่อของตับ ไต และต่อมธัยมัสและยับยั้งการตอบสนองของรูมานตาต่อแสงรูมานตาคำหดเล็กผิดปกติ (Schlicht *et al.*, 1992)

### 1.11.2 พิษต่อมนุษย์

ระดับความเป็นพิษ มีรายงานการเสียชีวิตในมนุษย์ (ผู้ใหญ่) ที่ได้รับฟีนอล โดยการกินในปริมาณเพียง 1 กรัม ส่วนการได้รับสัมผัสทางผิวหนังอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้เช่นกัน พบผู้ป่วยเสียชีวิตจากการกรดของสารละลายฟีนอล (ความเข้มข้น 80-100%) ที่บริเวณแก้ม หนึ่ง ศีรษะ สะโพก ต้นขา และอุ้งอัมตะ (Turtle and Dolan, 1992) ผู้ป่วยอีกรายหนึ่งทำ 2-4-dichlorophenol บริสุทธิ์หกคร่ำงกายเป็นบริเวณกว้างน้อยกว่า 10% ของพื้นที่ร่างกาย พบว่าผู้ป่วย ชักและหมดสติภายในเวลา 20 นาที นอกจากนี้มีรายงานทารกเสียชีวิตจากการใช้สารละลายฟีนอล ทาสะดือโดยมีผ้าพันแผลปิดทับสนิท (Hinkel and Kintzel, 1968) และผู้ป่วย 1 รายเสียชีวิตเมื่อ ใช้สารละลายฟีนอล สารละลายฟีนอลร้อยละ 2 โดยปริมาตร ทาแผลไฟไหม้เป็นบริเวณกว้าง มากกว่า 30% ของพื้นที่ร่างกาย

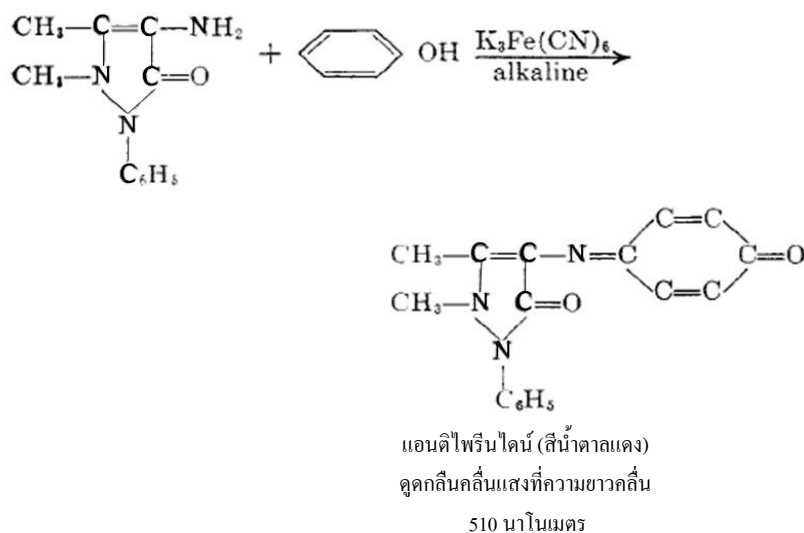
1) พิษเฉียบพลัน ฟีนอล ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายไม่ว่าจะรับสารโดยการ รับประทาน การสูดดมหรือสัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากฟีนอล มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรงทำให้เกิดเป็นแผลไหม้ในบริเวณที่ได้รับสัมผัสโดยตรง เช่น ช่องปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ตา และผิวหนัง หากเข้าตาอาจทำให้มีอาการตาสู้แสงไม่ได้ (photophobia) กระจกตาเป็นแผลหรืออาจ ถึงกับตาบอดได้ ฟีนอลถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็วและอาจทำให้เสียชีวิตภายในเวลา 10 นาที

2) พิษเรื้อรัง การได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกายซ้ำหลายครั้งในปริมาณมาก พบว่า ทำให้อาเจียน กลืนอาหารลำบาก น้ำลายไหล ท้องเสีย เบื่ออาหารและน้ำหนักตัวลด ปวดศีรษะ เป็น ลม มีนงง อารมณ์แปรปรวน ตับและไตถูกทำลาย ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ อ่อนเพลีย ปัสสาวะมีสีคล้ำ ผิวหน้าแตกเป็นแผล และอาจมีสีผิวผิดปกติ เช่น พบจุดสีน้ำตาลบนข้อนิ้วหลายแห่งและมีรายงาน ในคนที่สัมผัสฟีนอล(8.5%) จากทำรายงานพบว่ามีผิวหนังด่างขาว นอกจากนี้การใช้สเปรย์หรือยา อมที่มีส่วนผสมของฟีนอล อาจทำให้เจ็บคอ

### 1.12 ดัชนีฟีนอล (phenol index)

ดัชนีฟีนอลบ่งบอกถึงฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่สามารถทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิ โนแอนติไพรีน (4-AAP) เกิดเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine

ฟีนอลถูกใช้เป็นตัวแทนของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในการเกิดปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีนและเฟอร์ริกไซยาไนด์ไอออนในสถานะที่เป็นเบส ได้สารละลายสีน้ำตาลแดงของ quinoneimine ดังปฏิกิริยา

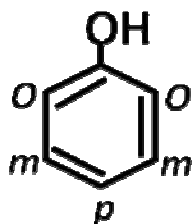


## ภาพที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาของฟีนอล

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

เนื่องจากในแหล่งน้ำเสียอาจจะประกอบด้วยฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลหลายชนิด ดังนั้นการรายงานปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่เกิดจาก 4-อะมิโนแอนติไพรีน จึงถูกระบุเป็นปริมาณฟีนอลหรือดัชนีฟีนอล

สำหรับอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีหมู่ฟังก์ชัน แอลคิล ( $C_nH_{2n+1}$ ), เอริล (aryl,  $C_6H_5$ ), ไนโตร ( $NO_2$ ), ไนโตรโซ ( $-N=O$ ) และแอลดีไฮด์ ( $-CHO$ ) ที่เกาะอยู่บนตำแหน่งพารา (para position) ของฟีนอล จะไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน โดยที่ตำแหน่งพาราในฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลจะทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน



ภาพที่ 3 การระบุตำแหน่ง ortho (*o*), meta (*m*) และ para (*p*) ในฟีนอล

ตารางที่ 2 แสดงฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน

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



ตารางที่ 2 (ต่อ)

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

$\epsilon$ : สภาวะดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) -: ไม่เกิดสีกับ 4-อะมิโนแอนติไพรีน

ที่มา: Shinzo Tanabe, Chiaki Ise, Takayoshi Kosuki and Koji Kawanabe (1989)

### 1.13 ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมาย

#### 1.13.1 ประเทศไทย

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

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

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

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้ออกพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งต้องมีฟีนอลไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร และกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2 ต้องมีฟีนอลไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดให้ภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีเอทิลีน โพลีสไตรีน พลิไวนิลดีนคลอไรด์หรือ โพลีเอทิลีนเตตระพลาเทมมีปริมาณฟีนอลได้ไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และต้องไม่พบฟีนอล ในภาชนะบรรจุอาหารที่ทำด้วยพลาสติกชนิดเมลามีน

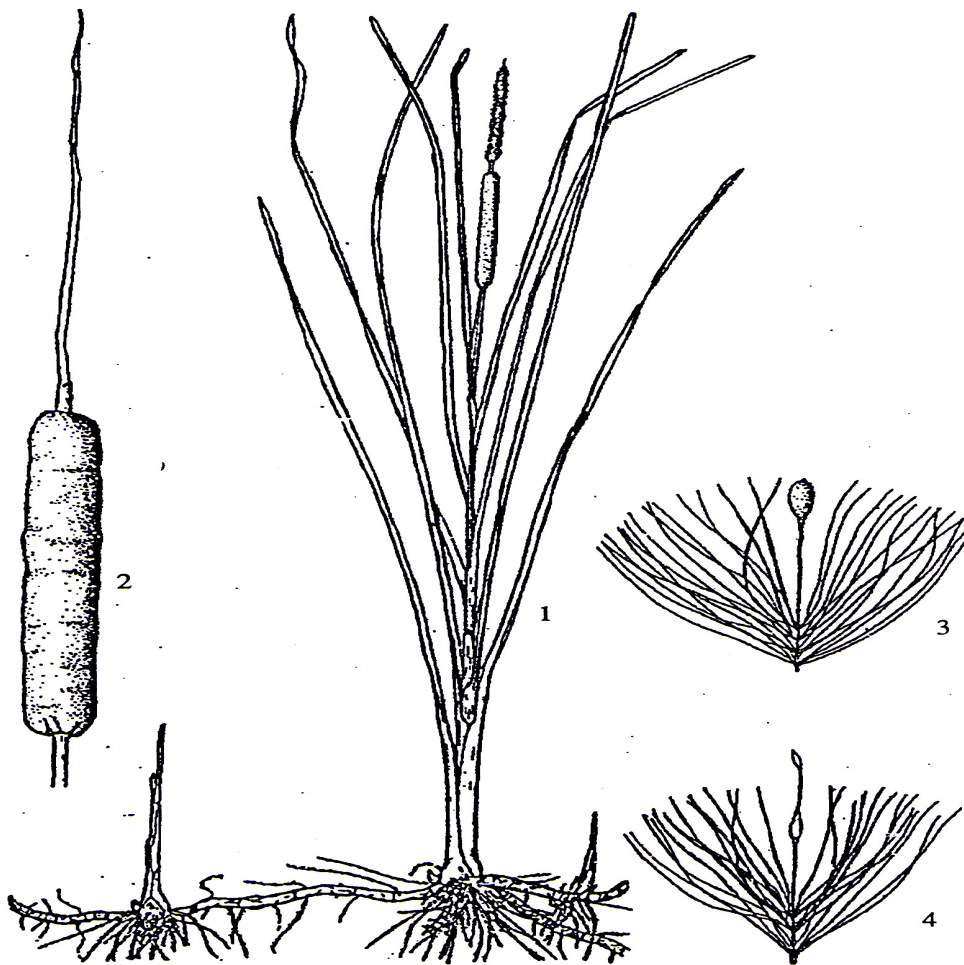
#### 1.13.2 ต่างประเทศ

กฎหมายและข้อกำหนดบางประเภทที่ใช้ควบคุมฟีนอล ในบางประเทศ ได้กำหนดความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ 8 ชั่วโมง/วัน (8 -hour time-weighted

average) เท่ากับ 19 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร (5 ppm) น้ำที่ชำระร่างกายต้องมีฟีนอลเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร

## 2. ต้นธูปฤาษี

2.1 ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Typha angustifolia* Linn.



ภาพที่ 4 ธูปฤาษี *Typha angustifolia* Linn. 1. ลักษณะต้น 2. ช่อดอก 3. ดอกตัวเมียที่เป็นหมัน  
4. ดอกตัวเมียปกติ

ที่มา: สุชาดา (2549)

2.2 ชื่อเรียกสามัญคือ Narrow-leaved cattail, Lesser reedmace, Bulrush, Cattail, Flag, Reedmace tule, Elephant-Grass และ Indian Leedmace

2.3 ชื่อท้องถิ่นคือ ฐูปถายี (กรุงเทพฯ) กกช้าง (กลาง) หญ้าสลาบลวง (เหนือ) ฝื่อ หญ้าฝื่อ ปรือ หญ้าปรือ และหญ้ากกช้าง (ควงพร และรังสิต, 2544; อำพล, 2544)

#### 2.4 การจัดอนุกรมวิธานของฐูปถายี

ฐูปถายีเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่มีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้ (Kartesz, 2002)

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Subclass Commelinidae

Order Typhales

Family Typhaceae

Genus *Typha*

Species *angustifolia*

พืชในสกุล *Typha* มีอยู่ทั่วโลกประมาณ 15 ชนิด (สุชาติ, 2542) ได้แก่ *Typha angustifolia*, *Typha angustata*, *Typha anstralis*, *Typha capensis*, *Typha orientalis*, *Typha davidians*, *Typha domingensis*, *Typha elephantine*, *Typha glauca*, *Typha javanica*, *Typha latifolia*, *Typha laxmannii*, *Typha minima*, *Typha muelleri*, *Typha orientalis*

#### 2.5 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ฐูปถายีเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี ขึ้นในที่ลุ่มมีน้ำขัง เจริญตั้งตรงเป็นกอสูง ประมาณ 1-2 เมตร มีลำต้นใต้ดินเรียกว่า เหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ ใบเป็นใบเดี่ยวแบนเรียบเรียวยาว แหลม ความกว้างของใบประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ยาวมากกว่า 1 เมตร กลางใบมีลักษณะเซลล์ที่มีความยืดหยุ่นเหมือนฟองน้ำ โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกัน กาบใบด้านในมีเมือกเหนียว ดอกออกเป็นช่อแบบสไปค์ (spike) ช่อดอกกลมคล้ายรูป ดอกตัวผู้กับดอกตัวเมียจะแยกกันอยู่คนละ

ส่วนในช่อดอกเดียวกัน คือส่วนที่เป็นดอกตัวผู้อยู่ด้านบนของช่อดอก ดอกย่อยอยู่กันหลวมๆ รอบก้านช่อดอก มีความยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่างเป็นดอกตัวเมีย ดอกย่อยเรียงตัวอัดกันแน่น ความยาวช่อดอก 7-28 เซนติเมตร เมล็ดขนาดเล็กกว้าง 0.2-0.3 มิลลิเมตร ยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร เมล็ดมีขนสั้นละเอียด สีขาวคล้ายไหม (silky) ปกคลุม ปลายทั้งสองด้านเรียวยาว โดยปลายด้านหนึ่งมีหางหรือเส้นยาวยื่นออกมาจากเมล็ด มีลักษณะเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนุน (สุรชัย, 2538; ดวงพร และรังสิต, 2544; อำพล, 2545; สยามมหาวิทยาลัยราชภัฏแห่งประเทศไทย, 2545)

## 2.6 นิเวศวิทยาและการแพร่กระจาย

รูปถ่ายจัดเป็นวัชพืชในกลุ่มวัชพืชชายตลิ่ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกาแพร่กระจายทั่วไปในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และยังพบได้ในอเมริกาเหนือและชายฝั่งแปซิฟิก สำหรับประเทศไทยนั้นพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น ในบริเวณหนองน้ำ บึง นาข้าว ร่องน้ำข้างถนน และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ต้นรูปถ่ายที่อยู่ในเขตที่ลุ่มจะมีการเจริญเติบโตได้ดีตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์โดยเหง้า และเมล็ด ออกดอกตั้งแต่เดือนสิงหาคมเป็นต้นไปช่อดอกมีลักษณะคล้ายก้านรูปขนาดใหญ่สีน้ำตาล (อำพล, 2538 ;อำพล, 2545) มีเมล็ดประมาณ 20,000-700,000 เมล็ด (Grace and Harrison, 1986) เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตกเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนุนและปลิวกระจายทั่วไป ในสภาพที่มีแสงจัดเมล็ดสามารถงอกและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนมีจำนวนหนาแน่นทำให้ลดปริมาณแสงที่ส่องลงมาด้านล่าง เป็นการขัดขวางการเจริญของพืชชนิดอื่น (Grace and Wetzel, 1982) นอกจากนั้นยังสามารถเจริญเติบโตในสภาพดินและน้ำที่มีความเค็มสูงได้ (Wilcox, 1986 ; Penno *et al.*, 1999)

## 2.7 การใช้ประโยชน์

บรรจง และเอนก (2537) ศึกษาวิจัยการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชน้ำร่วมกับเครื่องเติมอากาศตามโครงการแก้ไขน้ำเสียอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยปลูกพืชรูปถ่ายเต็มพื้นที่คลองระบายน้ำระยะทางยาว 120 เมตร เป็นเวลา 3 เดือน บริเวณหนองสนม จังหวัดสกลนคร พบว่าดัชนีชี้วัดน้ำเสีย ได้แก่ ค่าบีโอดี ซีโอดี ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน ไนโตรเจน และสารแขวนลอย ลดลงร้อยละ 39, 31, 35, 25 และ 68 ตามลำดับ

สุภาพร และเมธิ (2537) พบว่า รุปรุขมีปริมาณน้ำหนักร้างต่อไร่ประมาณ 1.7-2.4 ตันต่อไร่ สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนได้ และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีปริมาณธาตุไนโตรเจนร้อยละ 2.33 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.51 และโพแทสเซียมร้อยละ 2.35 เมื่อนำมาทำปุ๋ยหมักจะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูง

อำพล (2544) รายงานว่าใบอ่อนใช้เป็นอาหารวัว ควาย ช้าง ม้า ใบแก่ใช้มัดเป็นดับมุงหลังคา ชัดเบา หรือทำเป็นเส้นใยหยาบๆ ทอเป็นเชือก เสื่อ กระเป๋า สานตระกร้า และเครื่องใช้อื่นๆ ลำต้นได้คั้นใช้ทำแป้งได้ คุณสมบัติคล้ายแป้งข้าวโพดได้แป้งประมาณไร่ละ 1,000 กิโลกรัม แป้งรุปรุขใช้บริโภค และทำเอธิลแอลกอฮอล์ได้

Duke and Wain (1981) กล่าวถึงการนำรุปรุขมาใช้เป็นยาในการรักษาโรคต่างๆ เช่น ยารักษาอาการฟกช้ำ ยาสมาเนแผล ยารักษาแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก อาการบวมพอง ยารักษาตาอักเสบ กระเพาะปัสสาวะอักเสบ ช่องคลอดอักเสบ ริดสีดวงทวาร โรคหัด ท้องร่วง และเนื้องอก เป็นต้น

## 2.8 โทษ

อำพร (2539) รายงานว่ารุปรุขเป็นวัชพืชที่ทำความเสียหายร้ายแรงต่อระบบชลประทานในประเทศไทย โดยทำให้เกิดความเสียหายต่อสถานะแวดล้อมและการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลงทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นหรือน้ำที่เก็บกักไว้ใช้มีสีผิดปกติ เป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำ และการพักผ่อนหย่อนใจ นอกจากนี้ยังเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ร้าย เช่น งู และยุงซึ่งเป็นพาหะนำโรคมารูคน และยังส่งผลต่อการลดจำนวนของสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้นรุปรุขจะขึ้นหนาแน่นมากทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการหายใจ

Kasetsinsombat *et al.* (2001) รายงานว่าละอองเรณูของรุปรุขเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคมุมิแพ้ โรคหืด และเยื่อเมือกในช่องโพรงจมูกอักเสบ โดยทดลองให้สารสกัดจากละอองเรณูของรุปรุข กก หญ้าแพรก Careless weed และหญ้าขน ที่ความเข้มข้น 1,000 พีเอ็มแอลต่อมิลลิลิตร แก่คนไข้ พบว่าสารสกัดจากละอองเรณูของรุปรุขมีผลทำให้เกิดโรคมุมิแพ้กับคนไข้

68.42 เปอร์เซ็นต์ น้อยกว่าสารสกัดจากพืชอีก 4 ชนิด ที่ให้ผลในการทำให้เกิดโรคมูมิแพ้ 92.83, 90.20, 83.62 และ 70.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

### 3. สะเดา

3.1 ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Azadirachta indica A. Juss. Vas Siamensis Valeton*



ภาพที่ 5 สะเดา *Azadirachta indica A. Juss. Vas Siamensis Valeton*

ที่มา: <http://singburi.doae.go.th/acri/index.htm>

3.2 ชื่อเรียกสามัญหรือชื่อที่เรียกทั่วไปคือ Neem, Nim, Margosa, Yepa, Tamaka

สะเดาอยู่ในวงศ์ Meliaceae สะเดาเป็นไม้ทนแล้งสามารถขึ้นได้ไม่เลือกดิน เจริญเติบโตเร็วพอสมควรแตกหน่อได้ดี เนื้อของไม้สะเดามีคุณภาพดี และจัดอยู่ในประเภทของไม้เอนกประสงค์ คือสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แทบทุกส่วน นอกจากการใช้ประโยชน์เนื้อไม้แล้ว ใบและดอกสามารถใช้เป็นอาหารคน ใช้เป็นยารักษาโรค เมล็ดของสะเดามีสาร azadirachtin ซึ่ง

สามารถนำมาสกัดทำยาฆ่าแมลงได้อีกด้วย สะเดาไทย จะมีใบมีลักษณะหยักเป็นแบบฟันเลื่อยแต่ปลายของฟันเลื่อยจะทู่ ปลายใบแหลม โคนใบเว้าเว้าแต่กว้างฐานใบเชื่อมกันเล็กน้อย สีของใบเขียวเข้มเป็นมัน นิยมใช้ใบอ่อนและดอกเป็นอาหาร

### 3.3 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

สะเดา มีรากเป็นระบบรากแก้ว เจริญมาจาก radicle ของเอ็มบริโอ รากแก้วหยั่งลึกลงดิน รากแขนงแผ่ขยายกว้างในระดับผิวดิน ต้นอ่อนอายุ 25-30 วัน ลำต้นตั้งตรง เมื่อโตเต็มที่รัศมี 30-80 เซนติเมตร กิ่งก้านจะแตกจากด้านล่างลำต้นสลับไปสู่เรือนยอด มีเรือนยอดกลมรูปไข่ ส่วนเปลือกค่อนข้างหนา 2 ชั้น เปลือกชั้นนอกสุดหนา แตกเป็นร่องตามยาวหรือแตกเฉียง สีเทาเข้ม เปลือกชั้นในมีรสขมสีน้ำตาลแดง แก่นไม่มีสีเทา ใบเป็นใบประกอบ แบบขนนกชั้นเดียว (unipinnately compound leaves) ยาวประมาณ 20-30 เซนติเมตร ใบย่อยแบบ even pinnate 5-7 คู่ หรือมากกว่า ผิวใบเรียบ ใบย่อยของสะเดาไทยมีสีเขียวเข้ม และที่บกว่า รูปแบบ lanceolate ฐานใบแบบ oblique ปลายใบแบบ acute ขอบใบแบบ entire-undulate ขนาดของใบกว้าง 2-2.5 เซนติเมตร ยาว 3-7.5 เซนติเมตร ในพื้นที่ที่มีความแห้งแล้งสะเดาจะทิ้งใบในส่วนล่างในฤดูแล้ง ซึ่งในประเทศไทยอยู่ระหว่างเดือนมกราคม-มีนาคม และผลิใบในเดือนมกราคม-เมษายน สะเดาออกดอกประมาณเดือนธันวาคม-มกราคม หรือมีนาคม-เมษายน หรือมีนาคม-พฤษภาคม ดอกเป็นช่อเกิดที่ซอกใบ ช่อดอกเป็นแบบ panicle ช่อดอกสั้นกว่าใบ ยาวประมาณ 5-30 เซนติเมตร ก้านช่อดอกและก้านดอก เรียบสีน้ำตาล ดอกย่อยขนาดเล็กสมบูรณ์เพศมีกลิ่นหอมอ่อนๆ กลีบเลี้ยง สีเขียวเข้ม ขนาดเล็ก 5 กลีบ หรือ 3-6 กลีบ แต่ละกลีบแยกกัน รูปร่างกลม ผิวมีขนสีเหลืองอ่อนสั้นๆ ยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่า กลีบดอกมีขนาดเล็ก 5 กลีบ สีขาวเหลือง มีขนสั้นๆ รูปร่างแบบ spatula หรือรูปไข่หัวกลับ กลีบดอกยาวประมาณ 5-7 มิลลิเมตร เกสรตัวผู้มี 10 อัน ก้านเกสรตัวผู้เชื่อมติดกันเป็นท่อ ผิวด้านนอกเรียบหรือมีขนขนาดเล็กจำนวนน้อย ส่วนผิวด้านในโดยเฉพาะด้านบนมีขนหนาแน่นกว่า ปลายของหลอดหยักเป็นฟันเลื่อย มีอับละอองเกสรตัวผู้ติดอยู่ในท่อ โดยเรียงสลับกับรอยหยัก รังไข่และท่อเกสรตัวเมียยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร ผิวเรียบ รังไข่อยู่เหนือชั้นต่างๆ ของดอก (superior ovary) ประกอบด้วย 3 locule style เป็นท่อยาว ยอดเกสรตัวเมียมี 3 แฉก ผลเป็นแบบ drupe รูปร่างแบบ ovoid-oblong ผิวเรียบยาวประมาณ 12-20 มิลลิเมตร ผลอ่อนสีเขียวม่วง ผลสุกมีสีเหลืองหรือสีเขียวเหลืองหรือม่วง เปลือกของผลเป็นเยื่อบางๆ เนื้อมีรสขม เมล็ดมีจำนวน 1 เมล็ด แต่บางครั้งมี 2 เมล็ด ลักษณะกลมยาวขนาด 0.5-1.5 เซนติเมตร น้ำหนัก 1 กิโลกรัมจะมีเมล็ดประมาณ 3,800-4,000 เมล็ด เปลือกหุ้มเมล็ดแข็ง หรือแข็งหยุ่น (cartilaginous)



seed) คัพภะห้วงกลับมี perisperm น้อยหรือไม่มี สะเดามีจำนวนโครโมโซมเท่ากับเลี่ยน (*Melia azadirach*) คือ  $n$  เท่ากับ 14 หรือ  $2n$  เท่ากับ 28

### 3.4 สภาพภูมิอากาศและการเจริญเติบโต

#### 3.4.1 อุณหภูมิ

สะเดาไทยและสะเดาอินเดีย มีความต้องการสภาพภูมิอากาศในการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน สะเดาจัดเป็นไม้โตเร็ว อีกทั้งยังใช้เป็นร่มเงาและกันลม สะเดาสามารถทนทานได้ดีต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 45 องศาเซลเซียส ถ้าเจริญในที่ร่มทนต่อสภาพอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 49 องศาเซลเซียส และในสภาพอากาศเย็นที่ 0 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่านั้นเล็กน้อย แต่อุณหภูมิที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโตของสะเดาอยู่ระหว่าง 21-32 องศาเซลเซียส

#### 3.4.2 ปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนต่อปีที่สะเดาสามารถเจริญเติบโตได้อยู่ระหว่าง 450-1150 มิลลิเมตร แต่ถ้าปริมาณน้ำฝนมากเกินไปคือ 3000-4000 มิลลิเมตรต่อปี สะเดาจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้

#### 3.4.3 สภาพดิน

ชนิดและสภาพของดินไม่เป็นอุปสรรคต่อการปลูกสะเดา ยกเว้นดินที่มีน้ำขังหรือในสภาพดินเค็มหรือเป็นกรดหรือด่างจัด จะทำให้สะเดาเจริญเติบโตไม่ดี pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสะเดาอยู่ระหว่าง 6.2-6.5 นอกจากนั้นสะเดายังทนทานต่อสภาพดินเค็มได้ดี

#### 3.4.4 ความสูงของพื้นที่

ความสูงของพื้นที่นับว่าเป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของสะเดา ความสูงของพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 50-1500 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล

### 3.4.5 การขยายพันธุ์

สะเดาสามารถให้เมล็ดมากในแต่ละปีและมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูง มีความสามารถในการแตกหน่อได้ดี ดังนั้นการขยายพันธุ์จึงทำได้ทั้งวิธีแบบไม่อาศัยเพศและแบบอาศัยเพศ การขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ สามารถทำได้โดยการขุดหน่อที่แตกจากรากมาชำในแปลงเพาะพันธุ์จนตั้งตัวได้แล้วนำมาชำเลี้ยง ในถุงพลาสติกหรือทำโดยการตัดรากที่ขุดมาจากแม่ไม้เป็นท่อนยาว ๆ ประมาณ 5-10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-5 เซนติเมตร ชำลงในแปลงเพาะ รดน้ำให้ชุ่มประมาณ 1 เดือน หน่อจะแตกออกมาแล้วย้ายชำลงในถุงพลาสติกก็จะได้กล้าที่โตได้ขนาดต้นปลูกในฤดูกาลปลูกเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีปัญหาเกี่ยวกับเมล็ด และวิธีการจะรักษาลักษณะทางพันธุกรรมเอาไว้ได้เป็นอย่างดี

ส่วนการขยายพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยใช้เมล็ดและเมล็ดงอกปลูกในพื้นที่โดยตรงหรือปลูกด้วยกล้าชำในถุงพลาสติก ปัจจุบันนี้กล่าวได้ว่าการขยายพันธุ์โดยใช้ต้นกล้าชำลงมีบทบาทมากที่สุด เพราะจะทำให้ความสำเร็จ ในการปลูกเหมาะสำหรับการปลูกสร้างสวนสะเดาทั่วไป

## 3.5 การใช้ประโยชน์

3.5.1 เนื้อไม้เหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างและทำเฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ไม้สะเดายังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย

3.5.2 เมล็ดของไม้สะเดา นำมาสกัดทำน้ำมัน จะให้น้ำมันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันที่ได้จะใช้ทำน้ำมันเชื้อเพลิงจุดตะเกียง น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

3.5.3 ใช้ทำปุ๋ย เนื้อหุ้มเมล็ดในช่วงขณะนำเปื่อยจะทำให้พวกแก๊สมีเทนสูง ส่วนไบและกิ้งจะช่วยปรับปรุงดิน

3.5.4 อุตสาหกรรมเคมี เปลือกของต้นสะเดาจะมีสารจำพวกน้ำฝาด (tannin) ประมาณ 12-14 เปอร์เซ็นต์

3.5.5 เป็นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช

3.5.6 เป็นพืชสมุนไพรรักษาโรค

3.5.7 ปลุกเพื่อเป็นแนวกันลมและเป็นไม้ให้ร่ม

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของใบสะเดาสด

ส่วนประกอบ	% น้ำหนักแห้ง	ธาตุอาหาร	ppm
Crude protein	15.00±0.27	Manganese	16.30±1.60
Ether extract	3.80±0.14	Copper	13.80±0.90
Crude fibre	11.24±0.78	Cobalt	0.10±0.16
Nitrogen free extract	59.00±0.39	Iron	59.90±5.70
Ash	10.95±0.41	Molybdenum	0.20±0.02
Silica	1.37±0.17	Zinc	25.00±1.25
Phosphorus	0.16±0.007		
Calcium	2.96±0.68		
Acid detergent fibre	13.10		
Lignin	5.40		
Carotene (µg/g)	185.0		

ที่มา: อัญชลี (2543)

#### ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีของใบสะเดาแห้ง

ส่วนประกอบ	%น้ำหนักแห้ง
Crude protein	8.28±0.09
Ether extract	4.48±0.43
Crude fibre	13.14±1.14
Nitrogen free extract	61.36±1.04
Ash	12.74±0.50
Silica	1.06±0.22
Phosphorus	0.058±0.004
Calcium	3.89±0.46

ที่มา: อัญชลี (2543)

#### 4. กระบวนการดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

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

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

#### 4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

4.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

4.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

#### 4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการ

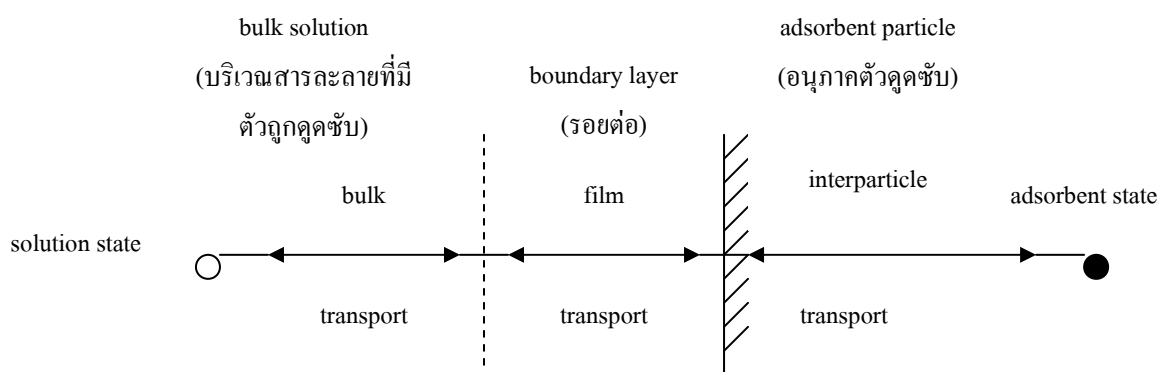
เคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

4.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

4.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

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

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

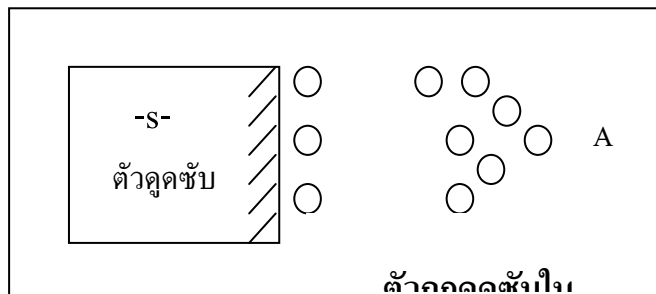
การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

### 4.3 รูปแบบของการดูดซับ

4.3.1 การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกจับก่อนหน้า และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

4.3.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้ กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

## 4.4 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

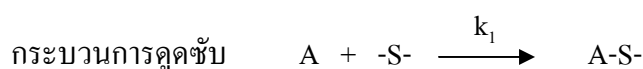
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นตอนต้น ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไป จะมีจำนวน โมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา แต่อัตราการคายจะเกิดขึ้นน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับนี้ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมลต่อลิตรในสารละลาย -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

$q$  เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1 - q)$  เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ





$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ  $C$  และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

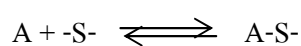
ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

$q$  = เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ  
หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกละลายต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมล/กิโลกรัม โมล/กรัม มิลลิกรัม/กิโลกรัม

$W$  = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม

$V$  = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์  
เซนติเมตร หรือลิตร

$C$  = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

$$\begin{array}{ccc} \text{ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิว} & = & \text{ปริมาณตัวถูกละลายที่คายออกมา} \\ \text{ของตัวดูดซับ} & & \text{จากตัวดูดซับ} \end{array}$$

$$qW = V(C_i - C_e) \quad \text{----- (3)}$$

เมื่อ  $C_i$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็น  
ความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

$C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความ  
เข้มข้น เช่น โมล/ลิตร

#### 4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.5.1 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (freundlich adsorption isotherm) คือไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad \text{----- (4)}$$

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

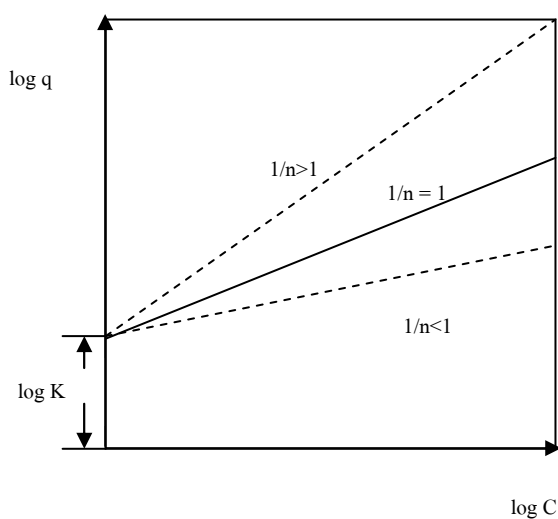
$q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มก./ก.)

$K$  = ค่าคงที่การดูดซับ

$$\frac{1}{n} = \text{ความชันของกราฟ}$$

$C$  = ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มก./ล.)

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



ภาพที่ 8 กราฟความชันระหว่าง  $\log q$  และ  $\log C$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

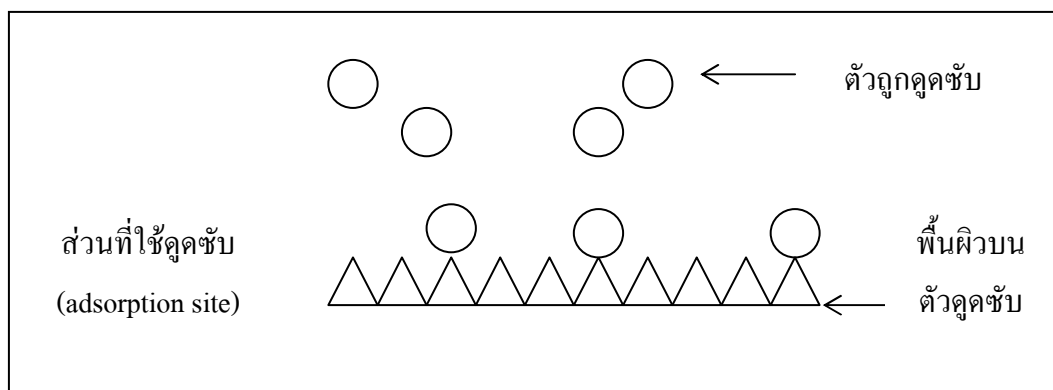
ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

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

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกลถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการจะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้

4.5.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) ได้มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 9) โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัดและเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)



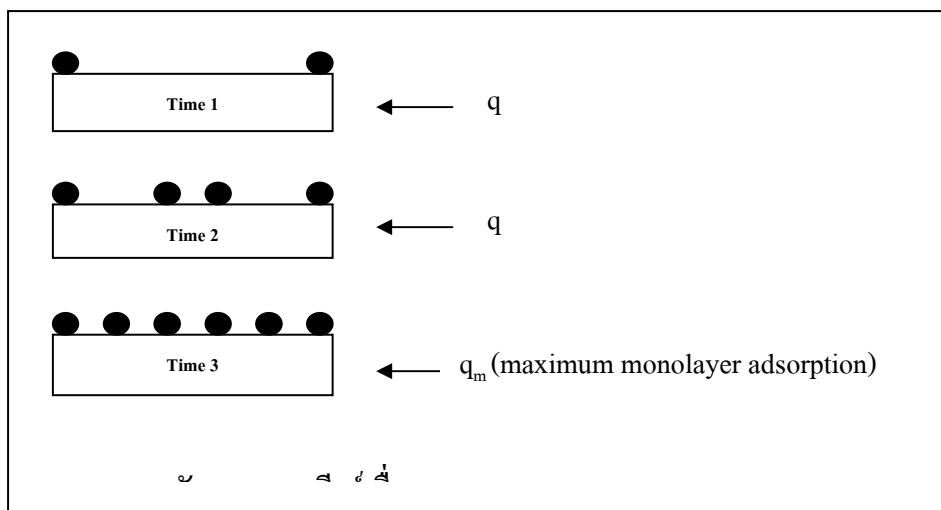
ภาพที่ 9 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมการการดูดซับถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \text{----- (6)}$$



ภาพที่ 10 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว  
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 6 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

$q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ  
(ความสามารถการดูดซับ) (มก./ก.)

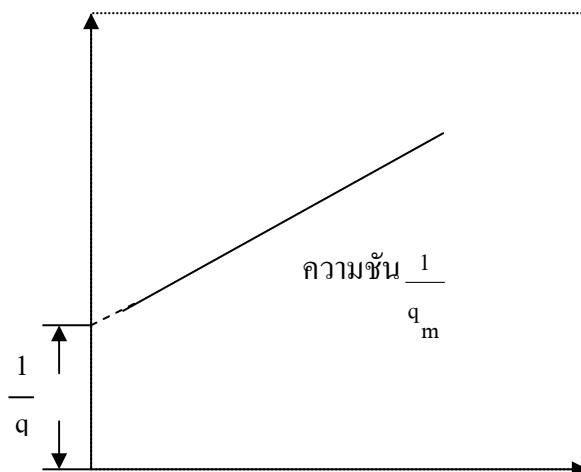
$q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มก./ก.)

$K$  = ค่าคงที่การดูดซับ

$C$  = ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มก./ล.)

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

และจุดตัดเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความชันระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

#### 4.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.6.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

4.6.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น

4.6.3 อัตราเร่งการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับผิวขึ้นอยู่กับการทำงานส่งโมเลกุลของระบบ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่ผ่านรูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้รวดเร็ว ดังนั้น การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4.6.4 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

4.6.5 pH การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

4.6.6 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของถังดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่ง



เท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย (ฉัตรสินี, 2545)

## 5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Boyd (1970) พบว่า ฐูปถามีเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการกำจัดและบำบัดน้ำเสียเพราะรากของฐูปถามีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสียได้ค่อนข้างสูง และสามารถดูดซับธาตุโลหะหนักได้ เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นอกจากนี้ฐูปถาใช้นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตจักสาน มุงหลังคาบ้าน และกระดาด เนื่องจากก้านฐูปถามีเยื่อไฟเบอร์มาก ทำให้มีความเหนียว นอกจากนี้ ฐูปถามีปริมาณน้ำหนักแห้งต่อไร่ประมาณ 1.7-2.4 ตันต่อไร่ สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนได้ และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ร้อยละ 2.33 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.51 และโปแตสเซียม ร้อยละ 2.35 ซึ่งค่อนข้างสูง เมื่อนำ มาทำ ปุ๋ยหมัก จะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูงด้วย นอกจากนี้ฐูปถายังใช้เป็นสารกำจัดแมลงได้ เมื่อนำมาจุดไฟให้เกิดควัน

Rengaraj et al. (2002) ได้ศึกษาถึงการนำแอตติเวทเตดคาร์บอนที่ทำมาจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (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 จากผลการศึกษานี้ปัจจัยปริมาณตัวดูดซับและเวลา พบว่า PSCC มีประสิทธิภาพดีกว่า CAC จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ PSCC มาใช้ในการบำบัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จันทวรรณ (2539) ทำการศึกษาการบำบัด ในโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคดเมียม และแมกนีเซียม ในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลบแห้งร่วมกับพืช ทำการทดลองแบบ split plot design ภายใต้วงเวลาการขังน้ำที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ 3, 5 และ 7 วัน หลังจากนั้นปล่อยแห้ง 3 วัน และใช้พืช 2 ชนิด ได้แก่ กกกลม (*Cyperus corymbosus rottb*) และ ฐูปถา (*Typha sp.*) ทำการทดลอง 3 ขั้ว ผลการทดลอง พบว่า ในโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และแคดเมียมในน้ำมีปริมาณลดลง ในขณะที่โปแตสเซียมและแมกนีเซียมในน้ำมีปริมาณ

สูงกว่าก่อนการบำบัด ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ปริมาณธาตุอาหารในน้ำหลังการบำบัดในช่วงเวลาการขังน้ำ 5 และ 7 วัน มีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงเวลาการขังน้ำ 3 วัน และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างการใช้ดินร่วมกับพืชและการใช้ดินเพียงอย่างเดียว พบว่า การใช้ดินร่วมกับพืช ทำให้ธาตุอาหารในน้ำหลังการบำบัดมีปริมาณต่ำกว่า และช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์แก่ดินได้มากกว่าการใช้ดินเพียงอย่างเดียว สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกอกกลมและรูปฤาษี พบว่า กอกกลมสามารถบำบัดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ความสูงและการสะสมธาตุอาหารในลำต้นและรากของรูปฤาษีมีค่าสูงกว่า กอกกลมและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง แต่ให้ค่ามวลชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับการสะสมธาตุอาหารในดินหลังการบำบัด พบว่า ธาตุอาหารส่วนใหญ่มี ปริมาณสูงกว่าก่อนการบำบัด ยกเว้นแมกนีเซียมเท่านั้นที่มีปริมาณต่ำกว่าก่อนการบำบัด ผลการศึกษา สามารถสรุปได้ว่า ช่วงเวลาการขังน้ำที่เหมาะสม คือ ช่วงเวลาการขังน้ำ 5 วัน และกอกกลมน่าจะเป็นพืชที่นำมาใช้ร่วมในการบำบัดมากกว่ารูปฤาษี เพราะจะทำให้สูญเสียธาตุอาหารออกไปจากดินและระบบน้อยที่สุด

มณีรัตน์ (2541) ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของฟีนอลในน้ำ โดยใช้วิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน จากแหล่งน้ำในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งทำการศึกษา 2 ช่วงเวลา คือเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2542 และเดือนเมษายน-พฤษภาคม 2542 พบว่าน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณฟีนอลอยู่ในช่วง 0.00-0.01 ไมโครกรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำทิ้งจากหอพักนักศึกษา น้ำทิ้งจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ และน้ำทิ้งจากอาคารเรียน มีปริมาณของฟีนอลอยู่ในช่วง 23.66-24.02, 50.142-51.354 และ 8.832-13.136 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วนของน้ำที่บำบัดแล้วจากหอพักนักศึกษา และน้ำที่บำบัดแล้วจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์และอาคารเรียน มีปริมาณของฟีนอล 0.089-0.092 และ 0.138-0.182 ไมโครกรัมต่อลิตรและเมื่อทำการเปรียบเทียบ 2 ช่วงเวลา พบว่า น้ำทิ้งจากอาคารเรียนและน้ำหลังการบำบัดจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ทั้ง 2 ช่วงเวลา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ผลการศึกษาปริมาณฟีนอลจากแหล่งน้ำต่างๆ ในครั้งนี้ พบว่าแหล่งน้ำทุกแหล่งเมื่อเทียบเกณฑ์มาตรฐานพบว่าน้ำจากทุกแหล่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

ณัฐ และ ณัฐกานต์ (2541) ทำการศึกษาผลของขนาดด้านกัมมันต์กะลามะพร้าวชนิดเม็ดต่อการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการดูดซับผิว ภายใต้การทดลองแบบแบบและการทดลองแบบ Fixed – Bed Adsorption Column โดยใช้ด้านกัมมันต์กะลามะพร้าวชนิดเม็ดที่ขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ ขนาด มม. (C2) ขนาด มม.(C3) และขนาด มม.(C4) ทำการทดลองด้วยแบบจำลองระดับ

ห้องปฏิบัติการ 3 ชุด ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ภายในบรรจุด้วยถ่านกัมมันต์ กะลามะพร้าวชนิดเม็ด สูง 80 เซนติเมตร โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเข้มข้นของฟีนอล 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านระบบด้วยอัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาพักน้ำ 4 ชั่วโมง และ อัตราการระปรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 191 ลิตรต่อตร.ม.-ชม. จากผลการทดลองแบบ Fixed – Bed Adsorption Column ได้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ขนาด C2 C3 และ C4 เท่ากับ 2.54 2.67 และ 2.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีความยาวของ Mass Transfer Zone เท่ากับ 24.0 23.7 และ 26.9 เซนติเมตร และมีอายุการใช้งานประมาณ 1015 1110 และ 896 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองแบบเบดซ์ได้ค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ขนาด C2 C3 และ C4 ตามสมการของ Freundlich เท่ากับ 4.35 4.68 และ 3.90 มิลลิกรัมต่อกรัม และตามสมการของ Langmuir เท่ากับ 3.51 3.72 และ 3.27 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าทั้งการทดลองแบบ Fixed – Bed Adsorption Column และการทดลองแบบเบดซ์ขนาดของถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวชนิดเม็ดจะมีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเพียงเล็กน้อย ส่วนภายใต้การทดลองแบบ Fixed – Bed Adsorption Column ขนาดของถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวชนิดเม็ดจะมีผลต่อความยาวของ Mass Transfer Zone และอายุการใช้งาน โดยที่ ถ่านกัมมันต์ขนาดเล็กจะมีความยาวของ Mass Transfer Zone สั้นกว่าและมีอายุการใช้งานนานกว่า ถ่านกัมมันต์ขนาดใหญ่

อรุณ และคณะ (2543) ทำการศึกษาทดลองนำน้ำเสียจากชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี มาบำบัดด้วยระบบห้ำกรอง โดยปล่อยให้ให้น้ำเสียไหลเข้าแปลง ห้ำแฝกอิน โดนิเซีย ห้ำศาสตร์ ห้ำกาลลา ห้ำหางหมากพร้าว น้อย กกกลม รูปฤาษี และแปลงควบคุม แต่ละแปลงทดลองมี ขนาด 5 X 100 เมตร อัตราการให้น้ำเสีย 150 ลิตรต่อนาที่ แบบต่อเนื่อง โดยน้ำเสียไหลจากหัวแปลง ทดลองไปท้ายแปลงกำหนดเวลาให้น้ำไหลวันละ 7 ชม. การตรวจสอบความปลอดภัยของน้ำหลัง ผ่านห้ำกรองทำโดยการตรวจเชื้อซัลโมเนลลา ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไป ในสิ่งแวดล้อม เช่น ในดิน น้ำ ของเสียจากมนุษย์และสัตว์ โดยเฉพาะในน้ำเสียจะพบ *Salmonella* ปนเปื้อนมาก การปนเปื้อนของ *Salmonella* ในน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแล้วน่าจะเป็นดัชนีบ่งชี้ถึง ความเสี่ยงในการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียชุมชนได้ โดยระบบห้ำกรองสามารถลดจำนวนเชื้อ *Salmonella* ได้ในระยะที่หนึ่ง เมื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ผิวดิน โดยเชื้อ *Salmonella* ที่ตรวจพบใน น้ำเสียก่อนการบำบัดและภายหลังการบำบัดด้วยระบบห้ำกรอง พบ *Salmonella* Anatum , *Salmonella* Panama, *Salmonella* Agona, *Salmonella* Rissen , *Salmonella* Derby, *Salmonella* Lexington, *Salmonella* Albany, *Salmonella* Brunei, *Salmonella* Dublin จำนวน

*Salmonella* จะลดลง ชนิดของหญ้า (กาลลา) จะลดเชื้อ *Salmonella* ได้ดีกว่าหญ้าแฝกอินโดนีเซีย กกกลม หญ้าสตาร์ หญ้าหางหมากร้วนน้อย รูปฤาษี ส่วนตัวอย่างน้ำผิวดิน ชนิดหญ้า (กาลลา) ลดเชื้อ *Salmonella* ได้ดีกว่าหญ้าสตาร์ หญ้าหางหมากร้วนน้อย สำหรับแปลงควบคุมหญ้ากรองน้ำ เสีย พบ *Salmonella* เพียง 1 ครั้ง ในระดับน้ำผิวดิน แสดงให้เห็นว่าแสงแดดมีส่วนช่วยลดเชื้อ *Salmonella* ได้

พงษ์ชัย และคณะ (2544) ทำการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากกากเมล็ดกาแฟ เพื่อใช้ดูดซับฟีนอลและทอลูอิน การทดลองพบว่า ในส่วนของการเผากากเมล็ดกาแฟแบบอัดอากาศ พบว่าที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 21 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว 76 สภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นคาร์บอนด้วยไอน้ำยิ่งยวด คือ อุณหภูมิการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 1 ชั่วโมง พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ประมาณ 180 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดกลางประมาณ 70 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.109 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 2.5 นาโนเมตร ในการกระตุ้นคาร์บอนด้วย สารละลายซิงค์คลอไรด์และสารละลายกรดฟอสฟอริก สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อสารละลายกระตุ้น 1:2.5 อุณหภูมิการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 90 นาที คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดประมาณ 625 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดกลางประมาณ 171 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.358 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 2.3 นาโนเมตร คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกมีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดประมาณ 556 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดกลางประมาณ 170 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.315 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 2.3 นาโนเมตรในการทดสอบการดูดซับฟีนอลและทอลูอิน ใช้คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีตามสภาวะการกระตุ้นที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลมากกว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ โดยมีค่าที่ดูดซับได้เท่ากับ 58 และ 48 มิลลิกรัม ฟีนอลต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ตามลำดับ ส่วนการดูดซับทอลูอินพบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ สามารถดูดซับทอลูอินได้มากกว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยมีค่าที่ดูดซับได้เท่ากับ 120 และ 99 มิลลิกรัมทอลูอินต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ตามลำดับ

ธิดา (2545) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของดอกธูปฤๅษีเพื่อการบำบัดน้ำมันในน้ำเสียชุมชน ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแบริชใส่ดอกธูปฤๅษีลงในน้ำเสียและในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่อง ให้น้ำเสียไหลผ่านดอกธูปฤๅษีด้วยวิธี Partition Gravimetric Method พบว่า ดอกธูปฤๅษีมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน เท่ากับร้อยละ 86-94 และร้อยละ 63-83 ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแบริช และแบบไหลต่อเนื่อง ตามลำดับ ในขณะที่แผ่นเยื่อที่ทำจากดอกธูปฤๅษีไม่สามารถกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ เนื่องจากไม่มีความพรุน กล่าวคือ ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดน้ำมันที่ได้จากระบบที่ทำการศึกษานี้ คือ ใช้ระยะเวลาพักในการบำบัดน้ำเสีย 30 นาที และใช้ปริมาณดอกธูปฤๅษีมากกว่า 20 กรัมขึ้นไป นอกจากนี้ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณดอกธูปฤๅษี แต่ไม่มีความสัมพันธ์ในการบำบัดน้ำเสียระหว่างปริมาณดอกธูปฤๅษีกับระยะเวลาในการกักพักที่นัยสำคัญ 0.01

วชชล (2545) ได้การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มฟินอลในน้ำเสียโดยใช้เทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกสารประกอบกลุ่มฟินอลคือ สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมบอเรตความเข้มข้น 20 มิลลิโมลต่อลิตร pH 9.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการแยก 35 องศาเซลเซียส สารนำตัวอย่างเข้าคาปิลลารีด้วยความดัน 50 มิลลิบาร์นาน 10 วินาที และความแรงของสนามไฟฟ้า 294 โวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถแยกสารกลุ่มฟินอลได้ในเวลา 22 นาที ชีดจำกัดของการตรวจวัดและขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณของสารกลุ่มฟินอลอยู่ในช่วง 0.10 ถึง 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และถึง 0.25 ถึง 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำวิธีนี้ไปประยุกต์หาสารประกอบกลุ่มฟินอลจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตเรซิน โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานกระดาษและฟาร์มไก่ พบฟินอล, 2,4,6-ไตรไนโตรฟินอล และ 2,4 -ไดคลอโรฟินอล ความเข้มข้น  $42.3 + 2.9$ ,  $44.8 + 2.4$  และ  $49.2 + 2.1$  ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จรรยา (2546) ได้ทำการศึกษากำจัดโลหะหนัก ฟินอล และสีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยซีเถ้าแกลบดำ เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความสามารถของซีเถ้าแกลบดำในการกำจัดโลหะหนัก ฟินอล สีย้อมผ้ารีแอคทีฟ และสีย้อมผ้าไดเรกต์เรดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคการศึกษาการดูดซับแบบแบริชโดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ดังนี้ ค่าพีเอช ปริมาณสารดูดซับ เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสารละลาย จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีอิทธิพลต่อการกำจัดโลหะหนัก ฟินอล และสีย้อมผ้าของซีเถ้าแกลบดำ โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมมีค่าสูงสุดในช่วงค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่ 3 - 5 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเกือบร้อยละ 100 ส่วนโครเมียม ฟินอล

และสีข้อมฟ้า ประสิทธิภาพในการกำจัดคลดลงเมื่อค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น และ ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงอยู่ในช่วงพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่ 1-2 การเพิ่มปริมาณขี้เถ้า แกลบดำและการเพิ่มขึ้นของเวลาสัมผัส พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล และสี ข้อมฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาทีแรกที่ขี้เถ้า แกลบดำสัมผัสกับน้ำเสีย โดยพบว่าในเวลา 5 นาทีแรกการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมมีประสิทธิภาพ การกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นพบว่าการเพิ่มความเข้มข้น (ในช่วง 10 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไม่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วแคดเมียม และ สีข้อมฟ้าใดเร็กท์มาก นึก แต่มีผลกับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม ฟีนอล และ สีข้อมฟ้ารีแอ็คทีฟ โดยพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดคลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นขึ้น ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิของ สารละลาย (25 30 และ 40 องศาเซลเซียส) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล สีรีแอ็คทีฟ และสีใดเร็กท์น้ำเงินเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบ ความสามารถในการกำจัดของขี้เถ้าแกลบดำกับน้ำเสียจริงจาก โรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และฟีนอลประมาณร้อยละ 90 ส่วนโครเมียมประมาณร้อยละ 50 และสีข้อมฟ้าประมาณร้อยละ 70

สกุณา และ ฤชดา\_(2548) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล โดยใช้ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากมันสำปะหลังและมันเทศ การใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากมัน สำปะหลังและมันเทศในการกำจัดฟีนอลในน้ำโดยใช้ส่วนหัวและส่วนใบของพืช โดยสภาวะที่ ศึกษา คือ พีเอชของน้ำ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณครูดเอนไซม์ เวลาในการ ทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิ พบว่าหัวมันสำปะหลังสามารถกำจัดฟีนอลได้ดีที่สุด โดยมีสภาวะที่ เหมาะสมคือ ใช้ครูดเอนไซม์เท่ากับ 5 มิลลิกรัม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่พีเอช เท่ากับ 2 อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อนำสภาวะดังกล่าวไปใช้ในการ กำจัดฟีนอลในน้ำจำนวน 3 ครั้ง พบว่าสามารถกำจัดฟีนอลได้ 67,55 และ 52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการศึกษาความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์พบว่าให้ค่า % RSD เท่ากับ 3.24 และค่า % Recovery เท่ากับ 94 % จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเอนไซม์เปอร์ ออกซิเดสจากพืชมาใช้ในการกำจัดฟีนอลในน้ำได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์

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

## 2. สารเคมี

2.1 น้ำกลั่น

2.2 แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )

2.3 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )

2.4 4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-AAP)

2.5 โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ )

2.6 กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

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

2.8 ต้นรูปถ่ายและกระดาษลบเย็บ

### วิธีการ

#### 1. การเตรียมต้นรูปถ่ายและใบสะเดา

1.1 นำต้นรูปถ่ายและใบสะเดามาหั่นเป็นชิ้นบางๆ ตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนกรอบและแห้ง หลังจากนั้นนำไปบดให้เป็นผง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน เก็บรูปถ่ายและใบสะเดาที่ผ่านการร่อนแยกใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป





ภาพที่ 12 รูปถ่ายบดเป็นผง



ภาพที่ 13 สะเดาบดเป็นผง

1.2 ทำการวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของรูปถ่ายและใบสะเดา โดยชั่งรูปถ่ายและใบสะเดา ปริมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง วัดค่าพีเอชของสารละลาย พบว่าค่าพีเอชของรูปถ่ายและใบสะเดามีค่าเท่ากับ 6.1 และ 5.6 ตามลำดับ

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

### 2.1 การเตรียมสารละลาย

#### 2.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

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

#### 2.1.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ จำนวน 16.9 กรัม เติมน้ำลงไปละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จำนวน 143 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายลงในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปิดจุก จะได้สารละลายที่ต้องการ

#### 2.1.3 การเตรียมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน

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

#### 2.1.4 การเตรียมสารละลายโพแตสเซียมเฟอริไซยาไนด์

ชั่งโพแตสเซียมเฟอริไซยาไนด์ จำนวน 8.0 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร แล้วปิดจุก จะได้สารละลายตามต้องการ

2.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟีนอลเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ จำนวน 10, 30, 50, 70 และ 90 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด แล้วปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน และสารละลายโพแตสเซียมเฟอริไซยาไนด์ ที่เตรียมไว้ อย่างละ

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

2.3 ตั้งสารละลายที่ได้ในข้อ 2.2 ไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

2.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 2.3 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 20 D ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นเบลมกซ์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น 510 นาโนเมตรในแกนตั้ง และความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลในแกนนอน จะได้กราฟมาตรฐาน ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1



ภาพที่ 14 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

### 3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

#### 4. การวางแผนการทดลอง

4.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟินอลที่มีผลต่อการดูดซับของรูปถ่ายและไบสเดคา โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงรูปถ่ายและไบสเดคา ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานฟินอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชให้มีค่า เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงรูปถ่ายและไบสเดคาที่ดูดซับฟินอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟินอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณรูปถ่ายและไบสเดคาที่เหมาะสมในการดูดซับฟินอลในสารละลายมาตรฐานฟินอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงรูปถ่ายและไบสเดคาปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อสารละลายมาตรฐานฟินอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงรูปถ่ายและไบสเดคาที่ดูดซับฟินอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟินอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.3 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของรูปถ่ายและไบสเดคาจากการดูดซับฟินอลในสารละลายมาตรฐานฟินอล โดยการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงรูปถ่ายและไบสเดคา ตามปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ต่อสารละลายมาตรฐานฟินอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ

100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงรูปถ่ายและไบสเดคาที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.4 ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถ่ายและไบสเดคา โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงรูปถ่ายและไบสเดคา ตามปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3 จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงรูปถ่ายและไบสเดคาที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.5 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นฟีนอลต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งผงรูปถ่ายและไบสเดคา ตามปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ต่อสารละลายมาตรฐานฟีนอลปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.4 หลังจากนั้นกรองของผสมระหว่างผงรูปถ่ายและไบสเดคาที่ดูดซับฟีนอลไว้กับสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองในข้อ 4.1 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุรูปถ่ายและไบสเดคา ปริมาณ 20 กรัม และเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

#### 4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายและไบสเดคาที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำรูปถ่ายและไบสเดคา ที่ผ่านการใช้งานแล้วจากคอลัมน์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ผึ่งในที่ร่มให้แห้ง หลังจากนั้นนำรูปถ่ายและไบสเดคาที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพปริมาณ 2 และ 1 กรัม ตามลำดับ มาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล เปรียบเทียบกับรูปถ่ายและไบสเดคาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายและไบสเดคาที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยวิธี 4-AAP

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F โดยใช้ตัวอย่างรูปถ่ายและไบสเดคา ชนิดละ 3 ซ้ำ

เนื่องจากน้ำเสียจากบริษัทผลิตกระดาษทั้ง 6 แห่งนี้ มีสภาวะที่แตกต่างจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากการทดลองแบบเบทซ์ ดังตารางภาคผนวกที่ 19 แต่การศึกษานี้ทำการทดลองดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์

นำน้ำเสียจากบริษัท A, B, C, D, E และ F มาตรวจวัดคุณภาพน้ำและหาปริมาณฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล โดยรายงานในรูปของปริมาณฟีนอลเริ่มต้นก่อน จากนั้นศึกษาหาปริมาณรูปถ่ายและไบสเดคา ที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทผลิตกระดาษดังกล่าว ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ใช้ในการศึกษา คือ 30 มิลลิกรัม/ลิตร (ซึ่งใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่พบในน้ำเสียจริง) หลังจากนั้นนำน้ำเสียมาทดลองโดยใช้

สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ ของรูปถุนีและใบสะเดา แล้วนำไปวิเคราะห์หา ฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับด้วยวิธี 4-AAP

#### 5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

#### 6. ระยะเวลาในการทดลอง

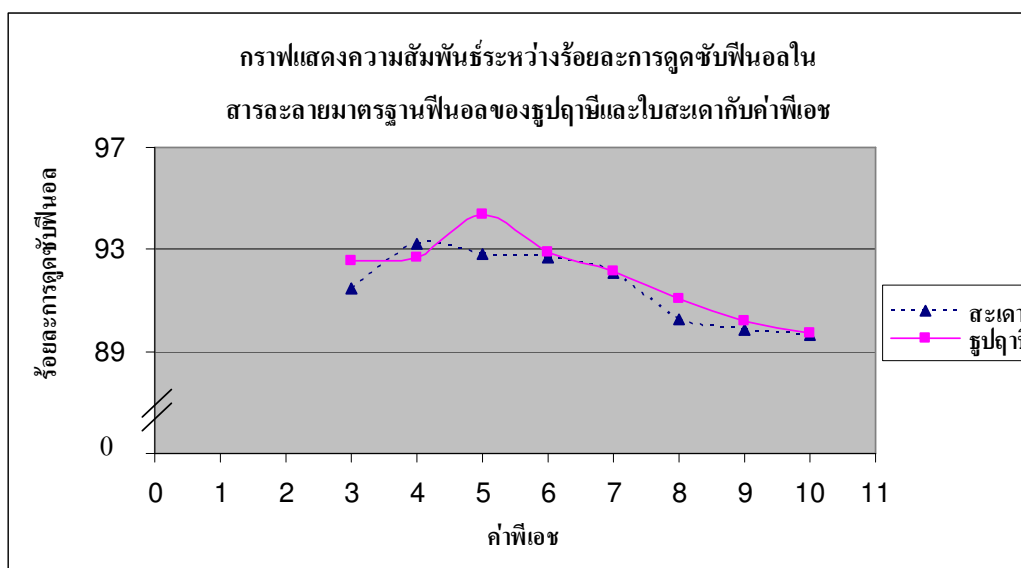
ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2551

## ผลและวิจารณ์

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลด้วยรูปถ่ายและไบสเดาโดยทำการเตรียมตัวดูดซับจากคั้นรูปถ่ายและไบสเดา โดยหาสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ค่าพีเอช ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาปั่นกวน (shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอล ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ และศึกษาการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายและไบสเดาภายหลังการใช้งานแล้ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1. อิทธิพลพีเอชเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของรูปถ่ายและไบสเดา

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตรโดยทดลองที่พีเอชระดับต่างๆ 8 ค่า ได้แก่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ใช้รูปถ่ายและไบสเดาปริมาณชนิดละ 1 กรัม นำไปแช่ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบสเดากับค่าพีเอช



จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานฟีนอลสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุดของรูปถุณีและไบอะเคาท์พีเอชเท่ากับ 5 และ 4 ตามลำดับ มีค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 94.36 และ 93.22 ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับฟีนอลจะเริ่มลดลงและคงที่ การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกรด ส่งผลให้บริเวณพื้นที่ผิวตัวดูดซับเป็นประจุบวก ในขณะที่ขั้วของฟีนอลก็จะเกิดการแตกตัวตรงหมู่ไฮดรอกซิลทำให้โปรตอน ( $H^+$ ) หลุดออก ซึ่งจะไปจับกับ  $OH^-$  ที่มีอยู่ในสารละลาย และตัวฟีนอลที่เหลือเป็นประจุลบ จะไปจับกับประจุบวกบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับ แต่เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้น ในสารละลายก็จะมี  $OH^-$  มากขึ้นก็จะเกิดการแข่งขันกัน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง สำหรับช่วงพีเอชเท่ากับ 3, 4, 6, 7, 8, 9 และ 10 รูปถุณีมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ ร้อยละ 92.54, 92.68, 92.90, 92.16, 91.08, 90.18 และ 89.70 ตามลำดับ ในขณะที่ไบอะเคามีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลเท่ากับร้อยละ 91.48, 92.84, 92.68, 92.08, 90.26, 89.88 และ 89.64 ตามลำดับ ดังภาพที่ 15 และตารางที่ 5

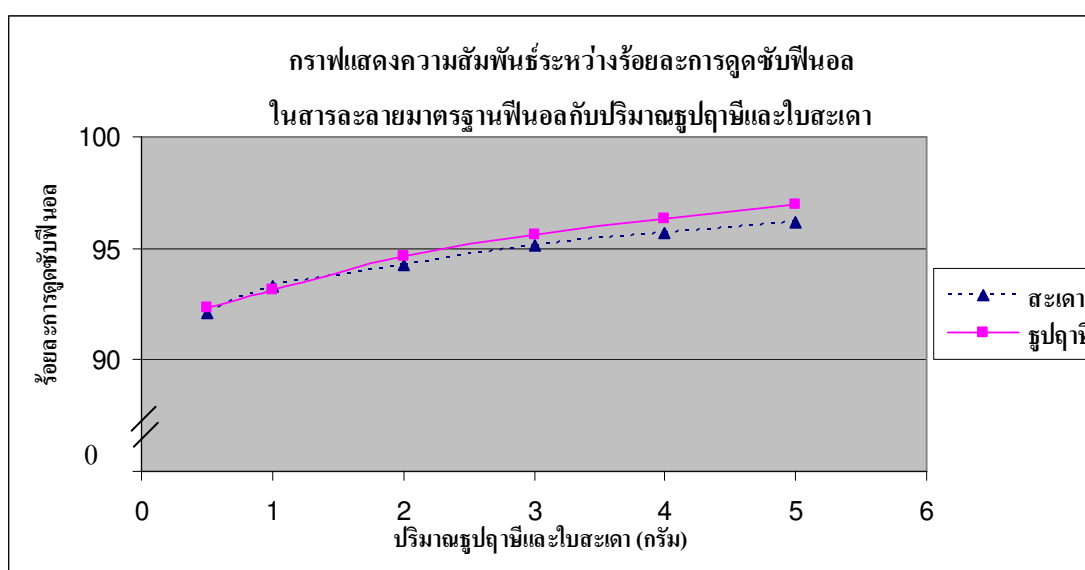
ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่ารูปถุณีที่พีเอช 5 เป็นพีเอชที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด โดยสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกพีเอช ดังตารางผนวกที่ 20 ไบอะเคาท์พีเอช 4 เป็นพีเอชที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด โดยสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่พีเอช 5 และ 6 แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่พีเอช 3, 7, 8, 9 และ 10 ดังตารางผนวกที่ 20

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถุาญีและใบสะเดา

ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถุาญี	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดา
3	92.54	91.48
4	92.68	93.22
5	94.36	92.84
6	92.90	92.68
7	92.16	92.08
8	91.08	90.26
9	90.18	89.88
10	89.70	89.64

## 2. อิทธิพลของปริมาณรูปถุาญีและใบสะเดา ที่มีผลในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับรูปถุาญีและใบสะเดาโดยทำการศึกษาปริมาณรูปถุาญีและใบสะเดา ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลกับปริมาณรูปถุาญีและใบสะเดา

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณธาตุอาหารและไบโอดีปเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัด ฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารและไบโอดีปมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นด้วย ความสามารถในการดูดซับฟีนอลจึงเพิ่มขึ้น โดยปริมาณธาตุอาหารและไบโอดีป 5 กรัมจะมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลสูงสุด โดยมีค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 96.94 และ 96.18 ตามลำดับ สำหรับธาตุอาหารที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ ร้อยละ 92.38, 93.14, 94.66, 95.62 และ 96.32 ตามลำดับ สำหรับไบโอดีปที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้เท่ากับ ร้อยละ 92.08, 93.30, 94.28, 95.16 และ 95.72 ตามลำดับ ดังภาพที่ 16 และตารางที่ 6 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันมาก จึงทำการเลือกปริมาณธาตุอาหารและไบโอดีปที่เหมาะสมคือ 2 และ 1 กรัม ตามลำดับ

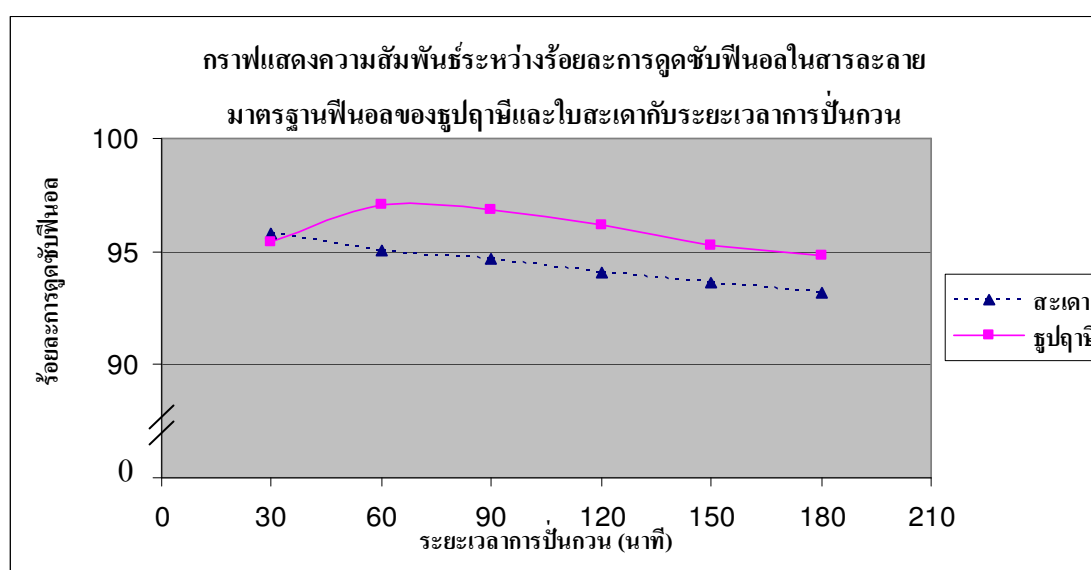
ผลของปริมาณธาตุอาหารและไบโอดีปที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าปริมาณธาตุอาหารทุกปริมาณ ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังตารางผนวกที่ 21 สำหรับปริมาณไบโอดีปทุกปริมาณ ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังตารางผนวกที่ 21

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุอาหารและไบโอดีปกับร้อยละการดูดซับฟีนอลของธาตุอาหารและไบโอดีป

ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของธาตุอาหาร	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของไบโอดีป
0.5	92.38	92.08
1	93.14	93.30
2	94.66	94.28
3	95.62	95.16
4	96.32	95.72
5	96.94	96.18

### 3. อิทธิพลของเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล (ระยะเวลาปั่นกวน) ของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อการดูดซับของรูปถ่ายและไบสเดคา

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับรูปถ่ายและไบสเดคา ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณรูปถ่าย 2 กรัมและไบสเดคา 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและไบสเดคา กับระยะเวลาการปั่นกวน

จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการปั่นกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการปั่นกวนนานทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำลดลง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป การดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (อัตราการดูด = อัตราการคาย) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ โดยประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลสูงที่สุดที่ระยะเวลาปั่นกวนเท่ากับ 60 และ 30 นาที สำหรับรูปถ่ายและไบสเดคา ตามลำดับ มีค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลโดยรูปถ่ายเท่ากับ 97.08 และ โดยไบสเดคาเท่ากับ 95.80 ดังภาพที่ 17 และตารางที่ 7

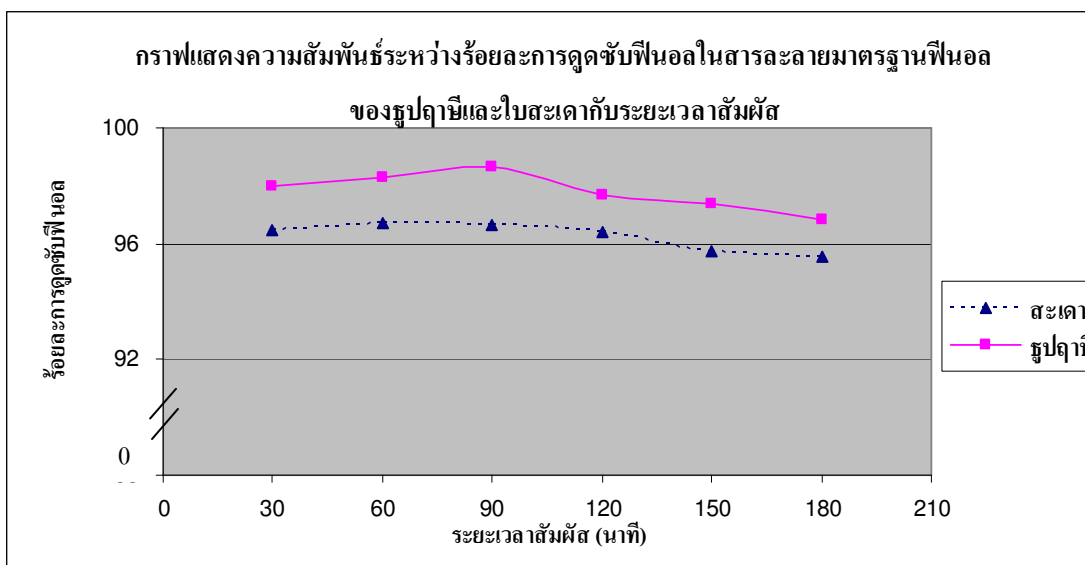
ผลของระยะเวลาปั่นกวนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่ารูปถ่ายึที่ระยะเวลาปั่นกวน 60 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาปั่นกวนที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาปั่นกวน 90 นาที แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาปั่นกวน ได้แก่ 30, 120, 150 และ 180 นาที ดังตารางผนวกที่ 22 ใบสะเดาที่ระยะเวลาปั่นกวน 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาปั่นกวนที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกระยะเวลาปั่นกวน ได้แก่ 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ดังตารางผนวกที่ 22

**ตารางที่ 7** ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการปั่นกวน (นาที) กับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายึและใบสะเดา

ระยะเวลาการปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายึ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดา
30	95.44	95.80
60	97.08	95.04
90	96.84	94.66
120	96.18	94.06
150	95.26	93.66
180	94.80	93.20

#### 4. อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัส ต่อการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถ่ายึและใบสะเดา

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 และ 4 สำหรับรูปถ่ายึและใบสะเดา ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณรูปถ่ายึ 2 กรัมและใบสะเดา 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 และ 60 นาที สำหรับรูปถ่ายึและใบสะเดา ตามลำดับ และระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับระยะเวลาสัมผัสน

จากการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีระยะเวลาในการยึดเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น แต่หลังจากนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะคงที่ เนื่องจากการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (อัตราการดูด = อัตราการคาย) และตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวและเริ่มหมดสภาพ โดยประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลจะมีค่าสูงที่สุด ที่เวลา 90 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 98.68 โดยรูปถ่าย และที่เวลา 60 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 96.70 โดยใบสะเดา ดังภาพที่ 18 และตารางที่ 8

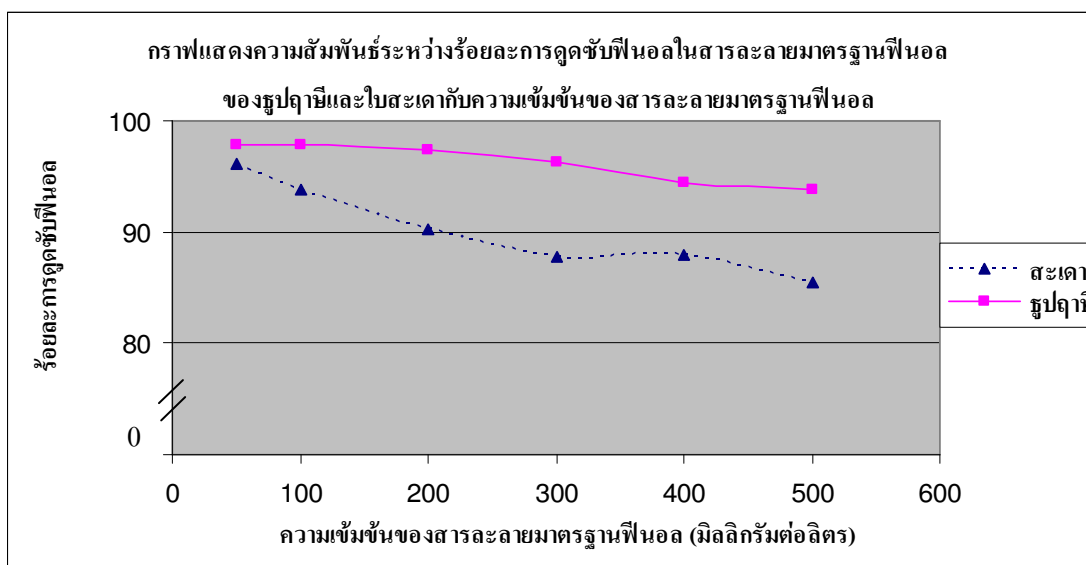
ผลของระยะเวลาสัมผัสนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่ารูปถ่ายที่ระยะเวลาสัมผัสน 90 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสนที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาสัมผัสน 60 นาที แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาสัมผัสน ได้แก่ 30, 120, 150 และ 180 นาที ดังตารางผนวกที่ 23 ใบสะเดาที่ระยะเวลาสัมผัสน 60 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสนที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาสัมผัสน 30, 90 และ 120 แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ระยะเวลาสัมผัสน 150 และ 180 นาที ดังตารางผนวกที่ 23

**ตารางที่ 8** ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัส (นาที) กับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าน  
และไบสเดคา

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าน	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของไบสเดคา
30	98.00	96.48
60	98.30	96.70
90	98.68	96.64
120	97.70	96.38
150	97.38	95.72
180	96.84	95.56

**5. อิทธิพลความเข้มข้นของฟีนอล และไอโซเทอร์มในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐาน  
ฟีนอลของรูปถ่านและไบสเดคา**

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน คือ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับรูปถ่านทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ปริมาณรูปถ่าน 2 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที และระยะเวลาสัมผัส 90 นาที ส่วนการทดลองสำหรับไบสเดคาทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ปริมาณไบสเดคา 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ซึ่งผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและใบสะเดากับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล

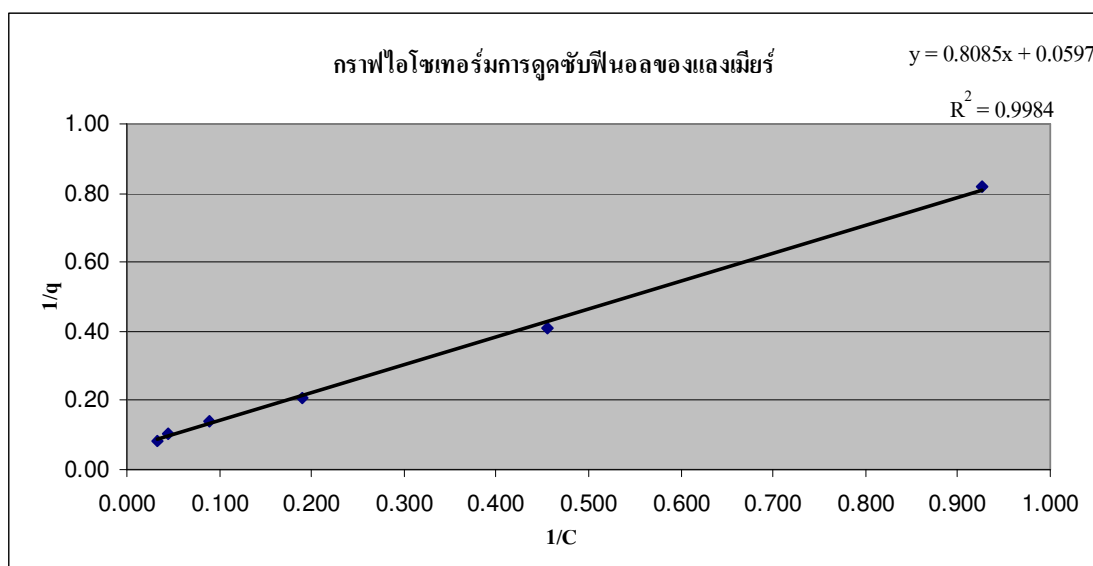
จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง โดยประสิทธิภาพการดูดซับของรูปถ่ายและใบสะเดามีค่าสูงสุด เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีฟีนอลเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 97.84 สำหรับรูปถ่าย และเท่ากับ 96.20 สำหรับใบสะเดา สำหรับที่ความเข้มข้นอื่นๆ ได้แก่ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถ่ายมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 97.80, 97.38, 96.22, 94.36 และ 93.89 ตามลำดับ สำหรับใบสะเดามีค่าเท่ากับ ร้อยละ 93.77, 90.22, 87.85, 87.91 และ 85.47 ตามลำดับ ดังภาพที่ 19 และตารางที่ 9

ผลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่ารูปถ่ายที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล 50 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล 100 มิลลิกรัม/ลิตร แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางผนวกที่ 24 ใบสะเดาที่ความเข้มข้นของสารละลาย



มาตรฐานฟีนอล 50 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ดูดซับฟีนอลได้สูงสุด พบว่าสามารถดูดซับฟีนอลได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กับทุกความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล ได้แก่ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางผนวกที่ 24

ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปฤาษีและใบสะเดาเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล มีค่าเท่ากับ 0.9984 และ 0.971 ตามลำดับ ดังภาพที่ 20 และ ภาพที่ 21 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุנדลิชมีค่าเท่ากับ 0.9762 และ 0.9967 ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23 ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุנדลิชโดยรูปฤาษีและใบสะเดาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้(0.9700-1.200) ดังนั้นการดูดซับสารละลายฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปฤาษีจึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุנדลิช แต่กลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ส่วนการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลของใบสะเดาสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุנדลิชเช่นกัน แต่กลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุנדลิชมากกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยรูปฤาษี

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแกลงเมียร์

$$\text{โดยทั่วไปคือ } q = \frac{q_m KC}{1+KC}$$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left( \frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (8)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟโดยรูปถ่ายจะได้

$$\frac{1}{q} = 0.8085 \frac{1}{C} + 0.0597 \quad \text{----- (9)}$$

จากสมการที่ 9 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.8085 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ 0.0597 นั่นคือ

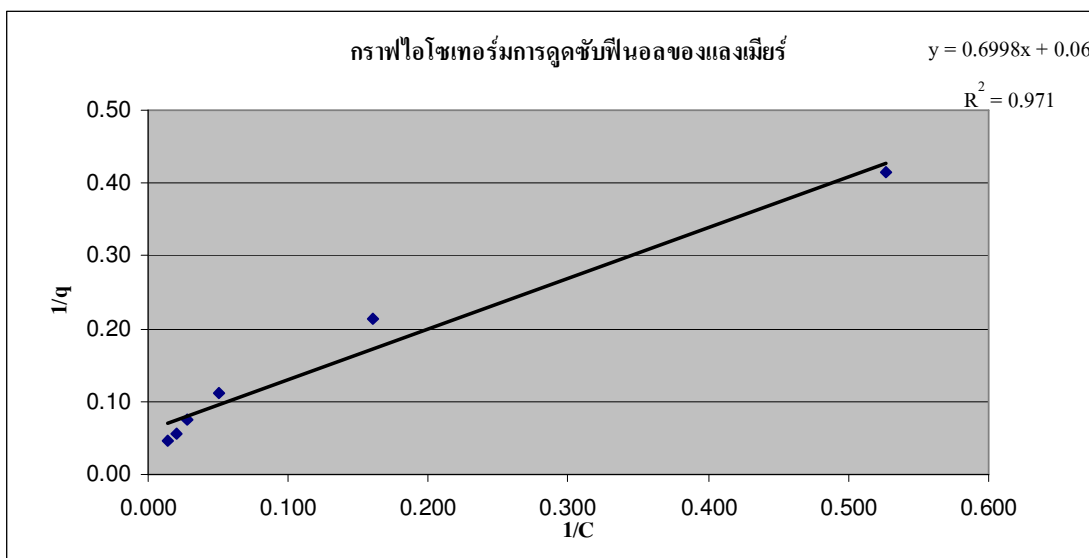
$$\frac{1}{q_m K} = 0.8085$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.0597$$

$$q_m = 16.7504$$

$$\text{ดังนั้น } K = 0.0738$$

จากไอโซเทอร์มการดูดของแกลงเมียร์โดยรูปถ่าย พบว่า ค่า  $q_m$  มีค่าเท่ากับ 16.7504 และค่า  $K$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟีนอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของรูปถ่าย



ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของแลงเมียร์โดยไบสเดา

สำหรับการดูดซับโดยไบสเดาเมื่อแทนค่าสมการที่ได้จากกราฟของแลงเมียร์จะได้

$$\frac{1}{q} = 0.6998 \frac{1}{C} + 0.06 \quad \text{----- (10)}$$

จากสมการที่ 10 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6999 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ 0.06 นั่นคือ

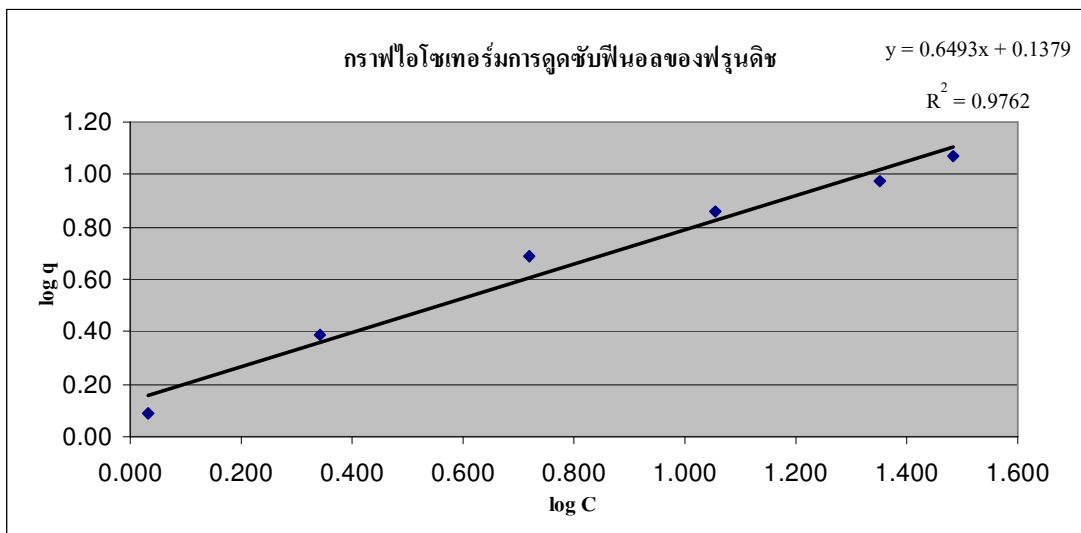
$$\frac{1}{q_m K} = 0.6998$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.06$$

$$q_m = 16.6667$$

ดังนั้น  $K = 0.0857$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์โดยไบสะเดา พบว่าค่า  $q_m$  มีค่าเท่ากับ 16.6667 มิลลิกรัม/กรัม และค่า  $K$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟีนอลถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของไบสะเดา



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุณดิชโดยรูปถุณยี่

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรุณดิชโดยทั่วไปคือ  $q = KC^{1/n}$  สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของล็กการิทึมได้ดังสมการที่ 11

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

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟโดยรูปถุณยี่จะได้

$$\log q = 0.1379 + 0.6493 \log C \quad \text{----- (12)}$$

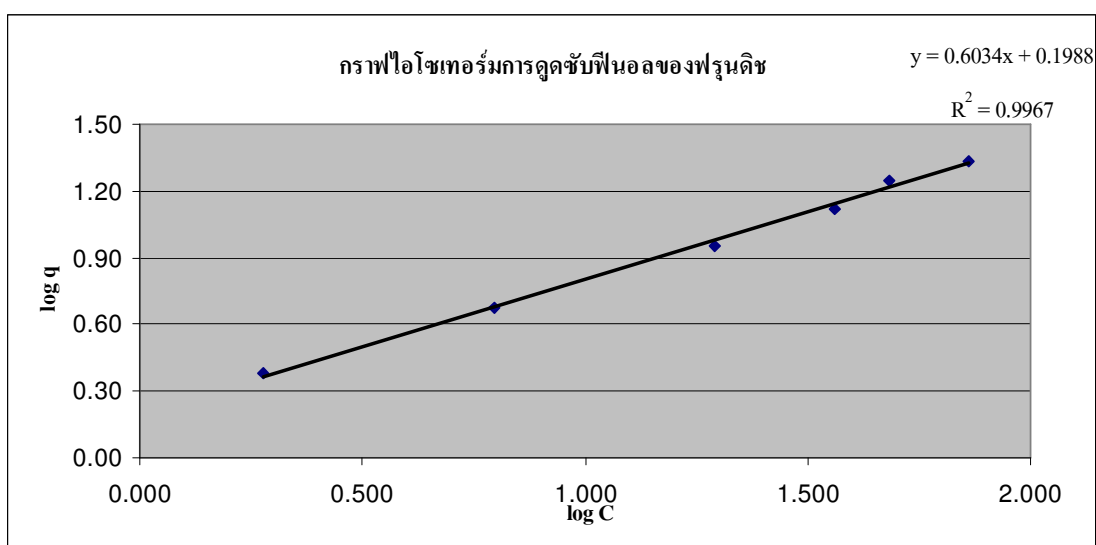
จากสมการที่ 12 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6493 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ 0.1379 นั่นคือ

$$\log K = 0.1379$$

$$1/n = 0.6493$$

$$n = 1.5401$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรูดิชโดยรูปถาญี พบว่าค่า  $n$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าเป็นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่า ฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของรูปถาญี



ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของฟรูดิชโดยไบสเดา

สำหรับการดูดซับโดยไบสเดาเมื่อแทนค่าสมการที่ได้จากกราฟของฟรูดิชจะได้

$$\log q = 0.1988 + 0.6034 \log C \quad \text{----- (13)}$$

จากสมการที่ 13 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6034 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ 0.1988 นั่นคือ

$$\log K = 0.1988$$

$$1/n = 0.6034$$

$$n = 1.6573$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรูดิชโดยสะดวก พบว่า ค่า  $n$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่าเป็นบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ แสดงว่า ฟีนอลจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของไบสเดา

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร) กับ ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถากี้และไบสเดา

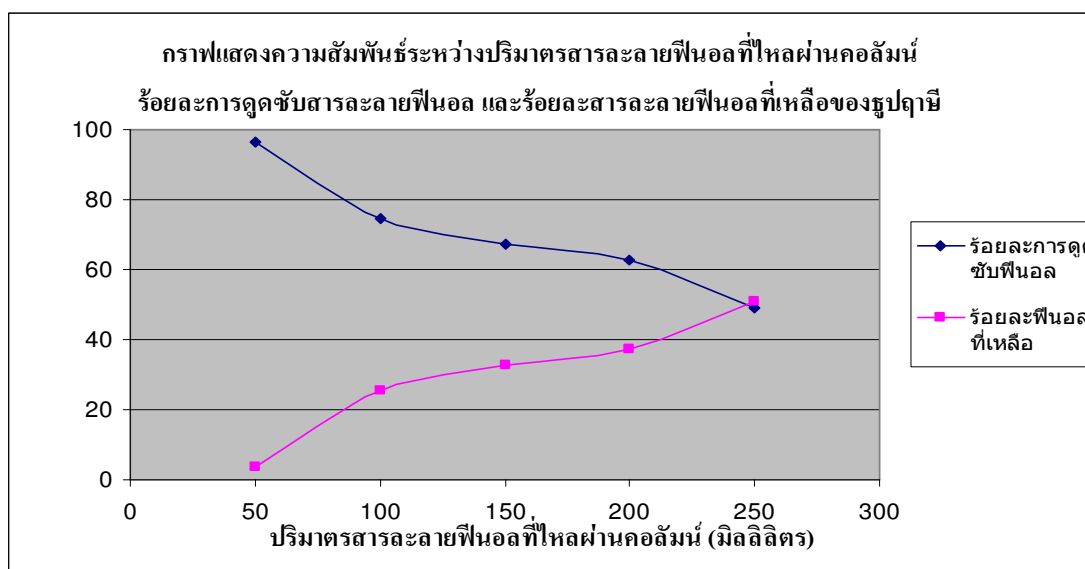
ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ รูปถากี้	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของ ไบสเดา
50	97.84	96.20
100	97.80	93.77
200	97.38	90.22
300	96.22	87.85
400	94.36	87.91
500	93.89	85.47

## 6. ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

6.1 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอล โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ของรูปถากี้

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานฟีนอลเท่ากับ 5 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุรูปถากี้จำนวน 20 กรัม จากนั้นเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านรูปถ่ายมี 50 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด เท่ากับร้อยละ 96.49 และปริมาตรของสารละลายฟีนอลที่เหลืออยู่ มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.51 และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถ่ายมีค่าลดลง เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของรูปถ่ายมีการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลเอาไว้ ในช่วงแรกและเมื่อเวลาผ่านไปรูปถ่ายจะเกิดการอิ่มตัวและหมดสภาพไป ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลลดลง ดังภาพที่ 24 และตารางที่ 10



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอล และร้อยละฟีนอลที่เหลือของรูปถ่าย

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปฤาษี และร้อยละฟีนอลที่เหลือ

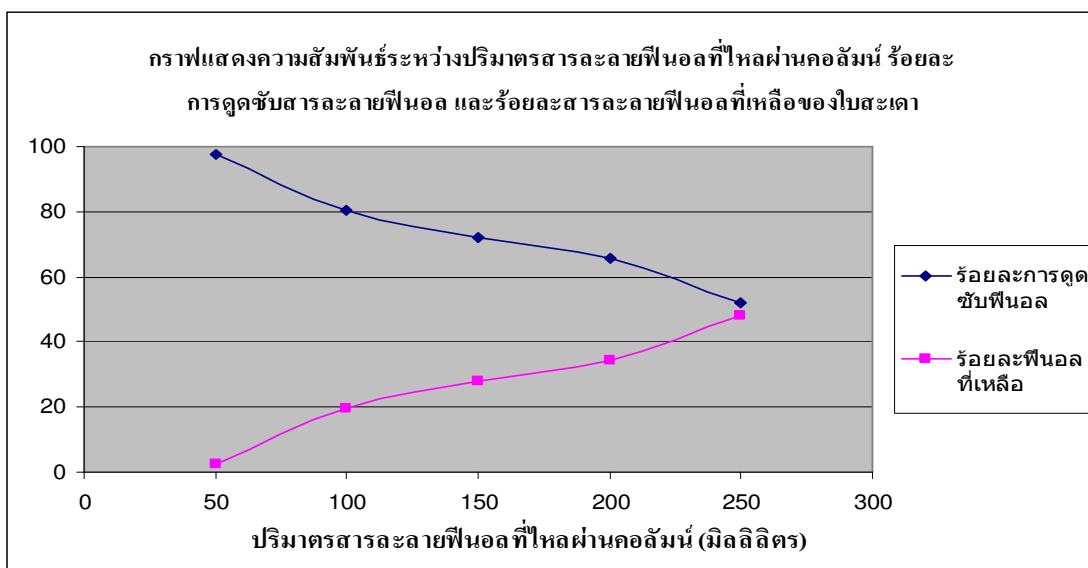
ปริมาณสารละลาย มาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่าน คอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	96.49	3.51
100	74.57	25.43
150	67.17	32.83
200	62.73	37.27
250	49.3	50.7

6.2 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจากสารละลายมาตรฐานฟีนอลโดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ของไบสะเคา

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานฟีนอลเท่ากับ 4 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุไบสะเคาจำนวน 20 กรัม จากนั้นเก็บสารละลายมาตรฐานฟีนอลจากปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่า ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านไบสะเคา 50 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 96.49 และปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.51 และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของไบสะเคามีค่าลดลง เนื่องมาจากบริเวณพื้นผิวของไบสะเคามีการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟีนอลเอาไว้ในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไปไบสะเคาจะเกิดการอิ่มตัวและหมดสภาพไป ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลลดลง ดังภาพที่ 25 และตารางที่ 11





ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอล และร้อยละฟีนอลที่เหลือของไบอะเดา

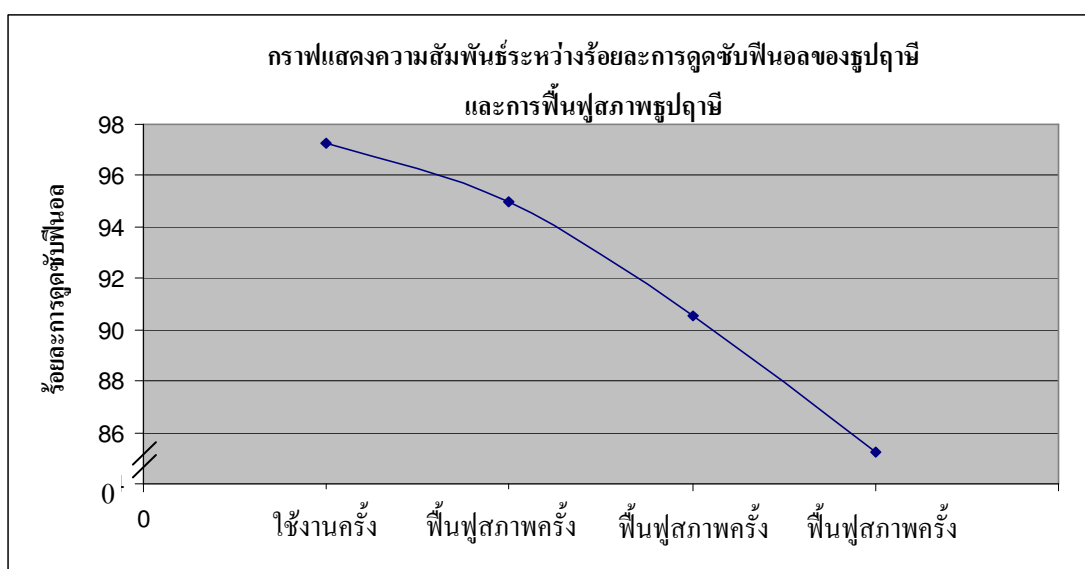
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ ร้อยละการดูดซับฟีนอลของไบอะเดาและร้อยละฟีนอลที่เหลือ

ปริมาณสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล	ร้อยละฟีนอลที่เหลือ
50	97.67	2.33
100	80.49	19.51
150	72.29	27.71
200	65.88	34.12
250	51.81	48.19

## 7. การศึกษาการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายและใบเสมาที่ผ่านการใช้งานแล้ว

### 7.1 ผลการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ใช้รูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วปริมาณ 2 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของรูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและการฟื้นฟูสภาพรูปถ่าย

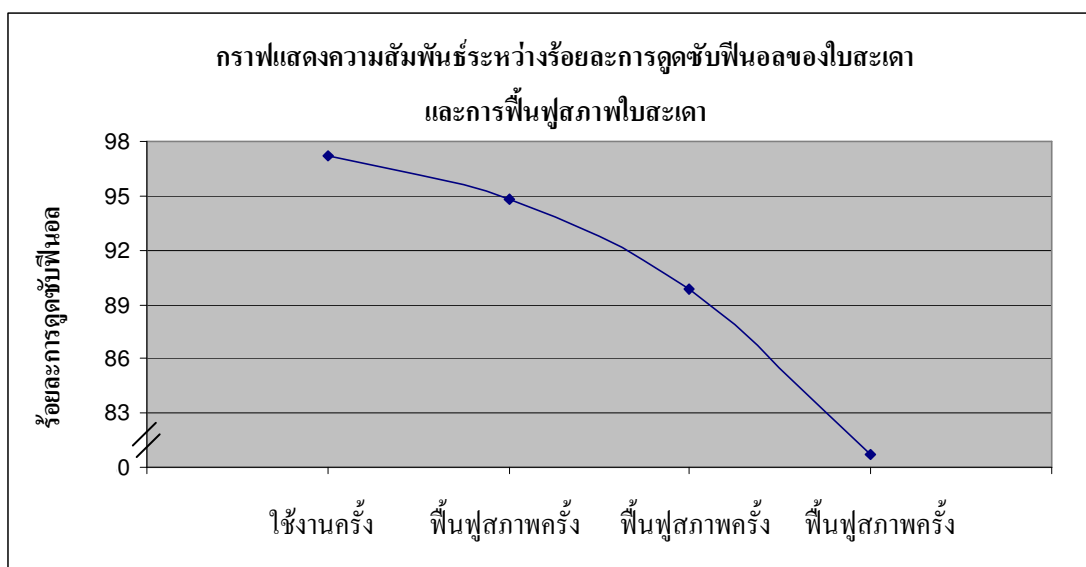
ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและการฟื้นฟูสภาพรูปถ่าย

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าย
ใช้งานครั้งแรก	97.24
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	94.96
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	90.56
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	85.26

จากผลการทดลองตารางที่ 12 รูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟูสภาพ และทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปถ่ายที่ใช้งานครั้งแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง โดยพื้นที่ผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับและพื้นที่ผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียจากการฟื้นฟูสภาพ และจากค่าร้อยละการดูดซับสารละลายฟีนอลของรูปถ่ายพบว่ารูปถ่ายมีแนวโน้มในการฟื้นฟูสภาพมากกว่า 3 ครั้ง

## 7.2 ผลการฟื้นฟูสภาพของไบสเดาที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ใช้ไบสเดาที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาทิต เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของไบสเดาที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของไบสเดาและการฟื้นฟูสภาพไบสเดา

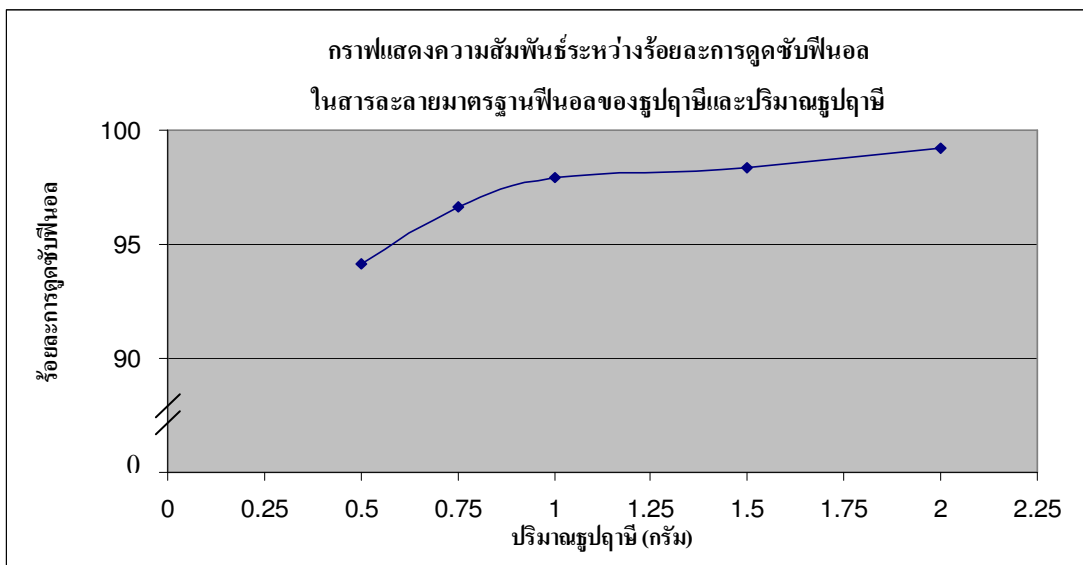
ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับฟีนอลของไบสเดาและการฟื้นฟูสภาพไบสเดา

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับฟีนอลของไบสเดา
ใช้งานครั้งแรก	97.16
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	94.82
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	89.80
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	80.70

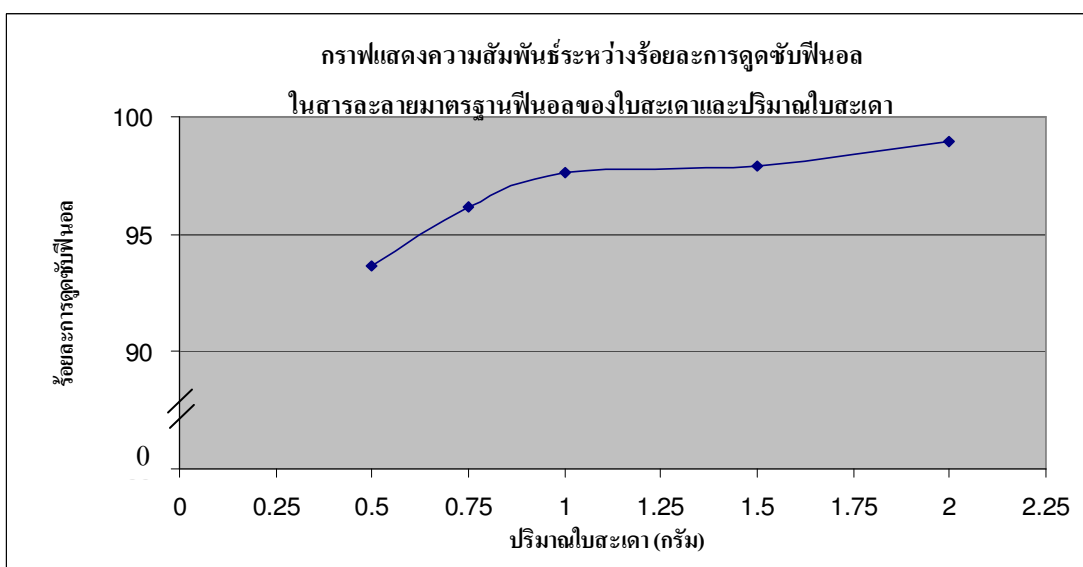
จากผลการทดลองตารางที่ 13 ไบสเดาที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟูสภาพ และทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับไบสเดาที่ใช้งานครั้งแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลงโดยพื้นที่ผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับและพื้นที่ผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียจากการฟื้นฟูสภาพ และจากค่าร้อยละการดูดซับสารละลายฟีนอลของไบสเดาพบว่าไบสเดามีแนวโน้มในการฟื้นฟูสภาพมากกว่า 3 ครั้ง

#### 8. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียจากบริษัทผลิตกระดาษ บริษัท A, B, C, D, E และ F

เนื่องจากน้ำเสียที่เก็บจากบริษัททั้ง 6 แห่ง มีความเข้มข้นของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลอยู่ในช่วง 0–10 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าความเข้มข้นน้อยกว่าสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ใช้ในการทดลองแบบเบตซ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ในการทดลองครั้งนี้เพื่อให้ใกล้เคียงกับปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีอยู่จริงในน้ำเสีย ทำการทดลองหาปริมาณของรูปถ่ายและไบสเดาที่เหมาะสม เพื่อใช้ดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งได้ปริมาณได้ปริมาณรูปถ่ายและไบสเดาที่เหมาะสมคือ 1 กรัม ดังภาพที่ 28 และ 29 ตามลำดับ



**ภาพที่ 28** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปฤาษีและปริมาณรูปฤาษี เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร



**ภาพที่ 29** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและปริมาณใบสะเดา เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร

**ตารางที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรูปถ่ายและใบเสาคับร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและใบเสาคับ เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร

ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟีนอล ของรูปถ่าย	ร้อยละการดูดซับฟีนอล ของใบเสาคับ
0.5	94.13	93.63
0.75	96.67	96.17
1	97.93	97.66
1.5	98.33	97.93
2	99.20	98.93

### 8.1 รูปถ่าย

ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย โดยใช้ น้ำเสียจากบริษัท A, B, C, D, E และ F ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 ใช้รูปถ่ายปริมาณ 1 กรัม นำไปแช่ยาที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล สรุปผลการทดลองได้ ดังตารางที่ 15

**ตารางที่ 15** ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยใช้รูปถ่าย

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
A	3.81	1.08	71.65
B	5.06	1.12	77.87
C	3.13	1.23	60.70
D	3.96	0.93	76.52
E	5.36	1.27	76.31
F	8.77	0.70	92.02

จากตารางที่ 15 น้ำเสียจาก บริษัท A, B, C, D, E และ F มีปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล เท่ากับ 3.81, 5.06, 3.13, 3.96, 5.36 และ 8.77 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับโดยใช้รูปถ่านไม้แล้ว พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย เท่ากับ ร้อยละ 71.65, 77.87, 60.70, 76.52, 76.31 และ 92.02 ตามลำดับ

## 8.2 ไบโสะเดา

ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย โดยใช้ น้ำเสียจากบริษัท A, B, C, D, E และ F ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 4 ใช้สะเดาปริมาณ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล สรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยใช้ไบโสะเดา

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)		ร้อยละการดูดซับ
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ	
A	3.81	1.23	67.72
B	5.06	1.01	80.04
C	3.13	0.93	70.29
D	3.96	0.47	88.13
E	5.36	1.00	81.34
F	8.77	1.23	85.97

จากตารางที่ 16 น้ำเสียจาก บริษัท A, B, C, D, E และ F มีปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล เท่ากับ 3.81, 5.06, 3.13, 3.96, 5.36 และ 8.77 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับโดยใช้สะเดาแล้ว พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสีย เท่ากับ ร้อยละ 67.72, 80.04, 70.29, 88.13, 81.34 และ 85.97 ตามลำดับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของ  
บริษัทต่างๆ โดยใช้รูปถ่ายและใบสะเคาเป็นตัวดูดซับ พบว่าร้อยละการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์  
ของฟีนอลมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ที่ใช้สารละลายมาตรฐานฟีนอล ทั้งนี้  
เนื่องมาจากน้ำเสียจากบริษัทต่างๆ มีสารอื่นเจือปน โดยสารนั้นๆ ไปมีผลทำให้ประสิทธิภาพใน  
การดูดซับลดน้อยลง



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถาวยี่และใบสะเดา โดยการทดลองแบบแบดซ์และแบบคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถาวยี่คือ 5 สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 94.36 และสำหรับใบสะเดาที่พีเอชเท่ากับ 4 สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 93.22

2. ผลของปริมาณรูปถาวยี่และใบสะเดาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าปริมาณรูปถาวยี่และใบสะเดาที่มากขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้ ในการทดลองเลือกปริมาณรูปถาวยี่ที่ 2 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 94.66 และใบสะเดาที่ปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 93.30

3. ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถาวยี่คือ 60 นาที สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 97.08 และสำหรับใบสะเดาระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมคือ 30 นาที สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 95.80

4. ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถาวยี่คือ 90 นาที สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 98.68 และสำหรับใบสะเดาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 60 นาที สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 96.70

5. ผลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลคือความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยรูปถาวยี่สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 97.84 และใบสะเดาสามารถดูดซับ

ฟีนอลได้ร้อยละ 96.20 โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟีนอลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลง

6. การทดลองแบบคอลัมน์ ผลของประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลของรูปถาวยี่และไบสะเดา พบว่าปริมาตรของสารละลายฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านรูปถาวยี่ 50 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 96.49 และมีอัตราการไหล 1.35 มิลลิลิตร/นาที ปริมาตรของสารละลายฟีนอลในสารละลายมาตรฐานฟีนอลที่ไหลผ่านไบสะเดา 50 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 97.67 และมีอัตราการไหล 0.75 มิลลิลิตร/นาที เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลจะลดลง เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับดูดซับฟีนอลเอาไว้ในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการอิ่มตัวและหมดสภาพไป ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลลดลง

7. ผลของการฟื้นฟูสภาพของรูปถาวยี่และไบสะเดา พบว่ารูปถาวยี่หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 94.96, 90.56 และ 85.26 ตามลำดับ ไบสะเดาหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 94.82, 89.80 และ 80.70 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพรูปถาวยี่และไบสะเดา

8. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยใช้รูปถาวยี่และไบสะเดาเป็นตัวดูดซับ น้ำเสียจากบริษัททั้ง 6 แห่ง ได้แก่ บริษัท A, B, C, D, E และ F มีค่าฟีนอลเท่ากับ 3.81, 5.06, 3.13, 3.96, 5.36 และ 8.77 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ารูปถาวยี่สามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 71.65, 77.87, 60.70, 76.52, 76.31 และ 92.02 ตามลำดับ ส่วนไบสะเดาสามารถดูดซับฟีนอลได้ร้อยละ 67.72, 80.04, 70.29, 88.13, 81.34 และ 85.97 ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาขนาดรูพรุนของรูปถ่ายและใบเสมา โดยใช้ SEM (scanning electron microscope) ทั้งก่อนนำมาดูดซับฟีนอลและหลังจากผ่านการดูดซับฟีนอลแล้ว
2. ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของรูปถ่ายและใบเสมา โดยวิธี BET (Brunauer, Emmett and Teller) ด้วยเครื่อง Autosorb

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จรรยา คงฤทธิ. 2546. การกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล และลีย้อมผ้าออกจากน้ำเสียด้วยขี้เถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทวรรณ วรรณพงษ์. 2539. การบำบัด ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐ เจียงวรรณ และณัฐกานต์ บินทวิท. 2541. ผลของขนาดถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวชนิดเม็ดต่อการกำจัดฟีนอลด้วยกระบวนการดูดติดผิว. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตนิกม. 2544. วัชพืชในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2550. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์.
- ธิดา วิเชียรเพชร. 2545. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำเสียชุมชนโดยใช้ดอกชูปด้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- บรรจง วรชนพงษ์ และอเนก ก้านสังวร. 2537. ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย, น.233-247. ในเอกสาร  
ประชุมเชิงปฏิบัติการโครงการศึกษาและพัฒนาสิ่งแวดล้อมผักเป็ดอันเนื่องมาจาก  
โครงการพระราชดำริ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ประดิษฐ์ มีสุข. 2545. เคมอินทรีย์เบื้องต้น. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- พงษ์ชัย เพชรสังหาร, ไพศาล เคนรุ่งเรือง และวัชนพล บุญเลิศ. 2544. การสังเคราะห์คาร์บอนกัม  
มันต์จากกากเมล็ดกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับฟีนอลและทอลูอิน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,  
กรุงเทพฯ.
- มณีรัตน์ นิยมวัน. 2541. ฟีนอลในแหล่งน้ำในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่  
จังหวัดสงขลา และความเป็นพิษต่อปลาหมอสี (*Mystus nemurus*). ภาควิชาวาริช  
ศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- วศชล สามลี. 2545. การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มฟีนอลในน้ำเสียโดยใช้เทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟ  
รีซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สกุณา จันทิ และอุษตา มาตวงษ์. 2548. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล โดยใช้  
เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากมันสำปะหลังและมันเทศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี,  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ.
- สมาคมวิทยาการวัชพืชแห่งประเทศไทย. 2545. วัชพืชสามัญภาคกลาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้าง  
หุ้นส่วนจำกัด ฟันนี้พับบลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.
- สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2530. พรรณไม้ในน้ำ. ภาควิชาพฤกษศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
กรุงเทพฯ.
- สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2542. พรรณไม้ในน้ำในประเทศไทย. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

- สุภาพร จันรุ่งเรือง และเมธี มวีวรรณ. 2537. **การใช้ประโยชน์จากธูปฤๅษี**. วารสารพัฒนาที่ดิน 31 (351-352) : 56-59.
- สุรชัย มัจฉาชีพ. 2538. **วัชพืชในประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แพรวพิตยา, กรุงเทพฯ.
- โสภณ เริงสำราญ, อมร เพชรสม, ศุภสร พัฒนอักษร และสุรชัย พรภคกุล. 2545. **อินทรีเยลิมี่ 2**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- อรุณ บ่างตระกูลนนท์, สมศักดิ์ เจริญวัย, นพรัตน์ หมานริม, ศรีรัตน์ พรเรืองวงศ์ และไพจิตร วราจิต. 2543. **การตรวจเชื้อซัลโมเนลลาในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบแปลงหญ้ากรอง**. เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการ รายงานการศึกษาวิจัยวิทยาศาสตร์การกำจัดขยะและการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ. โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ.
- อำพร คล้ายแก้ว. 2539. **วัชพืชบริเวณอ่างเก็บน้ำโครงการชลประทานในท้องที่ภาคเหนือของประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อำไพ ขงบุญเกิด. 2538. **อนุกรมวิธานพืช อักษร ก**. ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. เพื่อนพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- AOAC. 1995. **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists**. 16<sup>th</sup> ed. Verginia, USA.
- Boyd, C.E. 1970. **Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Waters**. Econ. Bot. 2444 : 94-103.
- Deichmann W.B., and M.L. Keplinger 1963. **Phenols and phenolic compounds**. In:Patty FA ed. Industrial hygiene and toxicology. New York, Interscience Publishers.
- Grace, J.B. and R.G. Wetzel. 1982. Effect of size and growth rate on vegetative reproduction in Typha. **Oecologia**. 50: 158-161.

- Grace, J.B. and J.S. Harrison. 1986. The biology of Canadian weeds. **Canadian Journal of Plant Science**. 66: 361-379.
- Hinkel G.K., and Kintzel H.W. 1968. Phenol poisoning of a newborn through skin resorption. **Dtsch Gesundh** 23, 2420-2422.
- IARC. 1993. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans**. Lists of IARC Evaluations. International Agency for Research on Cancer. World Health Organization. Lyon, France.
- IPCS. 1994. **Environmental Health Criteria 161 : Phenol**. The International Programme on Chemical Safety. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
- Kartesz, J. 2002. *Typha angustifolia*. **Integrated Taxonomic Information System (ITIS)**. Available Source : <http://www.itis.usda.gov/inex.html>. September 20, 2002.
- Merck. 1996. **The Merck Index. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals**. 12th ed. Budavari S. editor. Merck Laboratories. Whitehouse Station, New Jersey.
- Penno, S.V., K. Cartwright, B.R. Hensel, I.G. Krapac and V.A. Nuzzo. 1999. Impact of urban development on the chemical composition of ground water in a fen-wetland complex. **Wetlands** 19 (1) : 236-245.
- Rengaraj, S., Seung-Hyeon Moon, Sivabalan, R., Arabindoo, B. and Murugesan, V. 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 MacPhail R.C. 1992. Systemic and neurotoxic effects of acute and repeated phenol administration (Abstract No. 1047). **Toxicologist** 12, 274.

- Turtle W.R.M., and Dolan T. 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.
- Vidic et al., 1993. R.D. Vidic, M.T. Suidan and R.C. Brenner. **Oxidative Coupling of Phenols on Activated Carbon: Impact on Adsorption Equilibrium**. *Environ. Sci. Technol.* 27 : 2079–2085.
- Wilcox, D.A. 1986. The effect of deicing salts on vegetation in Pinhook Bog, Indiana. **Canadian Journal of Botany**. 64 : 865-874.



**ภาคผนวก**

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	3.73	3.88	3.73	3.78	0.09	92.54
4	3.66	3.73	3.66	3.68	0.04	92.68
5	2.82	2.97	2.82	2.87	0.09	94.36
6	3.58	3.51	3.35	3.48	0.12	92.90
7	3.96	4.11	3.88	3.98	0.12	92.16
8	4.42	4.72	4.50	4.55	0.16	91.08
9	5.10	4.95	4.87	4.97	0.12	90.18
10	5.17	5.10	5.17	5.15	0.04	89.70

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	4.26	4.34	4.19	4.26	0.08	91.48
4	3.35	3.20	3.43	3.33	0.12	93.22
5	3.73	3.58	3.43	3.58	0.15	92.84
6	3.73	3.58	3.20	3.51	0.27	92.68
7	3.58	4.34	3.96	3.96	0.38	92.08
8	4.95	4.80	4.87	4.87	0.08	90.26
9	5.10	5.25	5.02	5.12	0.12	89.88
10	5.10	5.25	5.18	5.17	0.08	89.64

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและปริมาณรูปถ่าย

ปริมาณรูปถ่าย (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	3.58	3.81	3.81	3.73	0.13	92.38
1	3.43	3.35	3.51	3.43	0.08	93.14
2	2.67	2.67	2.82	2.72	0.09	94.66
3	2.14	2.22	2.22	2.19	0.05	95.62
4	1.91	1.84	1.76	1.84	0.08	96.32
5	1.46	1.53	1.53	1.51	0.04	96.94

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและปริมาณใบสะเดา

ปริมาณใบสะเดา (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.5	3.58	4.34	3.96	3.96	0.38	92.08
1	2.97	3.35	3.35	3.22	0.22	93.30
2	2.82	2.67	2.90	2.80	0.12	94.28
3	2.29	2.44	2.40	2.38	0.08	95.16
4	1.99	2.14	2.14	2.09	0.09	95.72
5	1.91	1.68	1.91	1.84	0.13	96.18

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถายีและระยะเวลาปั่น  
กวน

ระยะเวลาปั่น กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	2.29	2.44	2.10	2.28	0.17	95.44
60	1.61	1.46	1.46	1.51	0.09	97.08
90	1.61	1.53	1.61	1.58	0.05	96.84
120	1.76	1.91	1.91	1.86	0.09	96.18
150	2.06	2.44	2.29	2.26	0.19	95.26
180	2.52	2.67	2.22	2.47	0.23	94.80

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและระยะเวลาปั่นกวน

ระยะเวลาปั่น กวน (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	2.29	2.14	2.06	2.16	0.12	95.80
60	2.29	2.44	2.52	2.42	0.12	95.04
90	2.82	2.67	2.67	2.72	0.09	94.66
120	2.97	2.97	2.82	2.92	0.09	94.06
150	3.20	3.35	3.13	3.23	0.11	93.66
180	3.43	3.35	3.43	3.40	0.05	93.20

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่านและระยะเวลาสัมผัศ

ระยะเวลาสัมผัศ (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	1.00	1.00	1.15	1.05	0.09	98.00
60	0.85	0.70	1.00	0.85	0.15	98.30
90	0.62	0.70	0.93	0.75	0.16	98.68
120	1.15	1.08	1.15	1.13	0.04	97.70
150	1.38	1.31	1.31	1.33	0.04	97.38
180	1.61	1.53	1.61	1.58	0.05	96.84

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและระยะเวลาสัมผัศ

ระยะเวลาสัมผัศ (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	1.76	1.91	1.76	1.81	0.09	96.48
60	1.68	1.84	1.61	1.71	0.12	96.7
90	1.91	1.68	1.68	1.76	0.13	96.64
120	1.84	1.84	1.76	1.81	0.05	96.38
150	2.14	2.14	2.06	2.11	0.04	95.72
180	2.37	2.22	2.22	2.27	0.09	95.56

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายและความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	1.08	1.08	1.31	1.16	0.13	97.84
100	2.14	2.22	2.06	2.14	0.08	97.80
200	5.25	5.25	5.10	5.20	0.09	97.38
300	11.32	11.40	11.32	11.35	0.04	96.22
400	22.63	22.47	22.55	22.55	0.08	94.36
500	30.52	30.44	30.59	30.52	0.08	93.89

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดาและความเข้มข้นของฟีนอล

ความเข้มข้น ฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	1.84	1.90	1.90	1.89	0.04	96.20
100	6.24	6.24	6.16	6.21	0.04	93.77
200	19.51	19.59	19.59	19.56	0.04	90.22
300	36.43	36.43	36.59	36.48	0.09	87.85
400	48.50	48.35	48.35	48.40	0.09	87.91
500	72.63	73.00	72.63	72.75	0.22	85.47

ตารางผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของรูปถ่ายีย

ปริมาณ รูปถ่ายีย (กรัม)	$C_0$	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
2	50	1.08	0.05	1.22	0.8177	0.9259	0.0874	0.0334
2	100	2.2	0.05	2.45	0.4090	0.4545	0.3883	0.3424
2	200	5.25	0.05	4.87	0.2054	0.1905	0.6874	0.7202
2	300	11.32	0.05	7.22	0.1386	0.0883	0.8584	1.0538
2	400	22.55	0.05	9.44	0.1060	0.0443	0.9748	1.3531
2	500	30.52	0.05	11.74	0.0852	0.0328	1.0696	1.4846

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของใบสะเดา

ปริมาณ ใบสะเดา (กรัม)	$C_0$	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	50	1.90	0.05	2.41	0.4158	0.5263	0.3811	0.2788
1	100	6.24	0.05	4.69	0.2133	0.1603	0.6710	0.7952
1	200	19.59	0.05	9.02	0.1109	0.0510	0.9552	1.2920
1	300	36.43	0.05	13.18	0.0759	0.0274	1.1199	1.5615
1	400	48.35	0.05	17.58	0.0569	0.0207	1.2451	1.6844
1	500	72.63	0.05	21.37	0.0468	0.0138	1.3298	1.8611

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของรูปถ่าย ร้อยละฟีนอลที่  
เหลือและปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาณฟีนอล ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ ฟีนอลที่ เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
	50	3.58	3.51				
100	25.43	25.28	25.58	25.43	0.15	25.43	74.57
150	32.79	32.87	33.02	32.89	0.12	32.83	67.17
200	37.27	37.12	37.42	37.27	0.15	37.27	62.73
250	50.62	50.77	50.70	50.70	0.08	50.7	49.30

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟีนอลของใบสะเดา ร้อยละฟีนอลที่  
เหลือ และปริมาณฟีนอลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาณฟีนอล ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ ฟีนอลที่ เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
	50	2.44	2.75				
100	19.51	18.00	21.03	19.51	1.52	19.51	80.49
150	27.56	27.71	27.86	27.71	0.15	27.71	72.29
200	34.08	34.16	33.93	34.06	0.12	34.12	65.88
250	48.27	48.12	48.19	48.19	0.08	48.19	51.81



ตารางผนวกที่ 15 การดูดซับฟีนอลของรูปถ่ายที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูด ซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
	ใช้งานครั้งแรก	1.38	1.68			
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	2.37	2.52	2.67	2.52	0.15	94.96
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	4.72	4.80	4.64	4.72	0.08	90.56
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	5.86	7.37	8.89	7.37	1.52	85.26

ตารางผนวกที่ 16 การดูดซับฟีนอลของไบโสะเดาที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูด ซับฟีนอล
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
	ใช้งานครั้งแรก	1.46	1.68			
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	2.37	2.59	2.59	2.52	0.13	94.82
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	5.10	4.95	5.25	5.10	0.15	89.80
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	9.65	9.65	11.17	10.16	0.88	80.07

ตารางผนวกที่ 17 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยรูปถ่าย  
เป็นตัวดูดซับ

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ก่อนการ ดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	3.81	1.31	1.15	1.00	1.15	0.15	71.65
B	5.06	1.23	1.61	1.00	1.28	0.31	77.87
C	3.13	0.85	1.31	1.15	1.10	0.23	60.7
D	3.96	0.77	0.93	1.08	0.93	0.16	76.52
E	5.36	1.31	1.23	0.85	1.13	0.24	76.31
F	8.77	0.55	0.70	0.85	0.70	0.15	92.02

ตารางผนวกที่ 18 การดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลในน้ำเสียของบริษัทต่างๆ โดยใบสะเดา  
เป็นตัวดูดซับ

บริษัท	ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการ ดูดซับ
	ก่อนการ ดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
A	3.81	1.15	1.23	1.31	1.23	0.08	67.72
B	5.06	0.93	0.77	1.08	0.93	0.15	80.04
C	3.13	0.93	0.93	1.08	0.98	0.09	70.29
D	3.96	0.17	0.47	0.47	0.37	0.17	88.13
E	5.36	1.00	1.00	0.70	0.90	0.18	81.34
F	8.77	0.62	1.23	1.23	1.03	0.35	85.97

ตารางผนวกที่ 19 แสดงคุณภาพของน้ำตัวอย่างจาก บริษัทต่างๆ

พารามิเตอร์	บริษัท A	บริษัท B	บริษัท C	บริษัท D	บริษัท E	บริษัท F	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม
TDS (มิลลิกรัม/ลิตร)	567	491	365	272	535	447	ไม่มากกว่า 3,000
TSS (มิลลิกรัม/ ลิตร)	410	4,160	125	125	953	931	ไม่มากกว่า 50
Alkalinity (มิลลิกรัม/ลิตร ของ CaCO <sub>3</sub> )	158.75	209.75	191.25	120	465	870	ไม่ได้กำหนด
Hardness (มิลลิกรัม/ลิตร ของ CaCO <sub>3</sub> )	535	295	750	1,000	930	1,065	ไม่ได้กำหนด
COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	1,800	15,200	200	1,000	2,160	2,880	ไม่มากกว่า 120
BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	145	1,478	30	150	92	25	ไม่มากกว่า 20
Sulfide (มิลลิกรัม/ลิตร)	5.56	2.70	0.92	1	1	0.2	ไม่มากกว่า 1
pH	6.7	6.4	7.0	8.3	6.6	7.3	5.5-9.0
Temperature (°C)	41.3	33.1	37.0	39.0	42.8	43.7	ไม่มากกว่า 40
Turbidity (NTU)	196	986	220	118	936	92	ไม่ได้กำหนด
DO (มิลลิกรัม/ ลิตร)	1.29	0.34	0.97	2.21	1.79	1.69	ไม่ได้กำหนด
EC (ไมโคร ซีเมนต์)	1,127	1,040	731	543	1,171	893	ไม่ได้กำหนด

ตารางผนวกที่ 19 (ต่อ)

พารามิเตอร์	บริษัท A	บริษัท B	บริษัท C	บริษัท D	บริษัท E	บริษัท F	ค่ามาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม
% Sulfate	0.10	0.16	0.14	0.07	0.07	0.15	ไม่ได้กำหนด
Total Phenolic (มิลลิกรัม/ลิตร)	3.81	5.06	3.13	3.96	8.77	5.36	ไม่มากกว่า 1

ตารางผนวกที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชทางสถิติโดยวิธี LSD

รูปถายี่		ใบสะเคา	
ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
3	92.54 <sup>A</sup>	3	91.48 <sup>A</sup>
4	92.68 <sup>A</sup>	4	93.22 <sup>B</sup>
5	94.36 <sup>B</sup>	5	92.84 <sup>B</sup>
6	92.90 <sup>C</sup>	6	92.68 <sup>B</sup>
7	92.16 <sup>D</sup>	7	92.08 <sup>A</sup>
8	91.08 <sup>E</sup>	8	90.26 <sup>C</sup>
9	90.18 <sup>F</sup>	9	89.88 <sup>C</sup>
10	89.70 <sup>F</sup>	10	89.64 <sup>C</sup>

หมายเหตุ XX<sup>X</sup>: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 21 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและใบเสมาทางสถิติโดยวิธี LSD

ธาตุอาหาร		ใบเสมา	
ปริมาณธาตุอาหาร (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ปริมาณใบเสมา (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
0.5	92.38 <sup>A</sup>	0.5	92.08 <sup>A</sup>
1	93.14 <sup>B</sup>	1	93.30 <sup>B</sup>
2	94.66 <sup>C</sup>	2	94.28 <sup>C</sup>
3	95.62 <sup>D</sup>	3	95.16 <sup>D</sup>
4	96.32 <sup>E</sup>	4	95.72 <sup>D</sup>
5	96.94 <sup>F</sup>	5	96.18 <sup>E</sup>

หมายเหตุ XX<sup>X</sup>: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาปั่นกวนทางสถิติโดยวิธี LSD

ธาตุอาหาร		ใบเสมา	
ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
30	95.44 <sup>A</sup>	30	95.80 <sup>A</sup>
60	97.08 <sup>B</sup>	60	95.04 <sup>B</sup>
90	96.84 <sup>B</sup>	90	94.66 <sup>C</sup>
120	96.18 <sup>C</sup>	120	94.06 <sup>D</sup>
150	95.26 <sup>A</sup>	150	93.66 <sup>E</sup>
180	94.80 <sup>A</sup>	180	93.20 <sup>F</sup>

หมายเหตุ XX<sup>X</sup>: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 23 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาสัมพัทธ์ทางสถิติโดยวิธี LSD

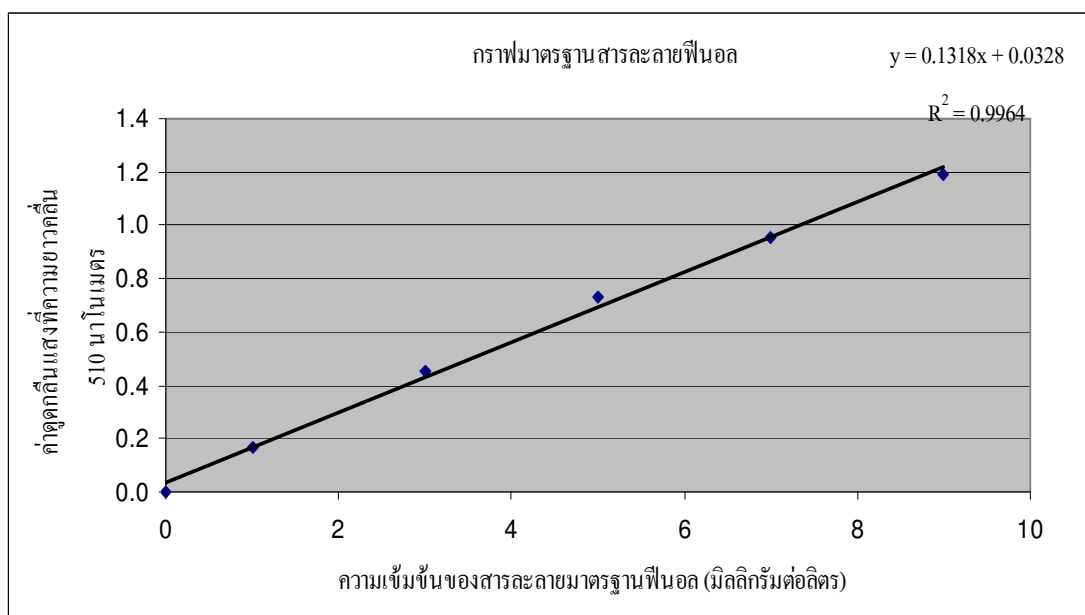
รูปถ่าย		ใบสะเคา	
ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
30	98.00 <sup>A</sup>	30	96.48 <sup>A</sup>
60	98.30 <sup>B</sup>	60	96.70 <sup>A</sup>
90	98.68 <sup>B</sup>	90	96.64 <sup>A</sup>
120	97.70 <sup>A</sup>	120	96.38 <sup>A</sup>
150	97.38 <sup>C</sup>	150	95.72 <sup>B</sup>
180	96.84 <sup>D</sup>	180	95.56 <sup>B</sup>

หมายเหตุ XX<sup>X</sup>: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางผนวกที่ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟีนอลทางสถิติโดยวิธี LSD

รูปถ่าย		ใบสะเคา	
ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล	ความเข้มข้นฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับ ฟีนอล
50	97.84 <sup>A</sup>	50	96.20 <sup>A</sup>
100	97.80 <sup>A</sup>	100	93.77 <sup>B</sup>
200	97.38 <sup>B</sup>	200	90.22 <sup>C</sup>
300	96.22 <sup>C</sup>	300	87.85 <sup>D</sup>
400	94.36 <sup>D</sup>	400	87.91 <sup>E</sup>
500	93.89 <sup>E</sup>	500	85.47 <sup>F</sup>

หมายเหตุ XX<sup>X</sup>: ร้อยละการดูดซับฟีนอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟีนอล

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสุวรรณา หอมชื่น
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 กันยายน 2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสำโรง
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (พืชไร่) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ