ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม | วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง ประสิทธิภาพของสบู่ดำในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง

Efficiency of *Jatropha curcas* L. in Heavy Metal Adsorption of Zinc and Copper

นามผู้วิจัย นางสาวปรารถนา โป่งฟ้า

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์วิทยา ปันสุวรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา .....

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพของสบู่ดำในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง

Efficiency of *Jatropha curcas* L. in Heavy Metal Adsorption of Zinc and Copper

โดย

นางสาวปรารถนา โป่งฟ้า

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2551

ปรารถนา โป่งฟ้า 2551: ประสิทธิภาพของสบู่ดำในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ วิทยา ปั้นสุวรรณ, Ph.D. 134 หน้า

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโลหะหนักสังกะสีและทองแดงด้วย เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำโดยทำการทดลองแบบทำงานเป็นครั้ง และศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย ระยะเวลาการสัมผัส ระยะเวลาการปั่นกวน ขนาดของวัสดุดูดซับ ปริมาณวัสดุดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดริชและไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ รวมทั้งศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวและองค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของสบู่ดำด้วย

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและทองแดง คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 และ 4 ตามลำดับ ระยะเวลาการสัมผัสของสังกะสีและทองแดงเท่ากับ 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกวนในสังกะสีและทองแดง เท่ากับ 90 และ 60 ตามลำดับ ขนาดของวัสดุดูดซับจากสบู่ดำในสารละลายสังกะสีและทองแดงที่ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นด้วยและความเข้มข้นของโลหะหนักสูงขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักลดลง ผลการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช และความสามารถในการดูดซับสังกะสีจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะพบว่าใบและเปลือกเมล็ดสามารถดูดซับได้ใกล้เคียงกันเท่ากับ 71.84 และ 70.98 % ตามลำดับ ในทองแดงพบว่าใบสามารถดูดซับได้ดีกว่าเปลือกเมล็ดคือ 76.57 และ 68.83% ตามลำดับรวมทั้งยังพบว่าลิกนิน สารประกอบฟีนอลลิก และพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับโลหะสังกะสีและทองแดง

_____ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pradthana Pongfha 2008: Efficiency of *Jatropha curcas* L. in Heavy Metal Adsorption of Zinc and Copper. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Vittaya Punsuvon, Ph.D. 134 pages.

This research studied the removal of zinc and copper heavy metals from aqueous solution by seed shell, leaf, stem, fruit shell and bark of *Jatropha curcas* L. The experiments were conducted in batch experiment. The influence of different experimental parameters such as pH of solution, contact time, shaking time, size of adsorbent, adsorbent dose and concentration of heavy metal were evaluated. The Freundlich and Langmuir adsorption isotherms.were studied too. Furthermore, the analysis of surface area and chemicals constituent of different parts of *Jatropha curcas* L. were also studied.

The results showed that the optimum removal conditions of zinc and copper in aqueous solution were pH 5 and 4 respectively, contact time for 60 minute, shaking time for 90 and 60 minutes respectively, adsorbent size < 0.25 mm. When the of adsorbent dose increased, the effectiveness of treatment was also increased. On the other hand when the concentration of heavy metals increased, the effectiveness of treatment tended to decrease. Langmuir and Freundlich isotherms were fitted well on these experiments. The result in adsorption from wastewater of plating industry showed that zinc adsorption with leaf and fruit shell were 71.84 and 70.98 %, respectively. The copper adsorption with leaf and fruit shell was 76.57 and 68.83 %, respectively. The result of copper adsorption showed leaf was better than fruit shell. In addition, the content of lignin, total phenolic compound and surface area of adsorbents were zinc and copper adsorption.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ปั้นสุวรรณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ดูแลควบคุมการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิดและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ อย่างใกล้ชิด

ขอขอบคุณหน่วยเอนไซม์และนาโนเทคโนโลยี สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณนายประยุทธ นางสุนันท์ โป่งฟ้า บิดาและมารดาที่คอยเป็นกำลังใจให้ ที่คอยให้คำปรึกษา และกำลังใจ จนข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปรารถนา โป่งฟ้า

ตุลาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	36
ผล	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก แสดงผลการทดลอง	70
ภาคผนวก ข แสดงการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสบู่ดำ	117
ภาคผนวก ค แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของสบู่ดำ	122
ภาคผนวก ง แสดงผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสบู่ดำโดย FTIR	125
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์โลหะหนัก	128
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	135

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การใช้โลหะหนักสังกะสีและทองแดงในอุตสาหกรรมและแหล่งปนเปื้อน	5
2	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	18
3	แสดงสรรพคุณทางเภสัชของส่วนต่างๆ ของสบู่ดำ	25
4	ค่าการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square)ของการดูดซับสังกะสี	52
5	ค่าการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของการดูดซับทองแดง	53
6	ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	55
7	การกำจัดโลหะหนักสังกะสีและทองแดงจากโรงงานชุบโลหะ	55
8	องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของสบู่ดำ แสดงในรูปของ%	57

ตารางผนวกที่

ก1	ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	71
ก2	ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	75
ก3	ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	79
ก4	ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	83
ก5	ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	87
ก6	ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	91
ก7	ผลของขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	95
ก8	ผลของขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	97
ก9	ผลของปริมาณตัวซับที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	99
ก10	ผลของปริมาณตัวซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	103
ก11	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี	107
ก12	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก13	แสดงข้อมูลสมการการดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์ในสารละลายสังกะสี	115
ก14	แสดงข้อมูลสมการการดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์ในสารละลายทองแดง	116
ข1	องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆของสบู่ดำ	122
จ1	แสดงค่าต่างๆในการวิเคราะห์โลหะหนักสังกะสีและทองแดง	131
จ2	แสดงค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานสังกะสีในการทำกราฟมาตรฐาน	132
จ3	แสดงค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานทองแดงในการทำกราฟมาตรฐาน	133

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดริช	22
3	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	23
4	เปลือกเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ	36
5	ใบสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ	37
6	ลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ	37
7	เปลือกผลสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ	38
8	เปลือกลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ	38
9	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีในสารละลายที่ระดับพีเอชต่างๆ	39
10	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงในสารละลายที่ระดับพีเอชต่างๆ	40
11	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ระยะเวลาการสัมผัสต่างๆ	41
12	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ระยะเวลาการสัมผัสต่างๆ	42
13	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ระยะเวลาการปั่นกวนต่างๆ	43
14	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ระยะเวลาการปั่นกวนต่างๆ	44
15	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีขนาดของตัวดูดซับต่างๆ	45
16	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงนาดของตัวดูดซับต่างๆ	46
17	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ปริมาณของตัวดูดซับต่างๆ	47
18	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ	48
19	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ	49
20	ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ	50
21	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในสังกะสี	51
22	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดริชในสังกะสี	52
23	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในทองแดง	53
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดริชในทองแดง	53
25	โครงสร้างของลิกนิน	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค1	ลักษณะพื้นผิวของเปลือกเมล็ดสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า	124
ค2	ลักษณะพื้นผิวของใบสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า	124
ค3	ลักษณะพื้นผิวของลำต้นสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า	125
ค4	ลักษณะพื้นผิวของเปลือกผลสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า	125
ค5	ลักษณะพื้นผิวของเปลือกลำต้นสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า	125
ง1	FT-IR spectra ของเปลือกเมล็ดสบู่ดำ	127
ง2	FT-IR spectra ของใบสบู่ดำ	127
ง3	FT-IR spectra ของลำต้นสบู่ดำ	128
ง4	FT-IR spectra ของเปลือกผลสบู่ดำ	128
ง5	FT-IR spectra ของเปลือกลำต้นสบู่ดำ	128
จ1	แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี	132
จ2	แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายทองแดง	133
จ3	เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)บริษัทผู้ผลิต Perkin รุ่น Analyst 300	134

ประสิทธิภาพของสบู่ดำในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง

Efficiency of Jatropha curcas L. in Heavy Metal Adsorption of Zinc and Copper

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาโลหะหนักจากของเสียอุตสาหกรรมได้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นทุกขณะและยังคงมีแนวโน้มว่าจะทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทองแดงและสังกะสีเป็นโลหะหนักที่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นสังกะสีนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเซรามิกส์และสีทาบ้าน อุตสาหกรรมยาง และโลหะสังกะสีใช้ในการเคลือบเหล็กไม่ให้เกิดสนิมทำเป็นทองเหลือง ทอง แดงนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า อุตสาหกรรมการชุบและเคลือบโลหะ ทำลวดตัวนำไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องประดับอุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์เซรามิก(วรพันธ์,2532) เป็นต้น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จึงมีโอกาสที่จะพบสังกะสีและทองแดงที่มาจากกระบวนการผลิตปะปนอยู่ด้วย ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2539 กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของสังกะสีและทองแดงไม่เกิน 5.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ จำเป็นต้องมีการจัดการอย่างถูกวิธี ซึ่งถ้าหากขาดการป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพ อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม โลหะหนักสามารถสะสมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ อันส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทองแดงซึ่งมีความเป็นพิษสูงเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง เกิดการระคายเคืองตา ตาอักเสบ เป็นต้น ส่วนสังกะสีส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร อาการแคะแกร็นไม่เจริญเติบโต ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมไม่ให้โลหะเหล่านี้เกินค่ามาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีจากธรรมชาติที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสียจากโลหะหนักนั้นมีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก ดังเช่นกากของเสียทางด้านการเกษตร เช่นการใช้ต้นมันสำปะหลัง ชานอ้อย เปลือกถั่วเหลือง กาบมะพร้าว ซังข้าวโพด ใบสับปะรด เป็นต้น

ปัจจุบันสบู่ดำเป็นพืชที่กำลังได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นพืชที่ให้น้ำมันและน้ำมันสบู่ดำสามารถแปรรูปเป็นเมททิล (methyl) หรือ เอทิลเอสเทอร์ (ethyl esters) ทำเป็นไบโอดีเซล ดังนั้นการนำของเหลือใช้จากสบู่ดำ เช่น ใบ ลำต้น เปลือกลำต้น เปลือกเมล็ด และเปลือกผลมาใช้ในการบำบัดโลหะ จึงเป็นอีกทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งจากสบู่ดำในการผลิตไบโอดีเซล เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี และทองแดงในสารละลายสังเคราะห์ของส่วนต่างๆ ของต้นสบู่ดำ

2. เพื่อศึกษาสภาวะในการดูดซับสังกะสี และทองแดง โดยใช้ส่วนต่างๆของสบู่ดำ

3. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของสังกะสี และทองแดงโดยใช้สมการการดูดซับของฟรุนดริชและแลงเมียร์

4. เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ทดลองกับน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจริง

ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และทองแดงไอออน โดยใช้ส่วนต่างๆของสบู่ดำ ได้แก่ ใบ เปลือกผล เปลือกเมล็ด ลำต้นและเปลือกลำต้น โดยศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม ระยะเวลาการปั่นกวนที่เหมาะสม ระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม ขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสม ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม และเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสมของสังกะสีและทองแดงไอออน โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (batch experiment) จากนั้นนำค่าที่ได้จากาการทดลองมาประยุกต์ ใช้กับน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม และทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดริช

การตรวจเอกสาร

1. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 23-92 ในจำนวนธาตุทั้งหมด 105 ธาตุ ในตารางธาตุจะเป็นโลหะหนัก 68 ธาตุ จากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย ที่สนใจกันมากคือกลุ่มของ โครเมียม แมงกานีส เหล็ก โคบอลต์ นิเกิล ทองแดง สังกะสี เงิน แคดเมียม และปรอท ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน (transition elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในกลุ่มของธาตุรีพรีเซ็นเตตีฟ (representative elements) คือ ตะกั่ว อาร์เซนิก ซิลิเนียม และพลวง โลหะหนักและสารประกอบโลหะหนักเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ถ้าได้รับในปริมาณมากเกินควร

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป มีสถานะเป็นของแข็ง(ยกเว้นปรอทในสภาวะปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex-compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะหนักอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (food chain) โลหะหนักหลายชนิด มีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ โลหะหนักชนิดต่างๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำสามารถสะสมตัวอยู่กับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืช สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่า นี้สามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารได้ (ภารดี, 2541)

และจากการศึกษายังพบอีกว่าการสะสมความเป็นพิษของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามลำดับของระบบห่วงโซ่อาหาร โลหะหนักและสารประกอบของโลหะหนักสามารถสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้(Logan และ Feltz,1985)พืชสามารถสะสมโลหะหนักได้มากตามปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีในน้ำและดินตะกอน(Bidwill และDowdy,1987)

1.1 โลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

โลหะหนักถูกปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำโดยสาเหตุ 2 ประการ คือ จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ ภายในแหล่งน้ำ โลหะหนักจะกระจายอยู่ในส่วนต่างๆ คือ ละลายอยู่ในน้ำ ถูกดูดซับโดยสิ่งของแขวนลอยหรือฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำ รวมทั้งวัตถุหรือตะกอนในแหล่งน้ำ และสะสมไว้ภายในตัวของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ(Enk และMathis,1977) ส่วนที่สะสมอยู่ในตะกอนสามารถเปลี่ยนไปละลายอยู่ในน้ำได้ทั้งโดยกระบวน การทางเคมี-ฟิสิกส์ และชีวเคมี (Frenet,1981) กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โลหะหนักแพร่ลงสู่แหล่งน้ำ วัสดุเหลือใช้ และน้ำทิ้งจากชุมชน โดยเฉพาะการปะปนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กิจกรรมด้านการเกษตร โดยสามารถจำแนกตามแหล่งกำนิดโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ออกเป็น 3 แหล่งที่สำคัญดังนี้

- แหล่งอุตสาหกรรม โดยโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ บรรยากาศ หรือตัวกลางอื่นๆ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ และโรงงานสี จะปล่อยสารตะกั่ว โรงงานชุบเคลือบโลหะจะปล่อยโลหะแคดเมียม โรงงานหล่อพระพุทธรูป จะปล่อยโลหะสังกะสี และทองแดง และโรงงานผลิตยาปราบศัตรูพืชจะปล่อยสารปรอท (Wood, 1975) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้โลหะหนักสังกะสีและทองแดงในอุตสาหกรรมและแหล่งปนเปื้อน

โลหะหนัก	ประโยชน์ใช้สอย	แหล่งปนเปื้อน
สังกะสี	โลหะผสม ทองเหลือง สี เครื่องสำอาง	น้ำเสีย ขยะอุตสาหกรรม
ทองแดง	เหรียญ ท่อ โลหะผสม ลวดไฟฟ้า สารกำจัดเชื้อรา	ฝุ่นโรงงาน น้ำเสีย

- แหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรค่อนข้างสูงเช่น การใช้ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อราต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช เช่น ยาบำบัดเชื้อราจะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบ ยาฆ่าหญ้าที่มีอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบ และยาฆ่าเมลงที่มีซิลิเนียมเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น ซึ่งโลหะส่วนใหญ่นั้นจะสลายตัวได้ยาก ทำให้เกิดการสะสมในดิน เมื่อถูกชะล้างจะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เกิดการ

ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ และไหลลงสู่ทะเลในที่สุด จึงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์น้ำ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

-แหล่งชุมชน ชุมชนก็เป็นแหล่งกำเนิดของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน เช่น การใช้น้ำมันที่มีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ทำให้อากาศในเมืองที่การจราจรแออัดเต็มไปด้วยสารตะกั่ว ขยะมูลฝอยชุมชนที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่เช่น กระดาษ ถ่านไฟฉาย สีทาบ้าน กากหม้อ แบตเตอรี่รถยนต์ ภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ เป็นต้น (อภิชาต, 2536)

1.2 โลหะหนักในแหล่งน้ำ

อภิชาต(2536)กล่าวว่าสารพิษของโลหะหนักชนิดต่างๆ เมื่อมีอยู่ในแหล่งน้ำสามารถที่จะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดิน ตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่หรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้ สามารถเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำ สามารถแบ่งได้ดังนี้

การสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำ ทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลายในน้ำ (solution) และอยู่ในรูปแขวนลอย (suspended solid) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยและพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยจะมี residenc time ยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ และจากการที่น้ำมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา มีผลทำให้ตะกอนใต้น้ำลอยตัวขึ้น(resuspension) จึงมีทั้งกระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวน การคาย (desorption) ของโลหะหนักระหว่างน้ำและตะกอน

การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอน การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนนั้นส่วนหนึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัวของธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างของพวกหินแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือเป็นโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้น ตามสภาพทางธรณีวิทยาแล้วละลายออกมาปนอยู่ในน้ำได้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้และการปล่อยโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมอยู่ในดินตะกอนโดยมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำมาก

การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำ การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำจะสะสมด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตังเองได้ ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชน้ำแต่ละชนิด ก็จะมีการสะสมปริมาณโลหะหนักได้ไม่เท่ากัน

การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหารในลักษณะต่างๆตามชนิดของสัตว์น้ำนั้นๆ โดยการสะสมโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้น้อยมาก ซึ่งการสะสมโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภคโดยถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร (พัชรา, 2531)

1.3 สังกะสี

แหล่งกำเนิด แร่สังกะสีมีอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก โดยปกติจะอยู่ในรูปของแร่ซัลไฟด์ (ซิงค์เบลนด์) และคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบในรูปของวิลลีไมท์ (willemite, Zn_2SiO_4) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งโดยปกติแล้วจะพบแคดเมียมปะปนอยู่กับสังกะสีด้วย แต่มีจำนวนเล็กน้อย (Reilly, 1980)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่เดียว กับปรอทและแคดเมียม มีเลขมวล 65.38 เลขอะตอม 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 มีจุดลอมเหลว 419 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 907 องศาเซลเซียส หล่อหลอมง่าย กลึงไสเข้ารูปง่าย สีขาว ทนทานต่อการเกิดสนิม ปกติเป็นโลหะที่มีความแข็งแต่เปราะ ไม่สามารถดัดให้โค้งงอตามรูปร่างที่ต้องการได้ และเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำจึงไม่คงตัวในธรรมชาติ เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ความสามารถในการละลายของแร่สังกะสีชนิดต่างๆ จะลดลงตามลำดับ ดังนี้ $Zn(OH)_2$ (amorph) > α-$Zn(OH)_2$ > β-$Zn(OH)_2$ > γ-$Zn(OH)_2$ > ε-$Zn(OH)_2$ >$ZnCO_3$ (smithsonite) > ZnO (zincite) > Zn_2SiO_4 (willemite) > Soil-Zn >$ZnFe_2O_4$ (franklinite)

การนำไปใช้ประโยชน์

ก. โลหะสังกะสีใช้ในการเคลือบเหล็กไม่ให้ขึ้นสนิม ทำเป็นทองเหลือง (โลหะผสมของสังกะสีกับทองแดง) และแผ่นสังกะสีใช้มุงหลังคา (Berman, 1980)

ข. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้ทำสีขาวในอุตสาหกรรมเซรามิกส์และสีทา

ค. ซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) ใช้ในอุตสาหกรรมยาและเภสัชกรรม เช่น คาลามายโลชั่นสำหรับรักษาอาการคันของผิว เป็นต้น

ง. ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้เตรียมสารประกอบสังกะสีอื่นๆ เช่นซิงค์ออกไซด์ ซิงค์คาร์บอเนต เป็นต้น

จ. ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ใช้ทำสีขาวในอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นฉากเรืองแสงในโทรทัศน์หลอดฟลูออเรสเซนต์และองค์ประกอบในสีพรายน้ำ

ฉ. ซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมการทำยาง

ช. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ใช้ป้องกันเชื้อราในอุตสาหกรรมกระดาษและไม้อัด

ซ. ซิงค์ไพริดีนไธโอน (zinc pyridinethione) ใช้เป็นส่วนผสมในการป้องกันรังแคในอุตสาหกรรมการผลิตแชมพูสระผม

การเข้าสู่ร่างกายของสังกะสี สังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางด้วยกันดังนี้

-ทางเดินหายใจ สังกะสีที่เข้าสู่ทางเดินหายใจมักอยู่ในรูปของสังกะสีออกไซด์และสังกะสีคลอไรด์ ซึ่งเกิดขึ้นจากงานเชื่อม บัดกีโลหะ ตัดโลหะที่เชื่อมด้วยสังกะสี งานหลอมและหล่อทองแดง เป็นต้น

-การสัมผัสทางผิวหนัง

- ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุสังกะสีเข้าไป เช่น ตับ

การเกิดพิษเนื่องจากสังกะสี สังกะสีก่อให้เกิดการแตกหักของโครโมโซม และความผิดปกติของการแบ่งเซลล์(mitotic poison) ที่ระดับความเข้มข้นของสังกะสี 20 มก./ลิตร และ 30 มก./ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายอย่างฉับพลัน (dangerous substance) สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ สัตว์และพืชบางชนิด แต่ในปริมาณไม่มากนัก เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์ carbonicanhydrase, alcohol dehydroginase ความเป็นพิษของสังกะสี จะเกิดจากการที่ได้รับสังกะสีหรือสารประกอบของสังกะสีเข้าไปในปริมาณมาก สำหรับในพลาสมาของคนปกติจะมีระดับสังกะสีอยู่ประมาณ 85-100 ppb (Davies, 1980) ความเป็นพิษของไอออนสังกะสีอิสระ จะปรากฏรุนแรงขึ้น โดยการเพิ่มพีเอชและลดความเป็นพิษลงเมื่อความกระด้างเพิ่มขึ้น ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีมากเกินไป จะเกิดอาการผิดปกติ เช่น ปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ช็อกความต้านทานโรคต่ำกว่าปกติ บาดแผลปิดยาก และอาจถึงตายได้ (Berman, 1980) สังกะสีออกไซด์ที่เป็นผงฝุ่นละออง

ทำให้เป็นไข้ได้ ซึ่งเรียกว่า metal fume fever หลังจากได้รับผงฝุ่นละอองเข้าไป 24 – 48 ชั่วโมง (Goyer, 1996)

การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร การกินสังกะสีเข้าไปจะไปกัดกร่อนบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหารและกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบและปวดอย่างรุนแรงเมื่อหายแล้วอาจทำให้ทางเดินอาหารตีบตันได้

การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ การสูดดมเอาสังกะสีเข้าไปทำให้เกิดอาการคล้ายไข้หวัดใหญ่ โดยเริ่มจากอาการคลื่นไส้ ปวดศีรษะ มีไข้สูง ปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ ไอ เหนื่อย เหงื่อออก และหนาวสั่น รู้สึกรสของโลหะ ซึ่งมักเกิดขึ้น 4-12 ชั่วโมงหลังการสัมผัส ตามมาด้วยการมีไข้สูง เหงื่อออก และหนาวสั่น อาการดังกล่าวจะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้ว่า โรคไข้วันจันทร์ (Monday fever) หรือโรคไข้พิษโลหะ (metal fume fever) (สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9,ม.ป.ป.)

แหล่งปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

ก. สังกะสีในดิน ปริมาณสังกะสีในดินโดยทั่วไปมีน้อยมาก กล่าวคือเปลือกโลกมีสังกะสี 65-80 ppm หินทั่วไปมีสังกะสี 130 ppm และในดินมีสังกะสี 40-58 ppm (Hodgson, 1963)

ข . สังกะสีในอากาศ ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 1975 ปริมาณสังกะสีที่ธรรมชาติจะปล่อยสู่อากาศมีค่าประมาณ $43.7x10^{6}$ กิโลกรัม และปริมาณสังกะสีที่มนุษย์ปล่อยสู่อากาศมีค่าประมาณ $315x10^{6}$ กิโลกรัม (Nriagu, 1980)

ค. สังกะสีในแหล่งน้ำ Bruland และคณะ (1978) พบว่าปริมาณสังกะสีในมหาสมุทรแปซิฟิคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่า $1x10^{-5}$ mg/l ที่ระดับผิวน้ำ ถึง $6x10^{-4}$ mg/l ที่ระดับความลึก 3,000 เมตรและแหล่งน้ำธรรมชาติในแคริฟลอเนียเหนือมีสังกะสี $0.2x10^{-3}$ - $0.6x10^{-3}$ mg/l

1.4 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะสีแดงส้มอยู่ในหมู่ 1B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.9 จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,730 องศาเซลเซียส ทองแดงมีเลขออกซิเดชัน 2 ค่า คือ +1 และ +2 มีความเหนียวเป็นมันวาว มีความ

สามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ทนการกัดกร่อนในอากาศได้ดีกว่าเหล็ก ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ไอของทองแดงเป็นสีเขียว ทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดีกว่าออกซิเจน ปกติไม่พบรูปอิสระแต่พบในรูปแร่ และสารประกอบ

การเข้าสู่ร่างกายของทองแดง ทองแดงสามารถสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 2 ทางด้วยกัน คือ

- ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุทองแดงเข้าไป ซึ่งอาหารที่มีทองแดงมาก ได้แก่ ตับ(liver) เห็ด(mushroom) เนื้อสัตว์ อาหารทะเล เช่นหอยนางรม (oysters) ถั่ว และผลไม้เปลือกแข็งๆ เช่น ถั่ว (nut) เป็นต้น

- ทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาฝุ่นของสารประกอบทองแดงและไอทองแดงอันเกิดจากโรงงานหลอมโลหะทองแดง และโลหะผสมทองแดงเข้าไป ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจได้

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง การสะสมของทองแดงในร่างกาย จะทำให้เกิดโรคเรื้อรังได้ เช่นเดียวกับโลหะชนิดอื่นๆ และอาจเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันได้ในกรณีที่ร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไปทันที โดยร่างกายบำบัดออกไม่ทัน การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง แบบเฉียบพลันนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

- การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงจากระบบทางเดินอาหาร เกิดจากการรับประทานอาหารที่มีทองแดงปะปนอยู่ปริมาณสูงเข้าไป การเกิดพิษลักษณะนี้จะทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียน และท้องร่วง นอกจากนี้ยังทำให้เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดออกในทางเดินอาหาร ปัสสาวะน้อยกว่าปกติ ไม่มีไนโตรเจนในเลือด (azotemia) ปัสสาวะมีโลหิต(hematuria) และโปรตีน(proteinuria) ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นเร็ว กล้ามเนื้อมีอาการหดเกร็งอย่างรุนแรง มีอาการโคม่า และตายในที่สุด ถ้าได้รับทองแดงมากเกินไป (อภิชาต,2536)

- การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงในลักษณะนี้เกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารประกอบทองแดงหรือไอทองแดงโดยการหายใจเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคือง และอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียนเป็นไข้(metal fune fever) และบางครั้งทำให้ผม

และผิวหนังเปลี่ยนสีได้ การหายใจเอาฝุ่นและสารประกอบทองแดง (dusts and mists of copper salts)ปริมาณมากพอสมควรเข้าสู่ร่างกาย จะทำให้เกิดอาการเลือดคลั่งในเยื่อจมูกและช่องติดต่อระหว่างจมูกและปาก(pharynx) บางครั้งทำให้เกิดแผลทะลุใน septum ของจมูก นอกจากนี้ สารประกอบทอง แดงเมื่อเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตาอักเสบ และตาขุ่นมัวได้ (สิทธิชัย ,2528)

ความเป็นพิษของทองแดงในสิ่งมีชีวิต ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบของ Hemoglobin และมีความสำคัญต่อขบวนการหายใจของพืช แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งมีชีวิตต้องการทองแดงในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งถ้ามีมากเกินไปในสิ่งแวดล้อมก็จะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ Mount (1968) รายงานว่าระดับความปลอดภัยสำหรับการสืบพันธุ์ของปลา *Pinephles promelas*. ในน้ำกระด้าง ($CaCO_3$ 200 มิลลิกัมต่อลิตร) จะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงประมาณ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำอ่อน($CaCO_3$ 30 มิลลิกัมต่อลิตร) จะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงต่ำกว่า โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.018-1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทองแดงแม้จะเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสัตว์น้ำหลายชนิด เช่น พวก mollusks และพวก crustacean โดยเป็นส่วนประกอบของ haemocyanin ในเลือด แต่ถ้าปริมาณทองแดงสูงเกินไปเล็กน้อย ก็อาจเกิดพิษต่อสัตว์น้ำได้ ในหอยนางรมเมื่อสะสมโลหะ ทองแดงไว้มากจะทำให้เหงือกและเนื้อเยื่อส่วน mantle มีสีเขียวผิดปกติ โลหะทองแดงในรูปของ $CuSO_4$อาจทำให้เกิดตะกอนกับสิ่งที่เหงือกปลาขับออกมาและมีผลทำให้ปลาตายได้ เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ผิดปกติ และสารดังกล่าวยังทำลายเซลล์ที่อยู่ตามเหงือกปลาอีกด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อตัวอ่อนของปลาอีกด้วย (อรพินท์,2550)

แหล่งปนเปื้อนของทองแดงในสิ่งแวดล้อม ทองแดงในธรรมชาติ ทองแดงเป็นสินแร่ที่มีมากในธรรมชาติเช่นเดียวกับสังกะสี พบว่ามักจะอยู่ปะปนกับแร่สังกะสี ในธรรมชาติพบทองแดงในรูป chalcopyrite ($CuFeS_2$), chalcocite (Cu_2S),malachite($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) , azurite ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) นอกจากนั้นยังพบในรูปของ cuprite (Cu_2S) รูปแบบสารประกอบเคมีของทองแดงมีหลายรูปแบบทั้งอยู่ในรูปคลอไรด์ซัลเฟต ไนเตรทซึ่งมีความสามารถนำการละลายน้ำได้ดี ส่วนสารประกอบที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ และซัลไฟด์จะไม่ละลายน้ำ โดยทองแดงในน้ำผิวดินปกติมีความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร(McNeelyและคณะ,1979)

ในสภาพธรรมชาติ แร่ทองแดงอยู่ในรูปของซัลไฟด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งแร่เหล่านี้จะสลายตัวได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่เป็นกรด ทำให้ทองแดงถูกปลด ปล่อยออกมาในรูปของไอออน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะหนักทั่วไป ทองแดงจึงจัดว่าเป็นพวกที่เคลื่อนที่ได้ดี แต่เมื่อหินหรือแร่นั้นกลายสภาพมาเป็นดิน ทองแดงเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับแร่อินทรีย์สารในดินได้ง่ายจึงสามารถตกตะกอนได้กับแอนไอออนหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ทองแดงจึงจัดเป็นพวกที่ค่อนข้างไม่เคลื่อนที่ในดิน รูปที่ละลายได้ของทองแดงที่พบมากที่สุดคือ Cu^{2+}

ทองแดงและสารประกอบของทองแดงพบได้ทั้งไปในสิ่งแวดล้อมต่างๆ แต่พบมากในแหล่งน้ำดิบ ซึ่งชนิดของทองแดงที่เกิดขึ้นในน้ำขึ้นอยู่กับค่า pH และความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำ และชนิดของไอออนลบที่ปรากฏอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปในสารประกอบของทองแดง มักมีเลขออกซิเดชัน +1 (Cu^{+})และ +2 (Cu^{2+}) เรียกว่า cuprous และ cupric ตามลำดับ Cu^{+}มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนรูปเป็น Cu^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรมากกว่าเมื่อละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการ

$$2Cu \longrightarrow Cu + Cu^{2+}$$

สารประกอบของ Cu^{2+} ส่วนมากละลายน้ำได้ง่าย เป็นผลทำให้เกิดไอออนของทองแดงในรูปของ$Cu(H_2O_2)_6^{2+}$ หรือ Cu^{2+}

การแพร่ของทองแดงในสิ่งแวดล้อม ทองแดงที่เกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมีมากเนื่องมาจากการใช้ยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อรา และจุลินทรีย์ ซึ่งจะมีผลต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำเป็นส่วนใหญ่ ได้มีการศึกษากันมากเกี่ยวกับระดับของทองแดงในสัตว์น้ำต่างๆ Eisenberg and Topping(1980) พบว่า ในหอยนางรม หอยกาบ และปูในอ่าว Chesapeake มีระดับทองแดงโดยเฉลี่ย 2.6,5.3 และ 5.9 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ Howarth และ Spraguen(1978) ได้ทำการทดลองพบว่า ทองแดงจะชุบจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิ ความกระด้างของน้ำ ปริมาณออกซิเจน ตลอดจนความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ล้วนมีผลกระทบต่อการสะสมของทองแดงในเนื้อปลา rainbow trout

การนำทองแดงมาใช้ประโยชน์ ทองแดงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น มากกว่าร้อยละ 50 ของทองแดงใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือที่ใช้สายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า อุตสาหกรรมการชุบและเคลือบโลหะ ทำลวดตัวนำไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์เซรามิกโลหะเจือจางหรือในรูปของสารประกอบ เช่น ผลึกจุนสี ($CuSO_4$) ที่ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อรา นอกจาก นี้ยังใช้สารประกอบทองแดงในการกำจัดสาหร่ายและหอยที่ไม่มีประโยชน์ในแหล่งน้ำ (Gauss และคณะ, 1985)

2. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิต มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณโลหะหนักซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมออกจากน้ำเสีย ด้วยวิธีการบำบัดทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น

2.1 การบำบัดน้ำเสียโดยเคมี

เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีอื่นได้ วิธีการบำบัดโดยวิธีเคมี เช่น

- การปรับสภาพกรด-ด่าง (pH adjustment) เป็นการปรับสภาพกรด-ด่าง ของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานพีเอชของน้ำเสียไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0)หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการบำบัดต่อไป หลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียเป็นกรดก็จะปรับด้วยสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว(lime,$CaOH_2$) เป็นต้น ตรงข้ามกันถ้าน้ำมีฤทธิ์เป็นด่างจะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ (HCl) กรดกำมะถัน(H_2SO_4) เป็นต้น

- การตกตะกอนทางเคมี(chemical precipitation) เป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเพื่อให้ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ เกิดเป็นตะกอนและมีน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้น สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิดเช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โซเดียมซัลไฟด์ สารส้ม เฟอริคคลอไรด์ เฟอริคซัลเฟต เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอก

ไซด์ ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่pH ต่างๆ ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์(sludge) ที่ได้จะมีส่วนของโลหะหนักที่ต้องนำไปบำบัดต่อ

- การดักจับโดยสารคีเลท(chelation) โดยอาศัยหลักการสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ สารคีเลทหรือโพลีเมอร์ที่เป็นตัวดักจับมีไอออนหรือโมเลกุลที่เรียกว่าลิแกนด์ (ligand) มีการดักจับเกิดพันธะโคเวเลนต์ ลิแกนด์จะต้องมีอย่างน้อย 2 อะตอม ที่สามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะในทางเดียวกัน เช่น อะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น สารที่เป็น chelating agent ได้แก่ 1,2 ไดอะมีโนอีเทน (H_2N-CH_2-CH_2-NH_2) ซึ่งหมู่เอมีน 2 หมู่จับกับไอออนของโลหะหนัก แคดเมียม โคบอลท์ ทองแดง เหล็ก เป็นต้น

- การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (chemical oxidation) คือ เป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนท์(oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสียสารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ด่างทับทิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีนเป็นต้น

- การแลกเปลี่ยนประจุ(ion exchange) หลักการคือไอออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับไอออนเรซิน (resin) ซึ่งมีทั้งเรซินชนิดไอออนลบและไอออนบวก โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่นการใช้เรซินที่มีไอออนลบกับน้ำเสียจากการชุบโลหะที่มีโลหะหนักประเภทประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างกรด

- การใช้ไฟฟ้า(electrodialysis) อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นไฟฟ้าภายในมีแผ่นเรียบกรอง (membrane) 2 ชนิด ทั้งที่เป็นเยื่อประจุลบและประจุบวก อุปกรณ์สามารถแยกไอออนจากน้ำเสียทั้งประจุบวกและประจุลบได้ ซึ่งยอมให้ประจุที่เหมือนกันไหลผ่านแต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยากทำให้แยกโลหะหนักออกได้ เช่นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะ การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นต้น

2.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีฟิสิกส์

เป็นการนำหลักการทางฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธีเช่น

- การกรอง(filtration)การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียด้วยความดันสูงผ่านวัสดุกรองของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่องกรองได้จะถูกดักไว้ การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด(microfiltration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก(ultrafiltration) และการกรองโดยวิธีออสโมซีสกลับ(reverse osmosis) ระบบกรองนี้มักใช้ในการแยกสารแขวนลอยที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

- การทำให้แห้ง(drying) การทำให้น้ำระเหยแห้งนี้อาจทำได้โดยการใช้แสงแดดหรือการให้ความร้อนโดยตรง เพื่อระเหยน้ำออกไป ให้เหลืออยู่แต่ของแข็ง เช่น การตากตะกอนให้แห้งโดยใช้แสงแดดเป็นต้น

- การกลั่น (distillation) เป็นการแยกสารที่มีจุดเดือดไม่เท่ากัน ของสารที่รวมกันอยู่ออกจากกัน

- การดูดซับหรือการดูดติด (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของไหลหรือคอลลอยด์ (colloid) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็ง และของไหลนั้นโดยสารดูดซับ(adsorbate) เช่น ถ่านกัมมันต์(activated carbon)และยังมีสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล(silica gel) เบนโธไนต์ (bentronite) และดินเหนียวกัมมันต์ (activated clay) แต่มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าสารดูดซับอื่นเพราะบำบัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี

- การหมุนเหวี่ยง(centrifuge) โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง น้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูง ของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอก วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

- การแยกตัวด้วยตัวทำละลาย(solvent extraction) หลักการโดยใช้สารสกัด(extractant) ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสารถูกสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ (อภิชาต,2536)

3. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ(adsorbent)

3.1 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liqid –Solid Interface)

ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ ดังนี้ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

ประเภทของการดูดซับ

ธิยา(2542) กล่าวว่าปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

ก. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์(electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย นอกจากนี้ Cheremisinoff and Elierbusch (1978) กล่าวไว้ว่าสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น(multilayer) กล่าวคือ ในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

ข. การดูดซับทางเคมี การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่าการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายประการดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 (ธิยา, 2542)

ตารางที่ 2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50 – 400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5.การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	monolayer และ multilayer	monolayer

ที่มา: ธิยา (2542)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Faust and Aly, 1998)

- ธรรมชาติของสารดูดซับ

ก. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง (ศิโรรัตน์, 2543)

ข. ขนาดของสารดูดซับ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

ค. เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ จะมีคุณสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์ และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น

- ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ

ก. ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกแยกออกจากน้ำไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำหรือสารที่แตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงทำให้ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตาม ยังไม่ทราบความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ(ศิโรรัตน์, 2543)

ข. น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้นด้วย เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

ค. ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นด้วย

- ผลของความเป็นกรด- ด่างของสารละลาย

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน(H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าพีเอชสูง ๆ ส่วนจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลของสารดูดซับกล่าวคือในกรณีที่เป็นสารละลายไอออนถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ ๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันถูกดูดซับของไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งจะได้ผลในทางตรงกันข้ามกับเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง ๆ

- ผลของอุณหภูมิของสารละลาย

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

- ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion เนื่องมาจากความปั่นป่วนของระบบ กล่าวคือ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่สารดูดซับ ทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูงจนทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวเป็นฟิล์มหนาได้ โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าสู่สารดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้ pore diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

รัตนา(2542) กล่าวว่า การพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะหนึ่ง ๆ จำเป็นต้องพิจารณาจากสมดุลการดูดซับ และอัตราการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นของแข็ง การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมควรมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก สามารถดูดซับสารที่ต้องการออกจากของผสมได้ และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกดูดซับทั้งในขั้นตอนการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ โครงสร้างมีความคงตัวและมีราคาไม่แพง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ยากที่จะพบในตัวดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่ง ดังนั้นการเลือกตัวดูดซับจึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมต่อการแยกสารชนิดต่าง ๆ เพื่อให้การแยกมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

4. สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยใช้สารดูดซับ สมดุลการดูดซับจะเกิดได้ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ และปริมาณตัวถูก

ละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด โดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ(adsorption isotherm) ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของสารดูดซับที่ดีที่สุด

ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิก (freundlich adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงค์เมีย

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดริช (freundlich adsorption isotherm)

สมการของ Freundlish เป็นสมการที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อที่จะอธิบายสมดุลของการดูดติด โดย มีรูปแบบที่เป็น Empirical Equation สมการของ Freundlich เป็นที่นิยมกันอย่างกว้าง ขวางอันเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุที่สมการของ Freundlich สามารถอธิบายข้อมูลของกระบวนการดูดติดส่วนใหญ่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการ Freundlich สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 1 และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2

$$q = K_F C^{1/n} \quad (1)$$

โดยที่ q = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม

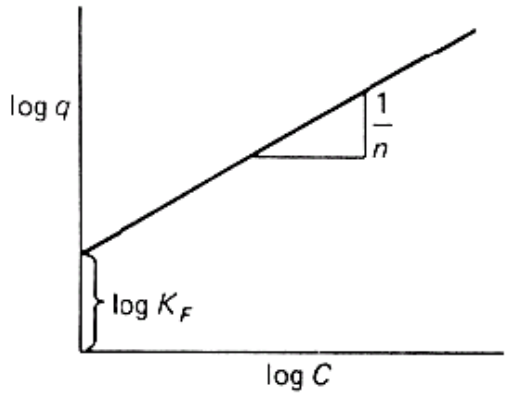
C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร หรือโมล/ลิตร

K_F , $1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Log } q = \text{Log } k_F + \frac{1}{n} \text{Log } C \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q กับ log C จะได้เส้นตรง ซึ่งมีความชัน $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ log K_F โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ 2 แสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดริช

ถ้า $1/n = 1$ ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $1/n < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $1/n > 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับปริมาณมากในการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

Langmuir Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้

ก. แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดผิวจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่ามีการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว

ข. มีพื้นที่ที่ถูกดูดติดจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งที่ แน่นอน

ค. ตรงบริเวณดูดติดผิวจะเกิดอัตราการติดและหลุดออก ซึ่งอัตราการติดมีมากกว่าอัตราการหลุดจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการติดเท่ากับการหลุด)

ง. พลังงานในการดูดติดมีค่าเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระ

ระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้ โดยสมการ Isotherm ของ Langmuir แสดงไว้ในรูปดังนี้

$$Q = \frac{Q_m KC}{1+KC} \quad (3)$$

เมื่อ Q = จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น C

Q_m = จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นที่ผิวดูดซับ

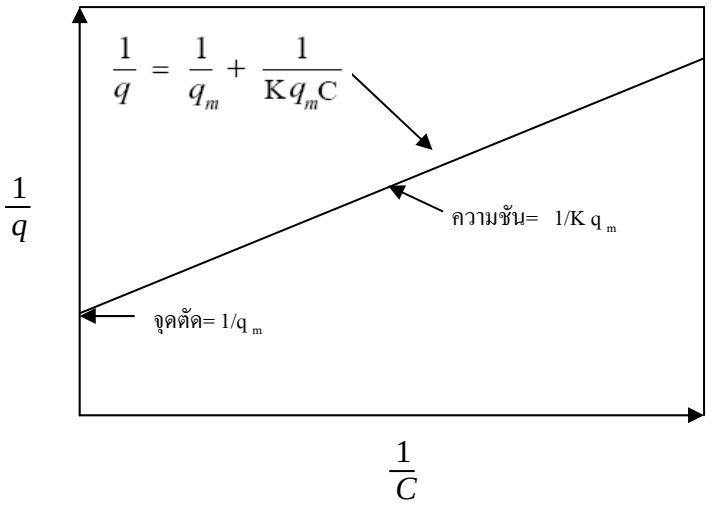
C = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (mg/,M)

K = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน

และเปลี่ยนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad (4)$$

เขียนกราฟระหว่าง1/q และ 1/C จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/K q_m$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $1/K q_m$ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

6. พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา

สบู่ดำ (physic nut or purging nut) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* L. อยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae ลักษณะเป็นไม้พุ่มยืนต้นสูงประมาณ 2-7 เมตร อายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี ลำต้นและยอดคล้ายละหุ่งแต่ไม่มีขน เนื้อไม้ ไม่มีแก่น ใบคล้ายใบฝ้ายหรือใบพุดตาล แต่หนากว่ามี 4 แฉก ก้านใบยาว ออกดอกเป็นช่อที่ส่วนปลายของยอด ดอกสีเหลือง ขนาดเล็กมีกลิ่นหอมอ่อนๆ เกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียแยกกันอยู่คนละดอก ใน 1 ต้นจะมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมีย ผลมีสีเขียวอ่อน เกลี้ยง เมื่อแก่มีสีเหลืองคลายลูกจันทร์ ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกจนผลแก่ใช้เวลาประมาณ 60-90 วัน ผลหนึ่งมี 2-3 พู แต่ละพูทำหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ดไว้ เมล็ดสีดำขนาดเล็กกว่าเมล็ดละหุ่งพันธุ์ลายขาวดำ เล็กน้อยมีปริมาณน้ำมันทั้งเมล็ด 34.96 % (แอนนาและคณะ, 2547)

การปลูกสบู่ดำผลผลิตที่สำคัญคือเมล็ด ซึ่งมีน้ำมันที่สามารถนำไปแปรรูปเป็น ethyl หรือ methyl ester เพื่อผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นไบโอดีเซล หรือใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกประเภท และสามารถใช้น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดโดยตรงกับเครื่องยนต์ทางด้านการเกษตรได้ดี

สภาพพื้นที่ปลูกทั่วไป

สภาพพื้นที่ปลูกที่เหมาะสมของสบู่ดำ ควรเป็นดินร่วน มีธาตุอาหาร อุดมสมบูรณ์ มีความเป็นกรดเล็กน้อย เช่นเดียวกับพืชไร่ทั่ว ๆ ไป แต่มีข้อควรระวัง คือ สบู่ดำเป็นพืชที่ไม่ทนต่อดินมีน้ำขัง ดังนั้น พื้นที่ที่เหมาะสมจึงต้องเป็นที่ลาดเทมีการระบายน้ำดี อาจเป็นที่ราบเชิงเขา ถ้าเป็นที่ราบลุ่ม ควรทำทางระบายน้ำ แต่จะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต หรือในกรณีที่นาดอน เมื่อปรับที่นามาใช้เป็นที่ไร่สำหรับปลูกสบู่ดำ ต้องมีการทะลายคันนาออก ให้ระบายน้ำได้เป็นอย่างดี

ในสภาพพื้นที่ดินที่ไม่เหมาะสมต่อการปลูกพืช ยังพบสบู่ดำสามารถเจริญเติบโตอยู่รอดได้ (Lele, 2005) เช่น ดินด่าง (alkaline soil) ดินเค็ม (saline soil) ดินทราย (sandy soil) หรือดินที่มีหินมาก (stony soil) หรือแม้แต่ในสภาพพื้นที่ที่มีปริมาณฝนตกน้อยปีละ 200 มิลลิเมตร ซึ่ง Joker and Jepsen (2003) สรุปว่าสบู่ดำถูกนำไปปลูกในที่ต่าง ๆ ทั่วโลก แต่ที่พบมีการปรับตัวได้ดีมักอยู่ในเขตร้อน พื้นที่ดินที่มีการระบายน้ำและอากาศดี ในแหล่งที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำที่มีฝนตกระหว่าง 300-1,000 มิลลิเมตรต่อปี แต่ถ้าเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ และมีปริมาณฝนตกมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี เกษตรกรในประเทศต่าง ๆ จะใช้พื้นที่ไปปลูกพืชเศรษฐกิจที่มี

ผลตอบแทนดีกว่า จากการสำรวจพบสบู่ดำสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้บนที่สูง 1,130 เมตร จากระดับน้ำทะเลที่อำเภอ ฮอด จังหวัดเชียงใหม่ (Sadakorn, 1982)

ประโยชน์ด้านอื่นๆ ของสบู่ดำ

Diallo (1994) สบู่ดำเป็นรั้วล้อมรอบพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจหลักๆ เพื่อป้องกันวัว ควาย เข้ามาทำความเสียหายต่อพืชชนิดนั้น เนื่องจากวัว ควาย จะไม่กินใบหรือยอดอ่อนของสบู่ดำ นอกจาก นี้ อินเดียปลูกเป็นรั้วป้องกันลมร้อนในฤดูร้อนที่ทำให้มีการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วในแปลงปลูกผัก ป้องกันการชะล้างของดิน (soil erosion) ในฤดูฝนของเขตพื้นที่แห้งแล้ง ในประเทศ , มาดากัสการ์ปลูกสบู่ดำสำหรับเป็นเสาค้างของต้นวนิลลา และประเทศอินเดียปลูกพืชสมุนไพร ได้แก่ Asgandh (*Withania somnifera*) แซมในระหว่างต้นสบู่ดำสารเคมีจากต้นสบู่ดำจะถูกปล่อยออกมาขับไล่แมลงศัตรูของพืชสมุนไพร Asgandh ได้

Duke (1985) กล่าวว่าส่วนของใบอ่อนหรือยอดอ่อนเมื่อนำไปนึ่งด้วยไอน้ำร้อนแล้วสามารถนำมารับประทานได้อย่างปลอดภัย (Apone, 1978) เมล็ดสบู่ดำจากบางพื้นที่ของประเทศแม็กซิโกเมื่อนำมาต้ม และคั่วด้วยความร้อนสามารถนำไปรับประทานได้ นอกจากนี้ยังเป็นอาหารสัตว์เนื่องจากกากสบู่ดำ (press cake) มีคุณค่าทางอาหารสูง แต่ประกอบด้วยสารพิษมากมายได้แก่ curcin, phorbol esters, saponin, protease inhibitors และ phytates นำกากสบู่ดำมาผ่านกระบวนการกำจัดสารพิษก่อนนำไปเลี้ยงสัตว์โดยการใช้ความร้อนร่วมกับการสกัดด้วยสารเคมี หรือการหมักกากน้ำมันสบู่ดำด้วยเชื้อรา *Rhizopus oryzae* (Gübitz etal. 1997) นอกจากนี้ส่วนต่างๆ ของสบู่ดำยังเป็นยารักษาโรคของมนุษย์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงสรรพคุณทางเภสัชของส่วนต่างๆ ของสบู่ดำ

ส่วนต่างๆ ของสบู่ดำ	สรรพคุณทางเภสัช
ต้น	ยาถ่าย
เปลือก	ยาถ่าย ขับพยาธิ แก้ปวดท้อง
ใบและเนื้อไม้	แก้พิษต้านซาง ถอนพิษที่ทำให้ตัวร้อน แก้ปากและลิ้นเปื่อยพุพอง แก้ลิ้นเป็นฝ้าละออง
เมล็ด	แก้ปวดตามข้อ แก้โรคผิวหนัง เป็นยาระบาย ยาถ่ายอย่างแรง
ยาง	แก้ปากเปื่อย พุพอง และแก้ลิ้นเป็นฝ้าละออง

การใช้สบู่ดำเป็นสารป้องกันกำจัดโรคและแมลงศัตรูพืชรวมทั้งหอย Agaceta และคณะ (1981) รายงานว่าในประเทศฟิลิปปินส์ใช้สารสกัดจากสบู่ดำกำจัดหอยที่เป็นพาหนะของพยาธิในตับ (liver fluke) Vassiliades (1984) พบว่าในประเทศเซเนกัล สารสกัดพืชจากสบู่ดำสามารถกำจัดหอยที่เป็นพาหนะของพยาธิ นอกจากนี้ ยังสามารถสกัดเป็นสารป้องกันกำจัดเชื้อรา (fungicides) รังษีและคณะ (2548) รายงานว่าน้ำสกัดจากเปลือกผลสบู่ดำสามารถยับยั้งการเจริญเส้นใยของเชื้อรา *Phytophthora palmivora* สาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าทุเรียนและเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* สาเหตุโรคแอนแทรคโนสมะม่วงได้ 100% เท่ากับสารเคมีเมทราแลคซิลและโปรคลอราซตามลำดับ

การใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ ส่วนต่างๆของสบู่ดำจากต้นสดๆ สามารถนำมาเป็นปุ๋ยพืชสดได้ (Oudhia, 2003)รายงานว่าการใช้สบู่ดำเป็นปุ๋ยพืชสดจะทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น 11 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ Vohringer (1987) รายงานว่า กากน้ำมันสบู่ดำมีสารประกอบไนโตรเจนสูงเช่นเดียวกับกากน้ำมันละหุ่งและมูลไก่โดยมีไนโตรเจน 3.2-3.8 เปอร์เซ็นต์ โครงการ GTZ ในประเทศมาลีได้ใช้กากน้ำมันสบู่ดำ 5 ตันต่อเฮกแตร์ สามารถเพิ่มผลผลิตของ pearl millet ได้ (แปลงควบคุม 630 กก./เฮกแตร์ แปลงที่ใช้กากสบู่ดำ 1,366 กก./เฮกแตร์) Morcira (1970) ใช้กากสบู่ดำในอัตราต่างๆ ใส่แปลงปลูกพืชหลายชนิดพบว่า การใช้ในอัตรา 5 ตันต่อเฮกแตร์จะให้การงอกของเมล็ดพืชลดลง

การใช้เป็นพลังงาน นอกจากการใช้น้ำมันสบู่ดำแปรรูปเป็น methyl หรือ ethyl esters สำหรับผสมน้ำมันดีเซลแล้วและส่วนอื่นๆ ของสบู่ดำสามารถใช้เป็นพลังงานได้ด้วยเหมือนกันดังนี้ ใน Cape Verde ใช้ส่วนลำต้นและกิ่งใหญ่ใช้เป็นฟืนสำหรับให้ความร้อนแต่เป็นแหล่งที่ให้พลังงานต่ำ Gübitz และคณะ (1997) รายงานว่าการหมักเปลือกผลสบู่ดำและกากน้ำมันสบู่ดำในสภาพไร้อากาศจะได้ก๊าซชีวภาพซึ่ง 70 เปอร์เซ็นต์เป็นก๊าซมีเทน

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัชฎาพร(2545)ทำการศึกษาการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลังใบสับปะรด และกาบมะพร้าว พบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะทองแดง และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลก เปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำประหลังและใบสับประรด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีและทองแดงได้ร้อยละ 67.72 และ 44.78 ตามลำดับ และผลของการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงาน

อุตสาหกรรมซึ่งมีค่าความเข้มข้นของทองแดง และสังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 3.930 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากาบมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพสามารถบำบัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ทำการปรับสภาพ โดยสามารถบำบัดโลหะหนักได้เฉลี่ยร้อยละ 85.80 และ 90.43 ตามลำดับ ส่วนนิธิรัชต์ (2545) ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ในการกำจัดสังกะสีและทองแดงพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักมากที่สุด รองลงมาคือก้านดอกทางตะวันและซังข้าวโพด ความสามารถในการบำบัดทองแดงจะมากกว่าสังกะสี และนิกเกิลโดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดก็จะลดลงซึ่งอรพิน(2550) นำกากชาดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือ พีเอชที่ 5 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที ปริมาณกากชาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นและความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทองแดงคือ พีเอชที่ 6 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที ปริมาณกากชาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นและความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดลดลงและพบว่าการดูดซับโลหะหนักสอดคล้องกับสมการของฟรุนดิช ส่วนนภดลและปิยบุตร(2546) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักสังกะสีโดยมวลแห้งของสาหร่ายหางกระรอก(*Hydrilla verticillata*) ทำการดูดซับสังกะสี พบว่า การดูดซับสังกะสีจะมีแนว โน้มสูงขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับสังกะสีจะมีค่าสูงสุดที่พีเอช 5 ลังกะสีถูกดูดซับโดยมวลแห้งของสาหร่ายหางกระรอกอย่างรวดเร็วประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นที่ต่ำลง

Ajmal et al. (1998) นำมวลแห้งต้นมะม่วงในการบำบัดทองแดงจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับของทองแดงมีค่าสูงสุดที่พีเอช 6 และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชดีกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งOzer และคณะ(2003) นำรำข้าวสาลีแห้งมาดูดซับทองแดง ค่าพีเอที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงคือที่พีเอช 5 ความเข้มข้นของทอง แดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักลำข้าวสาลีแห้ง 0.1 กรัม และระยะเวลาการสัมผัสที่ 30 นาทีส่วนShraboni และคณะ (2008)นำมวลแห้งของสาหร่าย *Mucor rouxii* มาใช้ดูดซับทองแดง โดยช่วงพีเอช 5.0-6.0 สามารถดูดซับได้ดีที่สุด และสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์และจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดย FTIR พบว่ากลุ่มอะมิโน คาร์บอกซิลและกลุ่มฟอสเฟต มีผลในการดูดซับ ซึ่ง King และคณะ (2006) ได้นำใบต้นสักมาทำการศึกษาการดูดซับทองแดง พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง คือ 5.5 ระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 180 และพบว่าไอโซเทอร์ม

การดูดซับของแลงเมียร์สามารถดูดซับได้ดีกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชและSaeed และคณะ (2005) ใช้ต้นมะละกอเป็นตัวดูดซับทองแดงและสังกะสี พบว่ามะละกอปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที ค่าพีเอชที่ 5 สามารถดูดซับได้ดีที่สุด ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์สามารถดูดซับได้ดีกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดริช

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) บริษัทผู้ผลิต Perkin Elmer รุ่น Analyst 300
3. เครื่องเขย่า (shaker) บริษัทผู้ผลิต Innovo 2100
4. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) บริษัทผู้ผลิต Cyber Scan รุ่น 500
5. ตะแกรงร่อนพืช(Laboratory Test Sieve) ขนาด 20 40 และ 60 เมช(mesh)
12. เครื่องสูญญากาศ
13. แผ่นร้อน(hot plate)
14. นาฬิกาจับเวลา
15. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และเบอร์ 42
16. ตู้อบ
19. ถุงมือยาง
21. ขวดรูปชมพู่
22. ปิเปตและลูกยาง
23. หลอดหยด
24. ขวดพลาสติก
25. เครื่องบดตัวอย่าง (wiley mill)
26. เดซิกเคเตอร์ (Desiccator)
27. อะลูมิเนียมฟอยด์

สารเคมี

1. สารละลายสังกะสีและทองแดงมาตรฐาน ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3conc)
3. กรดไนตริก(HNO_3) ความเข้มข้น 0.1 และ 1 นอร์มัล

4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 และ 1 นอร์มัล

วิธีการ

การเตรียมตัวดูดซับจากสบู่ดำ

ทำความสะอาดสบู่ดำด้วยน้ำกลั่น และหั่นเป็นชิ้นประมาณ 0.5 เซนติเมตรแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างสบู่ดำที่ได้มาบดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 40 และ 20 เมช เพื่อคัดขนาดเล็กกว่า 0.25, 0.25-0.42 และ 0.42-0.84 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างสบู่ดำที่คัดขนาดแล้วอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นและนำไปเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

การหาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับของสังกะสีและทองแดงได้โดยใช้วิธีการดูดซับแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลาในการสัมผัส ระยะเวลาการปั่นกวน ขนาดของตัวดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีและทองแดง

1. การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอช

1. ชั่งตัวดูดซับที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มา 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. นำค่าสังกะสีที่ได้จากข้อ 2 มาปรับค่าพีเอชเป็น 2 3 4 5 6 และ 7 ด้วย HNO_3 และ NaOH
4. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์
5. นำไปเข้าเครื่องเขย่านาน 60 นาที ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที
6. ตั้งทิ้งไว้ 60 นาที และกรองเอาตัวดูดซับออก

7. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 6 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

8. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

9. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

10. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

11. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

12. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-12 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

2. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการสัมผัส

1. ชั่งตัวดูดซับมา 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองที่ 1

4. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

5. นำไปเข้าเครื่องเขย่า 60 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

6. ตั้งทิ้งไว้ 30 60 90 120 150 และ 180 นาที และกรองเอาตัวดูดซับออก

7. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 6 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

8. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

9. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

10.ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

11. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

12. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-12 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

3. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการปั่นกวน

1. ชั่งตัวดูดซับ มา 0. 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองที่ 1

4. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขาดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

5. นำไปเข้าเครื่องเขย่านาน 30 60 90 120 150 และ 180 นาทีตามลำดับด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที

6. ระยะเวลาการตั้งทิ้งที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2 ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที และกรองเอาตัวดูดซับออก

7. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 6 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

8. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

9. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

10. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

11. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

12. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-12 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

4. การศึกษาอิทธิพลของขนาดของตัวดูดซับ

1. ชั่งตัวดูดซับ ที่มีขนาด 0.42-0.84, 0.25-0.42, และขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร มาอย่างละ 0.5 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

3. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

4. นำไปเข้าเครื่องเขย่าตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3

5. ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2 จากนั้นกรองตัวดูดซับออก

6. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 6 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

7. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

8. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

9. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

10. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

11. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

12. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

5. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

1. ชั่งขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4 มาจำนวน 0.5 1 2 3 4 และ 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่เหมาะสมมจากการทดลองที่ 1

4. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

5. นำไปเข้าเครื่องเขย่าตามเวลาที่เหมาะสมจากจาการทดลองที่ 3

6. ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 จากนั้นกรองตัวดูดซับออก

7. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

8. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

9. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

10. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

11. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

12. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-12 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

6.การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของตัวดูดซับ

1. ชั่งขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4 มาปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 5 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 25 50 75 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

4. ปิเปตสารละลายสังกะสีมาตรฐานที่ค่าพีเอชต่างๆ กันมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ พร้อมปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์

5. นำไปเข้าเครื่องเขย่าตามเวลาที่เหมาะสมจากจาการทดลองที่ 3

6. ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 จากนั้นกรองตัวดูดซับออก

7. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 มาย่อย โดยใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

8. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง จึงใส่กรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 3 มิลลิลิตร เป็นการย่อยรอบที่สอง

9. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

10. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

11. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

12. จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟหาค่าความสัมพันธ์

13. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-12 แต่เปลี่ยนสารละลายเป็นสารละลายทองแดงมาตรฐานแทน

7. การศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียของโรงงานและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

นำผลการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีที่สุดไปทดสอบจากน้ำเสียของโรงงานเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่สามารถดูดซับไอออนของสังกะสีและทองแดง

1. ปิเปตน้ำเสียจากโรงานมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์

2. นำน้ำเสียที่ได้จากข้อ 1 มาผ่านการย่อย โดยการใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

3. เมื่อสารละลายใกล้แห้งให้ใส่กรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลิลิตร เพื่อเป็นการย่อยรอบที่สอง

4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร

5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

6. น้ำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและหาค่าความเข้มข้นของน้ำเสียจริงจากโรงงาน

7. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการเจือจางให้ค่าความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

8. ปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

9. ชั่งขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4 มาปริมาณที่เหมาะสมจาการทดลองที่ 5 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

10. ปิเปตน้ำเสียที่ทำการปรับค่าพีเอชแล้วมา 50 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ในข้อ

11. นำไปเข้าเครื่องเขย่าความเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

12. ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 จากนั้นกรองเอาตัวดูดซับออก

13. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 12 มาย่อยโดยทำการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร

14. เมื่อสารละลายใกล้แห้ง เติมกรดไนตริกเข้มข้นอีก 3 มิลลิลิตร เพื่อเป็นการย่อยรอบที่สอง

15. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

16. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

17. นำสารละลายที่ได้ใส่พลาสติกเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

18. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1-17 แต่เปลี่ยนสภาวะเป็นสภาวะที่เหมาะสมของทองแดง

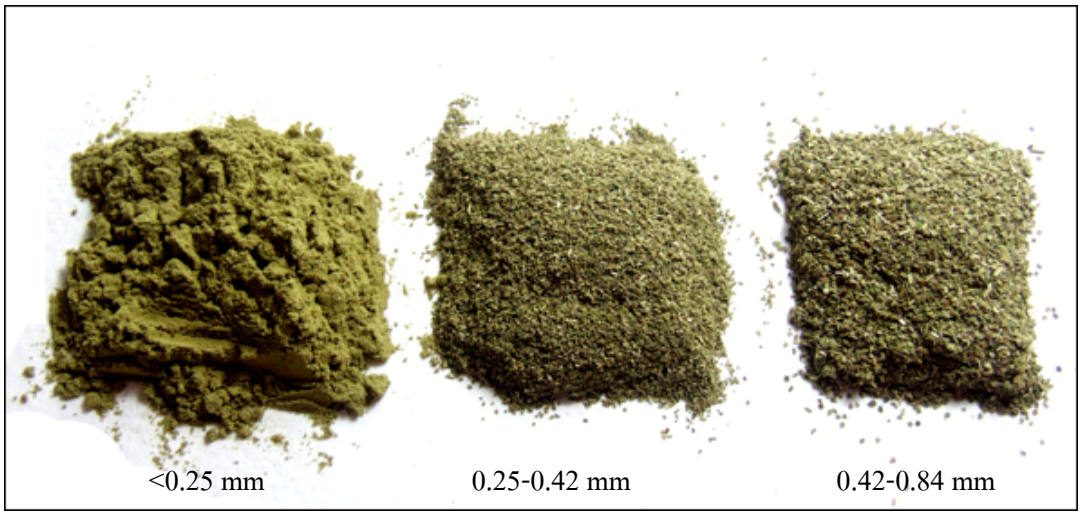
ผลและวิจารณ์

จากการวิจัยในหัวข้อเรื่องประสิทธิภาพของสบู่ดำในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดงจากน้ำทิ้ง โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและทองแดงในสารละลาย โดยทำการทดลองแบบแบตช์ แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ พีเอช (pH) ระยะเวลาปั่นกวน (equilibrium time หรือ shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ปริมาณตัวดูดซับและปริมาณโลหะไอออนเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะไอออนโดยใช้เปลือกเมล็ด เปลือกผล ใบ เปลือกลำต้นและลำต้นของสบู่ดำและวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)และฟรุนดริช (Freundlich adsorption isotherm) และนำสภาวะที่ได้มาใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การเตรียมตัวดูดซับจากสบู่ดำ

นำเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้นมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น และหั่นเป็นชิ้นพอประมาณแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดและทำการร่อนผ่านตระแกรงให้มีขนาด เล็กกว่า 0.25, 0.25-0.42 และ 0.42-0.84 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3 - 7 นำสบู่ดำที่คัดขนาดแล้วอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นและนำไปเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์

ภาพที่ 3 เปลือกเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ



ภาพที่ 4 ใบสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

ภาพที่ 5 ลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

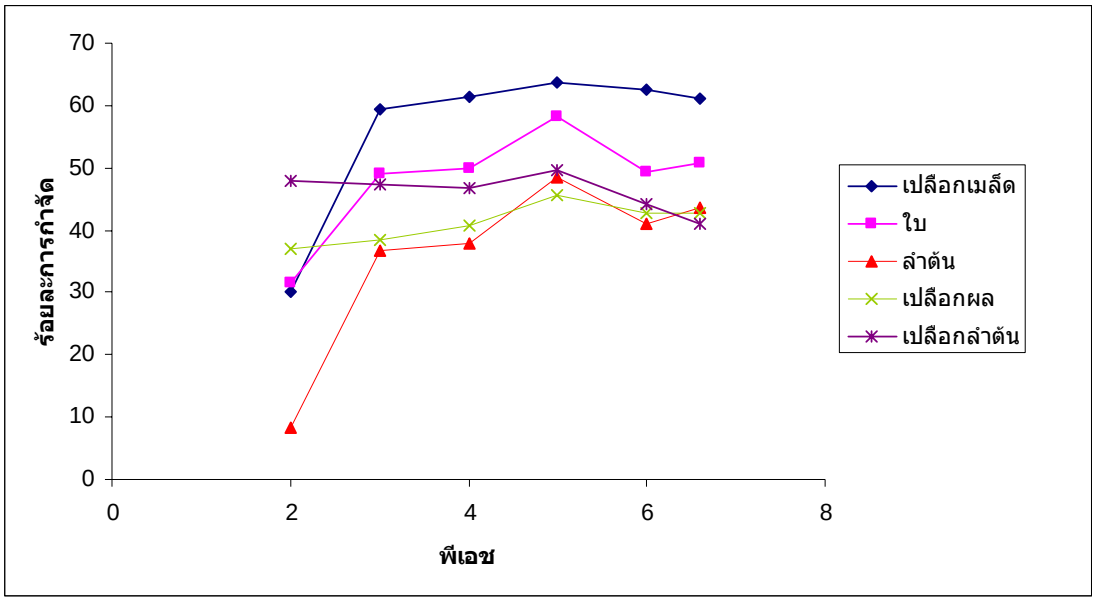
ภาพที่ 6 เปลือกผลสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

ภาพที่ 7 เปลือกลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

ผลของพีเอชริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสังกะสี

การทดลองนี้ใช้สารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอช โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษาทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 2, 3, 4 ,5 , 6 และ 6.6 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



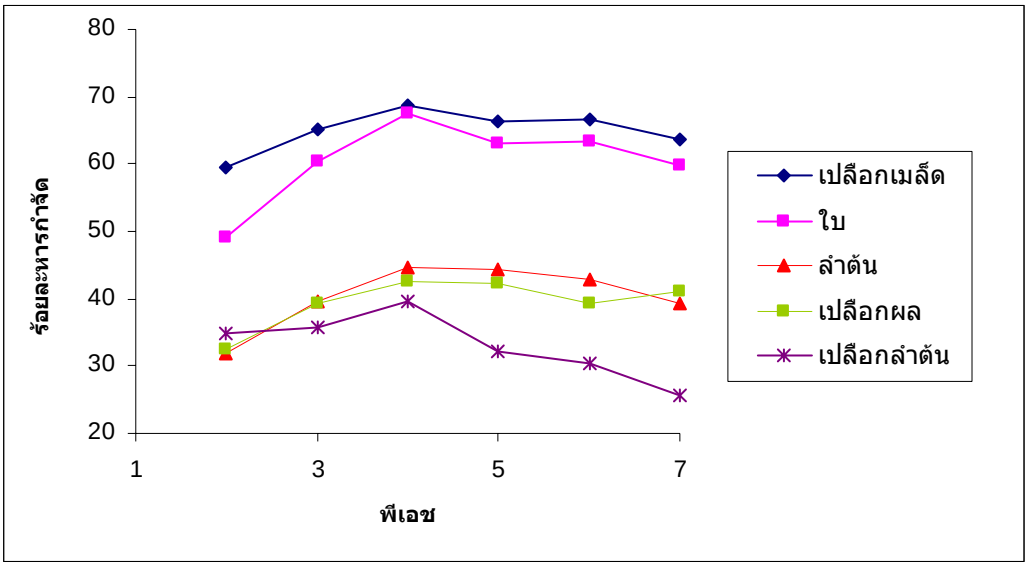
ภาพที่8 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีในสารละลายที่ระดับพีเอชต่างๆ

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่8 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมีแนวโน้มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในสารละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น และเปลือกผลของสบู่ดำ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยมีร้อยละการกำจัดสังกะสีใน เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 63.61(SD = 0.74) , 58.37(SD = 0.71) , 48.41(SD = 0.90) 45.47(SD = 0.56) และ 49.70 (SD = 0.61) หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจะค่อย ๆ ลดลง Zhou และ Kiff (1991) ค่าพีเอชของสารละลายต่ำๆ จะมีปริมาณการดูดซับโลหะหนักได้น้อย ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า ที่พีเอชต่ำ จะเกิดการจับกันระหว่างไฮโดรเนียมไอออน$(H_3O)^+$ กับactive site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ จึงทำให้เกิดแรงผลักเพิ่มขึ้นที่พีเอชต่ำ จึงทำให้โลหะหนักถูกดูดซับได้น้อย และ Kalyani et al.(2004)กล่าวว่า การดูดซับลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น เกิดจากการก่อสารเชิงซ้อนไฮดริกไซด์ เช่นหมู่ คาร์บอกซิลิก เพราะถ้าพีเอชสูงขึ้นความสมารถในการดูดซับโลหะหนักได้น้อย ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการกำจัดสังกะสีเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น และเปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับ ศรินทิพย์ (2550) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสังกะสีด้วยเนื้อไม่มะละกอ และ ภาณุมาศ(2548)

ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักสังกะสีโดยใช้กากของเสียจากขบวนการผลิตน้ำผลไม้ ซึ่งพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีเท่ากับ 5

2 . ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับทองแดง

การทดลองนี้ใช้สารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และทดลองแปรผันค่าพีเอช โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ทำการศึกษาทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 2 , 3, 4 ,5 , 6 และ 7 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 9 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงในสารละลายที่ระดับพีเอชต่างๆ

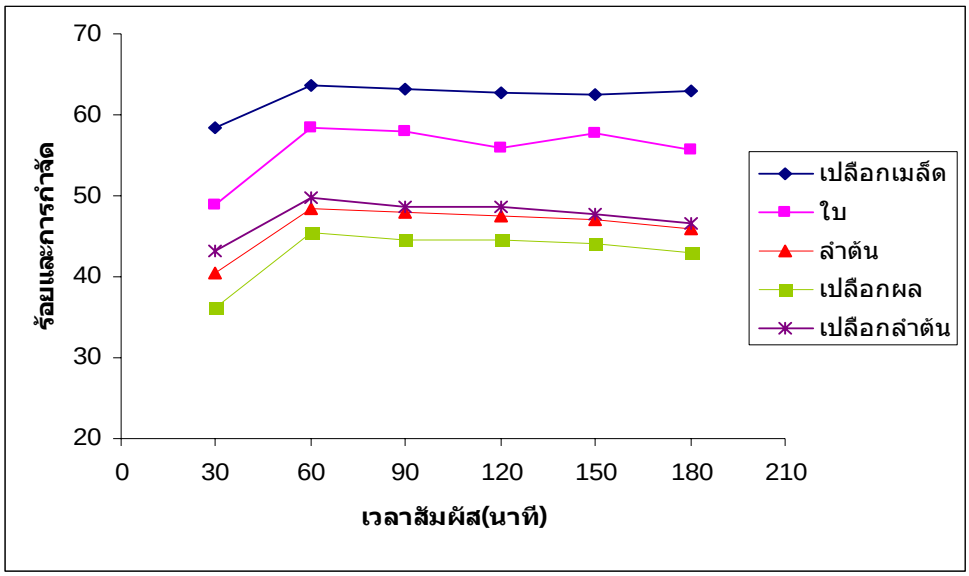
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 9 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมีแนวโน้มสูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในสารละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสังเกตพบว่า เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงของเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่พีเอชเท่ากับ 4 โดยมีร้อยละการกำจัดสังกะสีใน เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น และเปลือกผลของสบู่ดำ และเปลือกลำต้น เท่ากับ 68.59 (SD = 0.31) , 67.56 (SD = 0.26) , 44.58 (SD = 0.20), 42.49 (SD = 0.32) และ 39.66 (SD = 0.21) หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการ

กำจัดทองแดงจะค่อย ๆ ลดลง ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองการกำจัดทองแดง เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น และเปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4

ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการดูดซับสังกะสี

นำสารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ทำการทดลองแปรผันระยะเวลาการสัมผัส โดยเวลาการสัมผัสเริ่มต้น 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



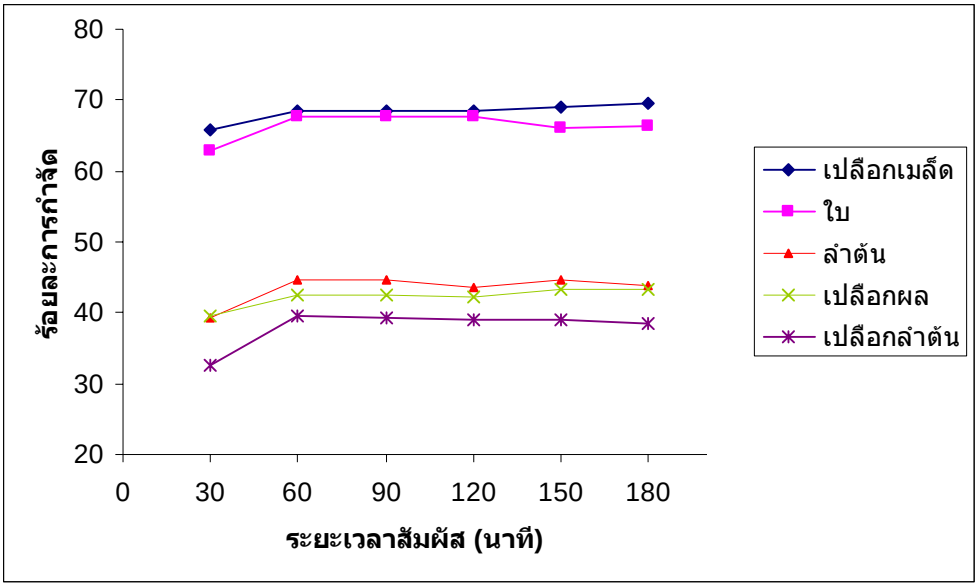
ภาพที่ 10 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ระยะเวลาการสัมผัสต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีก็จะเพิ่ม ขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุดูดซับยังว่างอยู่ จนกระทั่งเกิดขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาทีและจะไม่เพิ่มขึ้นอีก Saeed et al.(2005) อธิบายว่า อัตราเร็วของการดูดซับดำเนินไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเพราะ active site ที่สามารถดูดซับโลหะหนักบนพื้นผิววัสดุดูดซับยังมีอยู่มากทำให้อัตราการดูดซับมีมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป active site จะลดลงเพราะมีไอออนของโลหะหนักเข้า

ไปเกาะยึดอยู่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของ active site อัตราการดูดซับจึงลดลง ร้อยละการกำจัดสังกะสีในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 63.61 (SD = 0.74) , 58.37 (SD = 0.71) , 48.41(SD = 0.90) และ 45.47 (SD = 0.56) และ 49.70 (SD = 0.61) ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณโลหะหนักจะไม่เพิ่มขึ้นอีกและจะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ภาณุมาศ (2548) ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากของเสียจากขบวนการผลิตน้ำผลไม้ ซึ่งพบว่าระยะเวลาการสัมผัสของสารละลายสังกะสีเหมาะสมที่ 60 นาทีและการศึกษาของ Iqbalและ Edyvean (2004) ได้ศึกษาการดูดซับสังกะสีด้วยชีวมวลดักแด้สายพันธุ์ *P.chrysosporium*ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี (ภาพที่ 10)

2. ผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการดูดซับทองแดง

นำสารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ทำการทดลองแปรผันระยะเวลาการสัมผัส โดยเวลาการสัมผัสเริ่มต้น 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



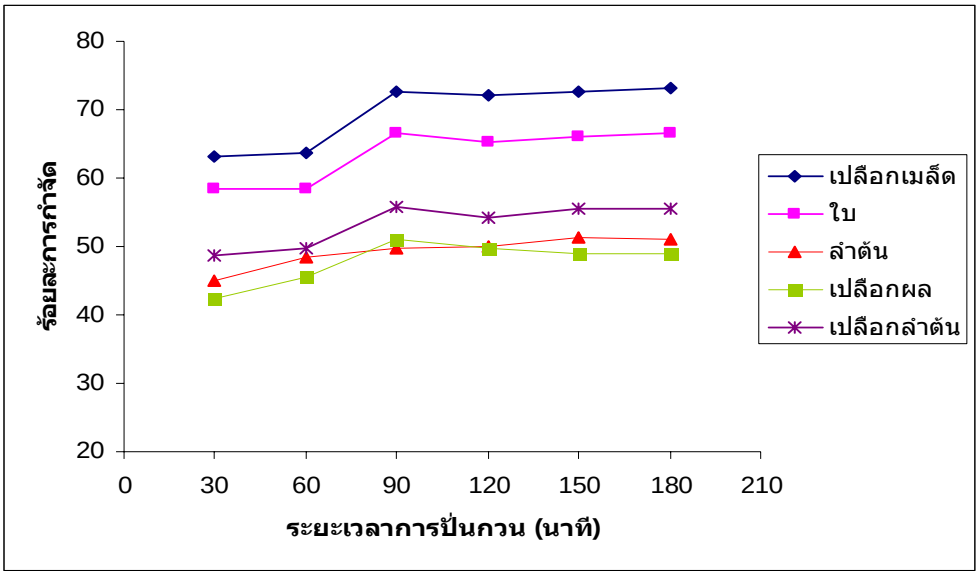
ภาพที่ 11 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ระยะเวลาการสัมผัสต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุดูดซับยังว่างอยู่ จนกระทั่งเกิดขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที โดยร้อยละการกำจัดทองแดงในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 68.59 (SD = 0.31) , 67.56 (SD = 0.26) , 44.58 (SD = 0.20) และ 42.49 (SD = 0.32) และ 39.66 (SD = 0.21) ตามลำดับ ดังนั้นระยะเวลาการสัมผัส 60นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง (ภาพที่ 23) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ภาณุมาศ (2548) ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากของเสียจากขบวนการผลิตน้ำผลไม้ และการศึกษาของ Iqbalและ Edyvean (2004) ได้ศึกษาการดูดซับสังกะสีด้วยชีวมวลดักแด้ สายพันธุ์ *P.chrysosporium* ซึ่งพบว่าระยะเวลาการสัมผัสของสารละลายทองแดงเหมาะสมที่ 60 นาทีเช่นกัน

ผลของระยะเวลาการปั่นกวนต่อการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของระยะเวลาการปั่นกวนต่อการดูดซับสังกะสี

นำสารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ทำการทดลองแปรผันระยะเวลาการปั่นกวน นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวนเริ่มต้น 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

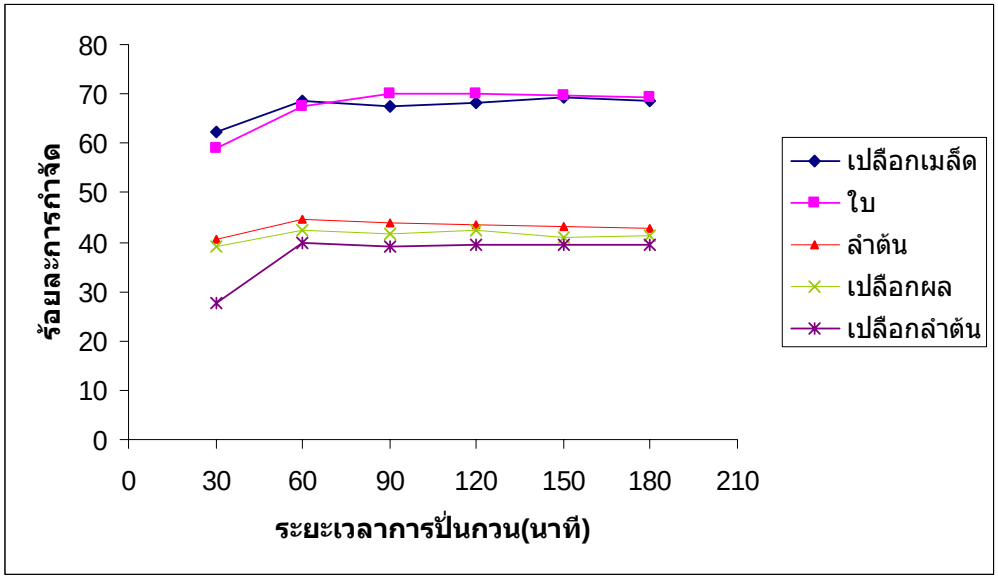


ภาพที่ 12 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ระยะเวลาการปั่นกวนต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับสังกะสีเข้าสู่สมดุลที่ 90 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดสังกะสีในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 72.75 (SD = 0.27), 66.61 (SD = 0.54), 49.62 (SD = 0.38), 51.05 (SD = 0.26) และ 55.87 (SD = 0.43) ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณโลหะหนักจะไม่เพิ่มขึ้นอีก (ภาพที่ 10) Benguella และ Benairra (2002) กล่าวว่า ค่าความเร็วรอบที่ต่ำหรือสูงเกินไปมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ซึ่งพบว่าไอออนของโลหะหนักไม่มีเวลาพอที่จะจับกับหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวหน้าวัสดุดูดซับได้ และ Singh et al.(1998) อัตราของความปั่นป่วนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้น boundary layer ลดลง และการแพร่ไอออนโลหะหนักเข้าสู่ผิวหน้าวัสดุดูดซับได้มากขึ้น ดังนั้นระยะเวลาการปั่นกวน 90นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี

2. ผลของระยะเวลาการปั่นกวนต่อการดูดซับทองแดง

นำสารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ทำการทดลองแปรผันระยะเวลาการปั่นกวน นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวนเริ่มต้น 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



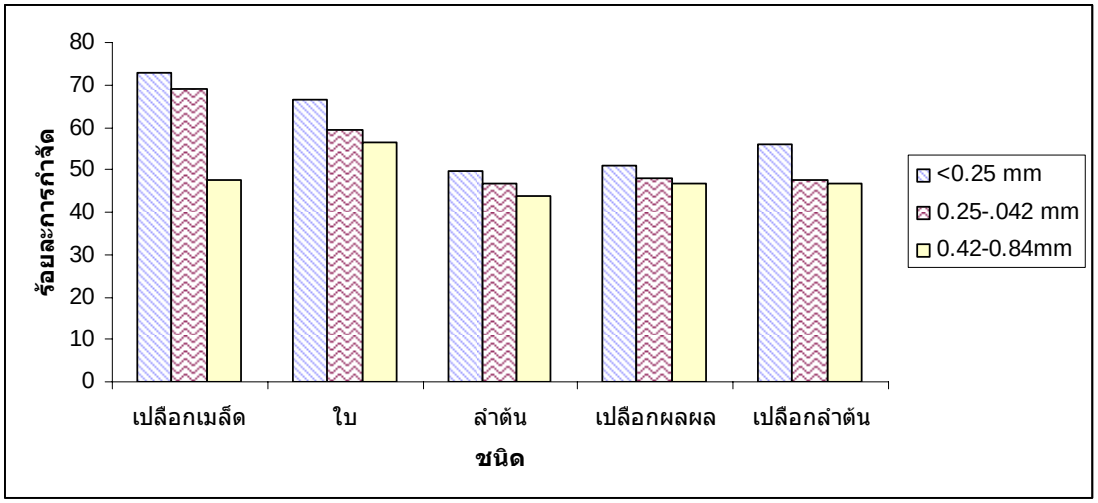
ภาพที่ 13 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ระยะเวลาการปั่นกวนต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าในช่วงเมื่อระยะเวลาปั่นกวนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับสังกะสีเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดทองแดงในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 68.59 (SD = 0.31), 67.56 (SD = 0.26), 44.58 (SD = 0.20), 42.49 (SD = 0.32) และ 39.66 (SD = 0.21) ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณโลหะหนักจะไม่เพิ่มขึ้นอีก (ภาพที่ 13) ดังนั้นระยะเวลาการปั่นกวน 60นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง

ผลของขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสังกะสี

สารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ทำการทดลองแปรผันขนาดของตัวดูดซับ โดยมีขนาด เล็กกว่า 0.25 mm, 0.25-0.42 mm และ 0.42-0.84 mm โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 90 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



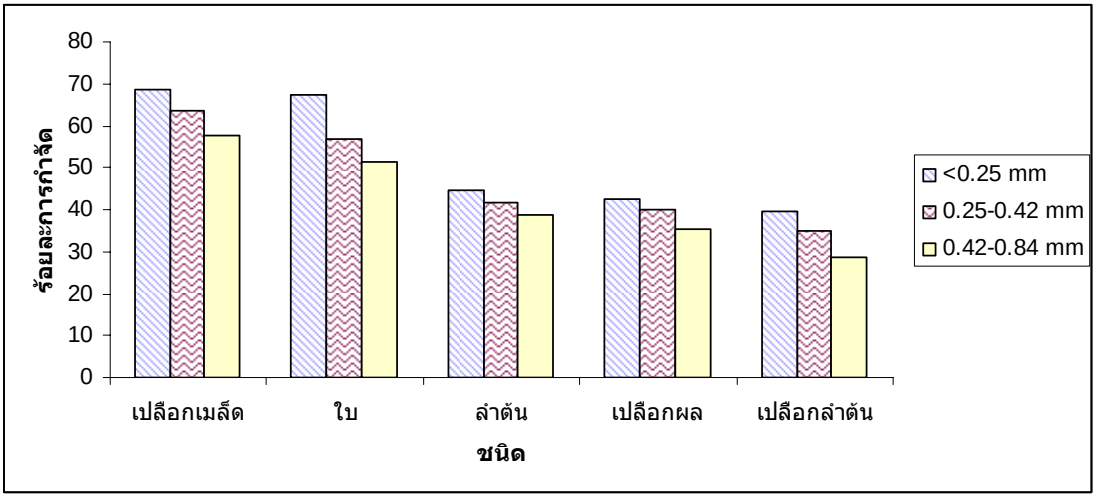
ภาพที่ 14 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีขนาดของตัวดูดซับต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าขนาดของตัวดูดซับขนาดเล็กลง ความสามารถในการดูดซับสังกะสีจะสูงขึ้น โดยที่ขนาดของตัวดูดซับน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตรสามารถกำจัดสังกะสีโดยร้อยละในเปลือก

เมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 72.75 (SD = 0.27), 66.61 (SD = 0.54), 49.62 (SD = 0.38), 51.05 (SD = 0.26) และ 55.87 (SD = 0.43) ตามลำดับ เมื่อขนาดของตัวดูดซับมาใหญ่ขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง ทั้งนี้ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กพื้นทีผิวในการดูดซับจะมากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 14) การดูดซับไอออนของโลหะหนักสังกะสีโดยที่ตัวดูดซับขนาดเล็กกว่า 60 เมช สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร จึงเป็นขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี

2. ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับทองแดง

นำสารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ทำการทดลองแปรผันขนาดของตัวดูดซับ โดยมีขนาด เล็กกว่า 0.25 mm, 0.25-0.42 mm และ 0.42-0.84 mm โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 15 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงนาดของตัวดูดซับต่างๆ

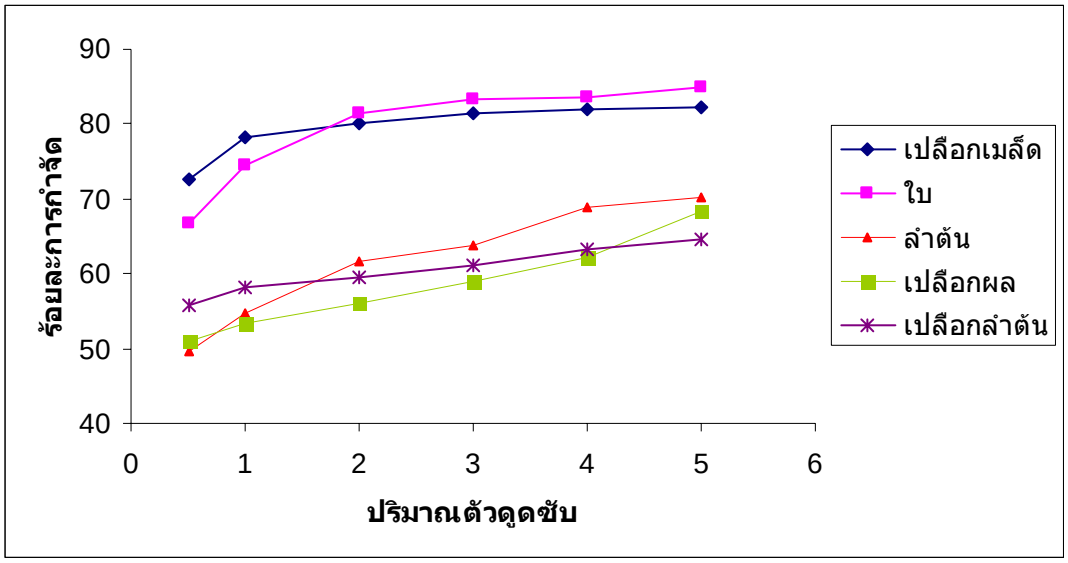
จากการศึกษาพบว่าขนาดของตัวดูดซับขนาดเล็กลง ความสามารถในการดูดซับทองแดงจะสูงขึ้น โดยที่ขนาดของตัวดูดซับน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตรสามารถกำจัดทองแดงได้ร้อยละในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 68.59 (SD = 0.31), 67.56

(SD = 0.26), 44.58 (SD = 0.20), 42.49 (SD = 0.32) และ 39.66 (SD = 0.21) ตามลำดับ เมื่อขนาดของตัวดูดซับมาใหญ่ขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง ทั้งนี้ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กพื้นทีผิวในการดูดซับจะมากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 15) สอดคล้องกับการศึกษาของ Grand และ Weixing (1998) พบว่า ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนักทองแดงโดยที่ตัวดูดซับขนาดเล็กกว่า 60 เมช สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร จึงเป็นขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง

ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสังกะสี

นำสารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ทำการทดลองแปรผันปริมาณตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 1 2 3 4 และ 5 กรัม โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 90 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



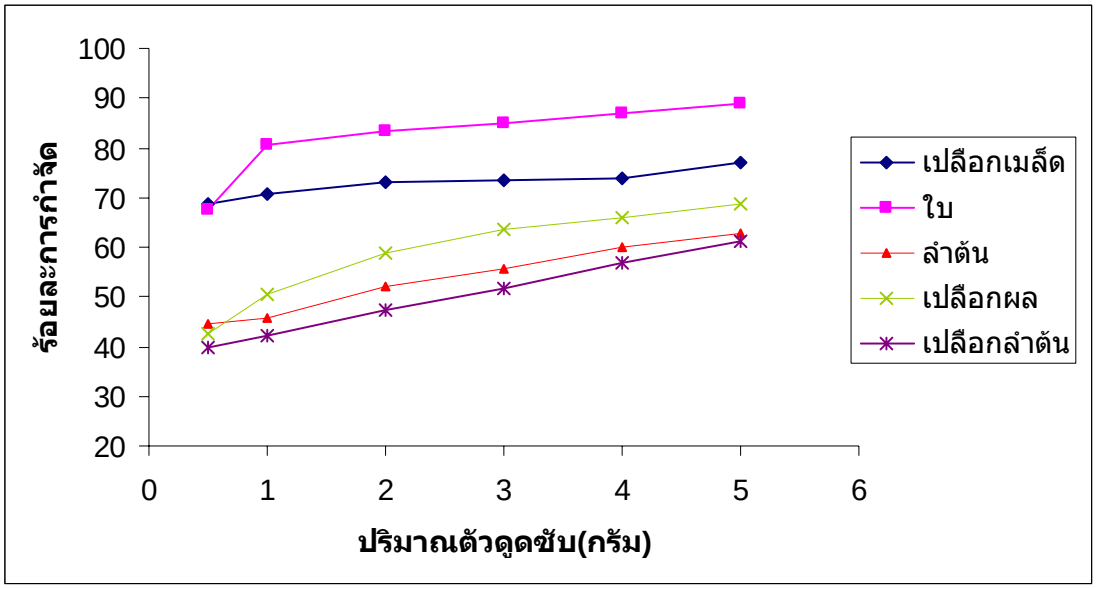
ภาพที่ 16 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ปริมาณของตัวดูดซับต่างๆ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มีปริมาณเพิ่ม ขึ้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของตัวดูด

ซับ ดังนั้นเมื่อตัวดูดซับมีขนาดเท่ากัน ปริมาณตัวดูดซับที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมและเพื่อใช้ในการทดลองต่อยอดคือที่ 2 กรัม โดยร้อยละในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 80.18 (SD= 0.17) 81.34 (SD= 0.14) 61.68(SD= 0.12) 56.07 (SD= 0.17) c และ 59.43(SD= 0.27) ตามลำดับ ดังภาพที่ 16

2. ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับทองแดง

นำสารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ทำการทดลองแปรผันปริมาณตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 1 2 3 4 และ 5 กรัม โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 90 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



ภาพที่ 17 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ

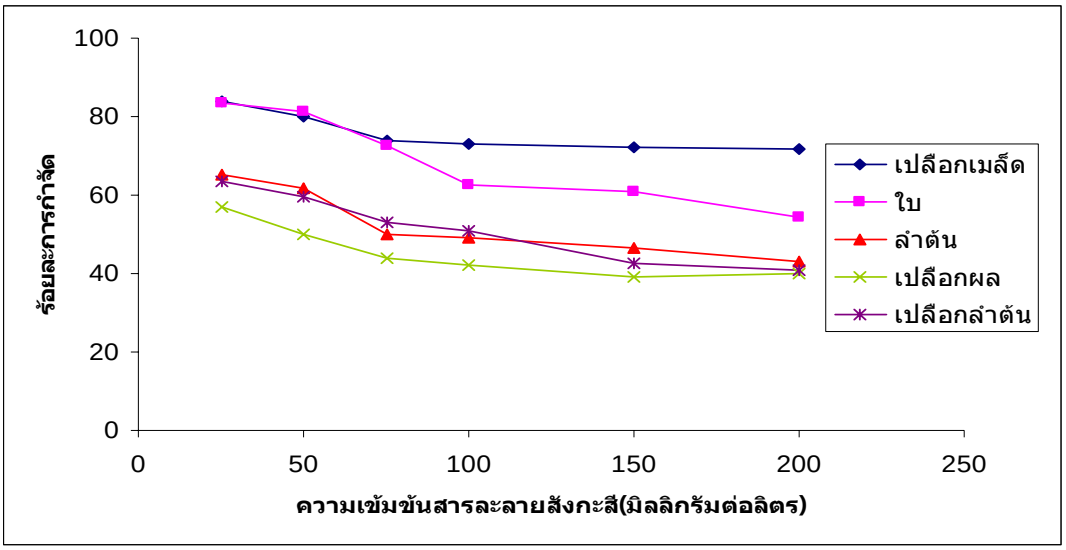
จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อตัวดูดซับมีขนาดเท่ากัน ปริมาณตัวดูดซับที่มากกว่าจึงมีพื้นที่ผิวการดูดซับสูงกว่า

นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมและเพื่อใช้ในการทดลองต่อยอดคือที่ 2 กรัม โดยปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับ(มิลลิกรัมต่อกรัม)ในเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำ เท่ากับ 72.99 (SD = 0.41), 83.23 (SD = 0.32), 53.03 (SD = 0.44), 58.71 (SD = 0.27) และ47.52 (SD = 0.38) มิลลิกรัมต่อกรัม ตัวดูดซับตามลำดับ ดังภาพที่ 17

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับสังกะสีและทองแดง

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับสังกะสีไอออน

ทำการทดลองแปรผันความเข้มข้นของสารละลายโดยนำสารละลายสังกะสีไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 25 50 75 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัม โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 90 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



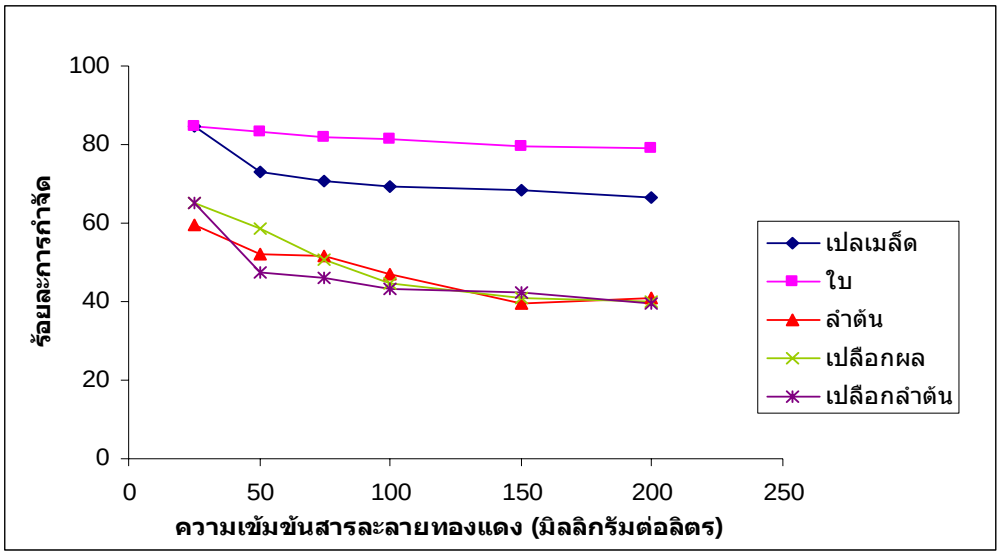
ภาพที่ 18 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีไอออนที่มีค่าความเข้มข้นต่ำ มีร้อยละการกำจัดโลหะหนักสังกะสีสูง และถ้าความเข้มข้นของสารละลายสูง ร้อยละการกำจัดก็จะ

ต่ำ ค่าความเข้มข้นสองสารละลายสังกะสีที่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ร้อยละการกำจัดของเปลือก เมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้น เท่ากับ 83.93 (SD = 0.63), 63.64 (SD = 0.06), 65.40 (SD = 0.18), 57.07 (SD = 0.55) และ63.53 (SD = 0.44) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมากขึ้น ปริมาณการดูดซับโลหะหนักสูงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง หรือคงที่ ซึ่งเป็นเพราะเกิดการอิ่มตัวของ active site ที่สามารถดูดซับโลหะหนักบนพื้นที่ผิววัสดุดูดซับ (Volesky และ Holan ,1995) และเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีเพิ่มมากขึ้น จะไปส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโลเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้สารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ยาก เพราะเมื่อมวลโมเลกุลของน้ำเสียมีขนาดใหญ่จะเกิดการขัดขวางการเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับน้อยลง ส่งผลให้ร้อยการกำจัดต่ำ ดังภาพที่ 18

2. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อการดูดซับทองแดง

ทำการทดลองแปรผันความเข้มข้นของสารละลายโดยนำสารละลายทองแดงไอออนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 25 50 75 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัม โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



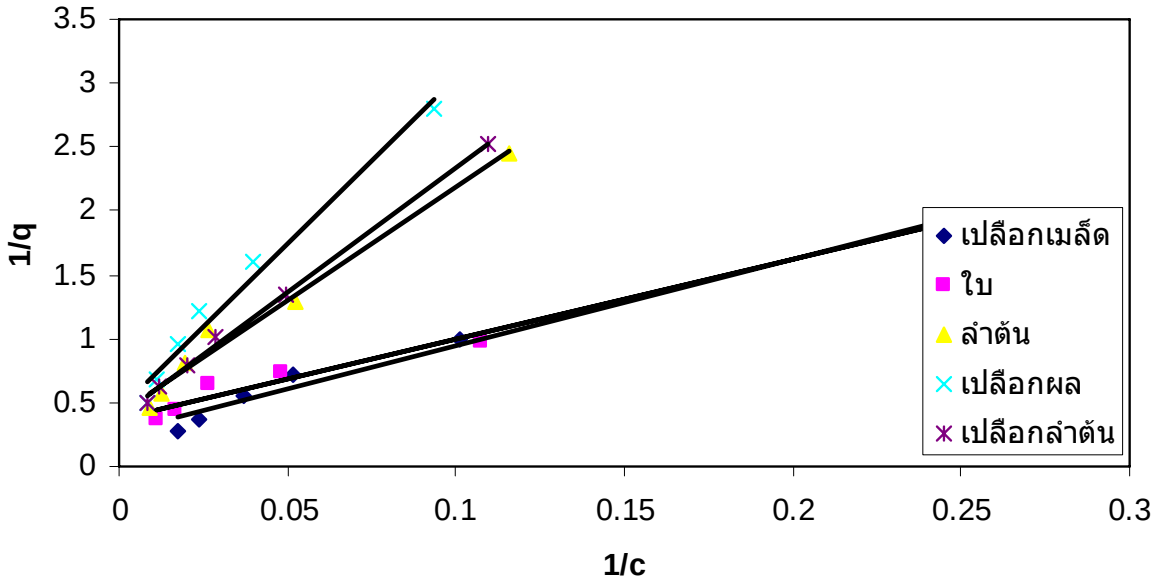
ภาพที่ 19 ความสามารถของสบู่ดำในการดูดซับทองแดงที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ

จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารละลายทองแดงไอออนที่มีค่าความเข้มข้นต่ำมีร้อยละการกำจัดโลหะหนักทองแดงสูง และถ้าความเข้มข้นของสารละลายสูง ร้อยละการกำจัดก็จะต่ำ ค่าความเข้มข้นสองสารละลายทองแดงที่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตรจะให้ร้อยละการกำจัดของเปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้น เท่ากับ 84.71 (SD = 0.04), 84.67 (SD = 0.13), 59.36 (SD = 0.24), 65.08 (SD = 0.45) และ64.96 (SD = 0.27) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองแดงเพิ่มมากขึ้นจะไปส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโลเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้สารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ยาก เพราะเมื่อมวลโมเลกุลของน้ำเสียมีขนาดใหญ่จะเกิดการขัดขวางการเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับน้อยลง ส่งผลให้ร้อยการกำจัดต่ำ ดังภาพที่ 19

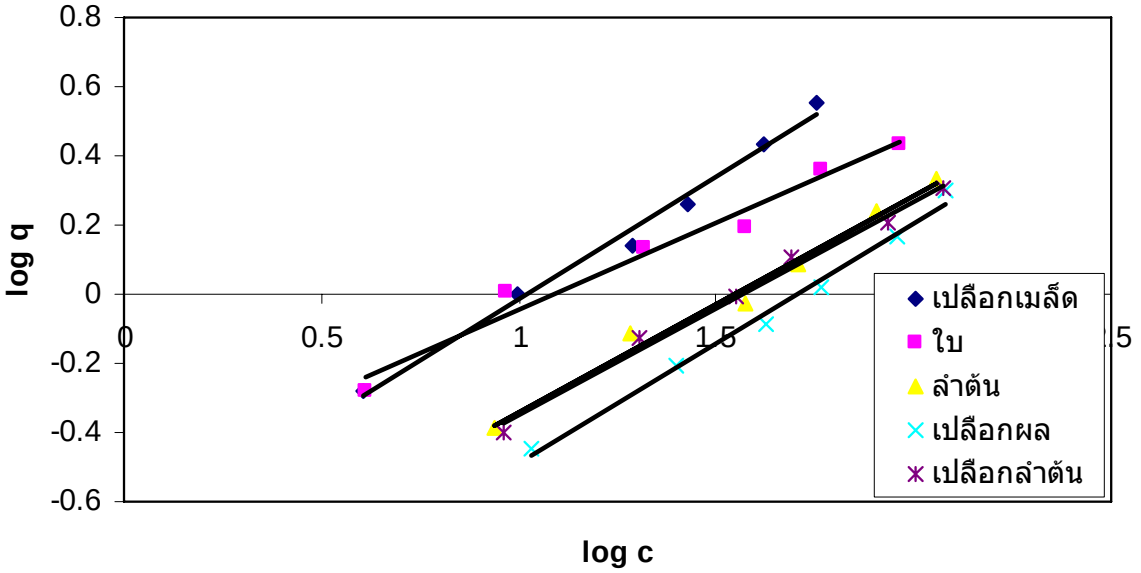
ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟลุนดริชและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ของสังกะสีและทองแดง

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับของสังกะสี

เมื่อนำข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ (ภาคผนวกที่ ก 13) มาพลอตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ดังแสดงในภาพที่ 18 และเมื่อพลอตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดริช ดังแสดงในภาพที่ 19 ดังนั้นคำนวณหาค่าความสามรถในการดูดซับตามรูปแบบของแต่ละสมการ ซึ่งข้อมูลดังแสดงในตาราง 1



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในสังกะสี



ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดริชในสังกะสี

ตารางที่ 4 ค่าการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของการดูดซับสังกะสี

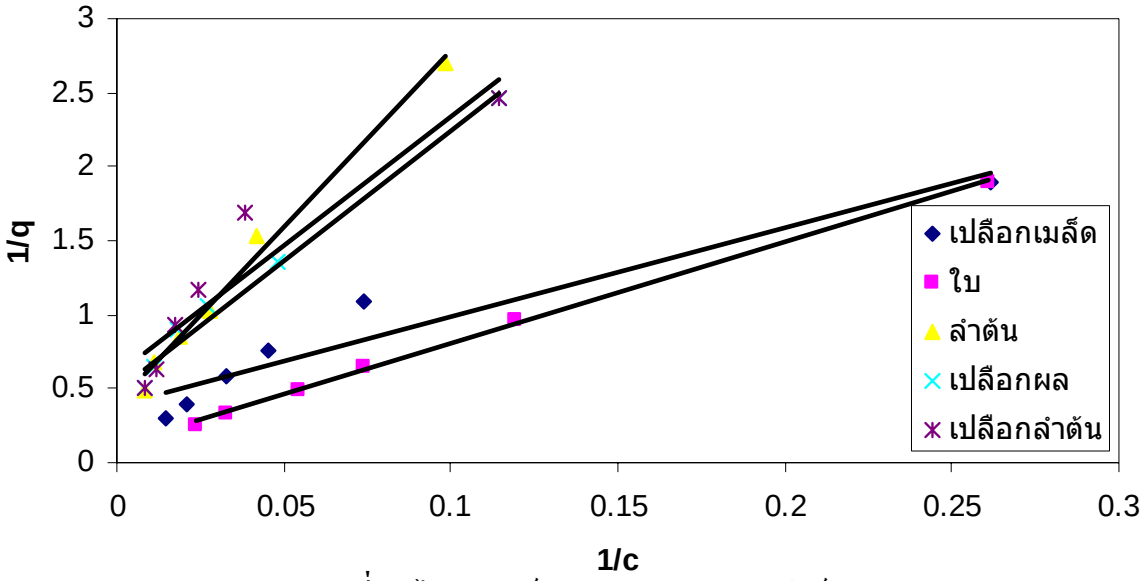
	แลงเมียร์		ฟรุนดริช	
	q_m	r^2	1/n	r^2
สังกะสี				
เปลือกเมล็ด	3.80	0.9825	0.71	0.9891
ใบ	2.69	0.9850	0.50	0.9720
ลำต้น	2.39	0.9798	0.63	0.9837
เปลือกผล	2.18	0.9790	0.69	0.9893
เปลือกลำต้น	2.57	0.9968	0.62	0.9907

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (r^2)ของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์สมการของฟรุนดริช พบว่าค่าการดูดซับสังกะสีของ เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้น ลักษณะกราฟมีการสอดคล้องทั้งสมการของแลงเมียร์และสมการของฟรุนดริช ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Chakravarty(2007) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักสังกะสีด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์คุณภาพต่ำ และการศึกษาของศรินทิพย์(2550) ทำการศึกษาเรื่องการกำจัดและการคืนสภาพของสังกะสีและแคดเมียมในสารละลายด้วยเนื้อไม้มะละกอ ซึ่งในสมการของแลงเมียร์ ใช้ค่า q_m บอกถึงปริมาณตัวถูกดูดต่อปริมาณตัวดูดซับที่จัดเรียงตังเพียงชั้น

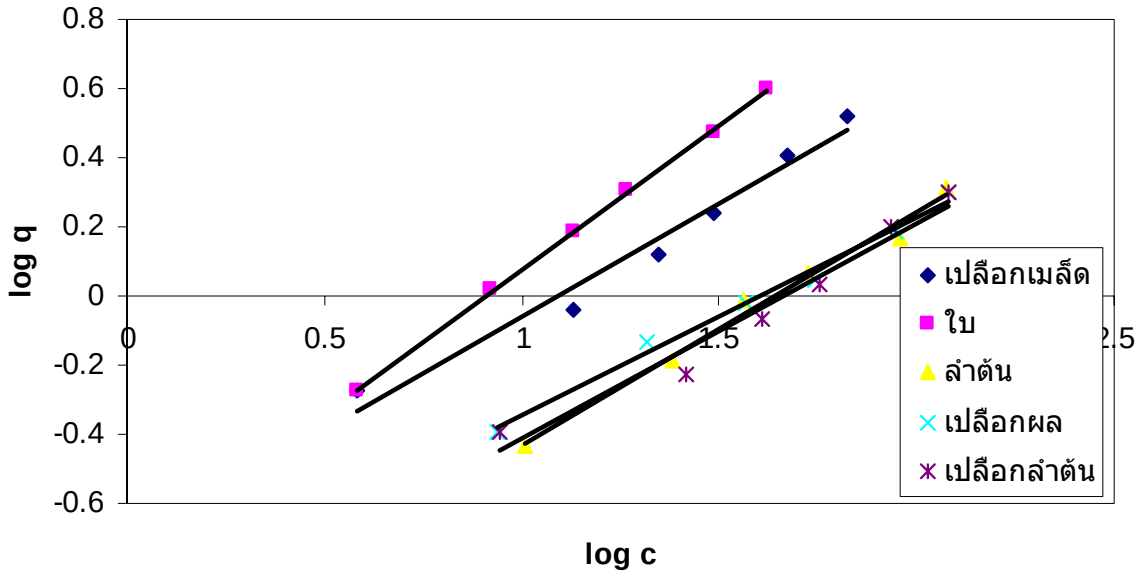
เดียวบนพื้นที่ตัวดูดซับ จากการพบว่า ในเปลือกเมล็ดมีค่ามากที่สุด คือ 3.80 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือใบ เท่ากับ 2.69 มิลลิกรัมต่อกรัม และสมการของฟรุนดริช เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (r^2) ซึ่งมีตำแหน่งการดูดซับแบบทับซ้อนกันได้ พบว่า ค่า 1/n ของตัวดูดซับจากสบู่ดำมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าพื้นที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจากสบู่ดำมีปริมาณจำกัด ดังนั้นการดูดซับสังกะสีด้วย เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผลและเปลือกลำต้นของสบู่ดำเป็นการดูดซับทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดริช

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดง

เมื่อนำข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ (ภาคผนวกที่ ก 14) มาพลอตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และไอโซเทอร์มกาดูดซับของฟรุนดริชในการดูดซับทองแดงไอออน ดังนั้นคำนวณ หาค่าความสามรถในการดูดซับตามรูปแบบของแต่ละสมการซึ่งข้อมูลดังแสดงในตาราง 5



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในทองแดง



ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดริชในทองแดง

ตารางที่ 5 ค่าการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของการดูดซับทองแดง

	แลงเมียร์		ฟรุนดริช	
	q_m	r^2	1/n	r^2
ทองแดง				
เปลือกเมล็ด	2.60	0.9230	0.7107	0.9712
ใบ	8.47	0.9986	0.8382	0.9996
ลำต้น	2.55	0.9890	0.6714	0.9878
เปลือกผล	2.04	0.9855	0.5768	0.9902
เปลือกลำต้น	1.65	0.8905	0.6234	0.9623

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (r^2) ของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์สมการของฟรุนดริช พบว่าค่าการดูดซับสังกะสีของ เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้น ลักษณะกราฟมีการสอดคล้องทั้งสมการของแลงเมียร์และสมการของฟรุนดริช ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Osvaldo และคณะ(2006) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ด้วยกากชานอ้อยและกากชานอ้อยที่ปรับสภาพทางเคมี ซึ่งในสมการของแลงเมียร์ ใช้ค่า q_m บอกถึงปริมาณตัวถูกดูดต่อปริมาณตัวดูดซับที่จัดเรียงตังเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ตัวดูดซับ จากการพบว่า ในใบมีค่ามากที่สุด คือ 8.47 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมา

คือเปลือกเมล็ด เท่ากับ 2.60 มิลลิกรัมต่อกรัม และสมการของฟรุนดริช เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (r^2) ซึ่งมีตำแหน่งการดูดซับแบบทับซ้อนกันได้ พบว่า ค่า 1/n ของตัวดูดซับจากสบู่ดำมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าพื้นที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจากสบู่ดำมีปริมาณจำกัดและจากการทดลองพบว่า ค่า 1/n ของใบมากกว่า เปลือกเมล็ด มากกว่าลำต้น สรุปได้ว่า ใบมีความสามารถดูดซับทองแดงได้ดีกว่า เปลือกเมล็ด ดีกว่าลำต้น ดังนั้นการดูดซับทองแดงของสบู่ดำเป็นการดูดซับทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดริช

การทดสอบน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ตารางที่ 6 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

pH	COD	ความเข้มข้นสังกะสี(mg/l)	ความเข้มข้นทองแดง(mg/l)
8.50	82.35	74.58	112.54

ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังกะสีไอออนจากโรงงานชุบโลหะโดยเจือจางน้ำเสียให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 โดยใช้ตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัม โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยเวลาการปั่นกวน 90 นาที ระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 7 การกำจัดโลหะหนักสังกะสีและทองแดงจากโรงงานชุบโลหะ

พารามิเตอร์	สังกะสี			ทองแดง		
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	ร้อยละการกำจัด	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	ร้อยละการกำจัด
เปลือกเมล็ด						
pH	5.01	7.21	-	4.00	7.17	-
ปริมาณโลหะหนัก	49.25	13.87	71.84	48.58	15.14	68.83
ใบ						
pH	5.01	6.85	-	4.00	6.80	-
ปริมาณโลหะหนัก	49.25	14.29	70.98	48.58	11.38	76.57

ตารางที่ 7 (ต่อ)

พารามิเตอร์	สังกะสี			ทองแดง		
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	ร้อยละการกำจัด	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	ร้อยละการกำจัด
ลำต้น						
pH	5.01	6.16	-	4.00	5.97	-
ปริมาณโลหะหนัก	49.25	22.30	54.73	48.58	27.16	44.10
เปลือกผล						
pH	5.01	6.56	-	4.00	6.85	-
ปริมาณโลหะหนัก	49.25	26.02	47.17	48.58	25.98	46.52
เปลือกลำต้น						
pH	5.01	6.82	-	4.00	6.81	-
ปริมาณโลหะหนัก	49.25	23.51	52.26	48.58	28.91	40.50

หมายเหตุ: ปริมาณโลหะหนักทั้งก่อนและหลังการดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองพบว่า พีเอชของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่วัดได้ เท่ากับ 8.51 ดังตารางที่ 6 และจากทดลองหาประสิทธิภาพของสบู่ดำกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะดังตารางที่ 7 พบว่า

สารละลายสังกะสี จากการทดลองพบว่า เมื่อเจือจางน้ำเสียให้มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 49.25 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลือกเมล็ดและใบมีความสามารถดูดซับโลหะหนักสังกะสีใกล้เคียงกัน เท่ากับ 71.84 และ 70.98 % ตามลำดับ

สารละลายทองแดง พบว่า เมื่อเจือจางน้ำเสียให้มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 48.58 มิลลิกรัมต่อลิตร ใบสามารถดูดซับทองแดงได้ดีกว่าเปลือกเมล็ด เท่ากับ 76.57 และ 68.83 % ตามลำดับ

จะเห็นกว่าเมื่อเจือจางน้ำทิ้งให้อยู่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นความสารถของสบู่ดำในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี และทองแดงได้แต่ยังเกินค่ามาตรฐานปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจาก

โรงงานอุตสาหกรรม (สังกะสีไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและทองแดงไม่มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการน้ำเสียหลังการกำจัดไม่เกินค่ามาตรฐานจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเจือจางน้ำเสียมให้มีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชที่ได้หลังการดูดซับซับอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พีเอชเท่ากับ 5.5-9 และจากการศึกษาพบว่าเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากน้ำเสียสังเคราะห์มาใช้กับน้ำเสียจริง พบว่าค่าร้อยละการดูดซับลดลง เนื่องจากในน้ำเสียมีสารปนเปื้อนต่างๆ เช่นสารแขวน ลอย ไอออนโลหะหนักอื่นๆ เป็นต้น ที่เป็นการรบกวนกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น

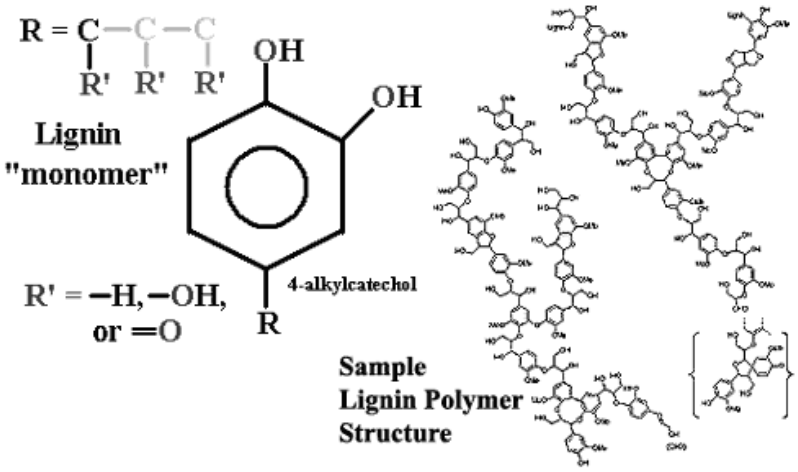
จากการทดลองทั้งจากสารละลายที่เตรียมขึ้นและน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ พบว่า ใบสามารถดูดซับสังกะสีและทองงแดงเท่ากับ 70.98 และ 76.57%และเปลือกเมล็ดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสังกะสีและทองแดงสูงที่สุด เท่ากับ 71.84 และ 68.83 % จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของใบและเปลือกเมล็ดมีเซลลูโลสใกล้เคียงกันในทุกส่วน และปริมาณลิกนิน และสารประกอบฟีนอลลิกรวมมากกว่าส่วนอื่นของสบู่ดำ ดังตาราง ที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของสบู่ดำ แสดงในรูปของ%

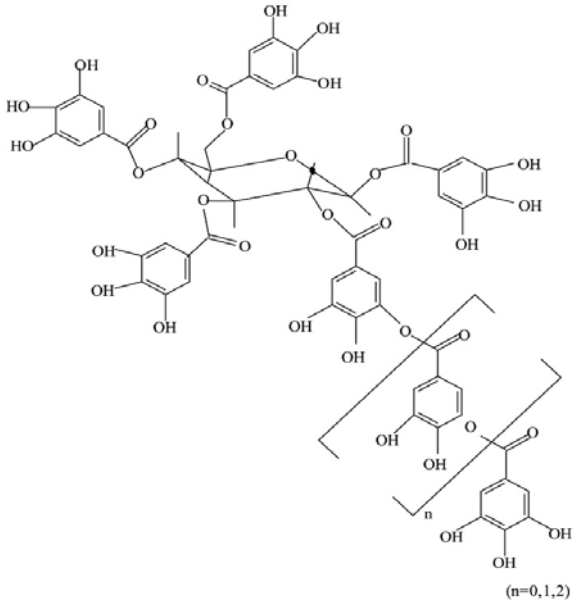
สบู่ดำ	องค์ประกอบทางเคมี				
	สารแทรก	ลิกนิน	โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	total phenolic compound
เปลือกผล	8.83	20.565	66.875	57.53	0.1921
เปลือกเมล็ด	3.31	39.79	56.65	56.055	1.4352
เปลือกลำต้น	7.93	13.93	63.01	57.445	0.3846
ลำต้น	2.915	23.33	72.255	54.185	0.3035
ใบ	19.285	36.01	53.505	50.495	1.5482

ใบและเปลือกเมล็ดมีปริมาณลิกนิน เท่ากับ 36.01และ 39.79% ปริมาณสารประกอบฟีนอลซึ่งเป็นตัวบอกถึงปริมาณสารแทนนินที่มีอยู่ในพืชพบว่า ใบ มีปริมาณประกอบฟีนอล เท่ากับ 1.5482 และในเปลือกเมล็ด เท่ากับ 1.4352 % และใบมีปริมาณสารแทรกมากที่สุด คือ 19.285 % ซึ่งโครงสร้างของลิกนินและแทนนินนั้นมี หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลซึ่งมีส่วนในการเกิด

ปฏิกิริยามากที่สุด ดังภาพที่ 24 และ 25 หมู่ไฮดรอกซิลมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีประจุลบซึ่งสามารถจับกับประจุบวกของไอออนขิงโลหะหนัก (นิธิรัชต์, 2545)



ภาพที่ 24 โครงสร้างของลิกนิน



ภาพที่ 25 โครงสร้างของแทนนิน

และจากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของส่วนต่างๆของสบู่ดำ(ดังภาคผนวกที่ ค1- ค5) พบว่าที่กำลังขยาย 1000 เท่า มีลักษณะพื้นที่ผิวของใบนั้น พื้นที่ผิวขรุขระไม่เรียบและพื้นที่ผิวมีรูพรุนรูเล็กและลึก ภาคผนวกที่ ค 2 ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับทำให้ใบสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าส่วนอื่นเมื่อเทียบกับลักษณะของพื้นที่ผิวของส่วนต่างๆของสบู่ดำด้วย และการดูดซับโลหะ

หนักของเปลือกเมล็ดและใบสบู่ดำ พบว่า ที่ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ 0.5 กรัม เปลือกเมล็ดสามารถดูดซับได้ดีกว่าใบ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เพิ่มขึ้น เป็น 2 กรัม พบว่าใบสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าเปลือกเมล็ด อาจกล่าวได้ว่าการดูดซับของใบใช้พื้นที่ผิวในการดูดซับโลหะหนัก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของสบู่ดำ ซึ่งได้แก่ เปลือกเมล็ด ใบ ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้นในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบตช์ ได้แก่ พีเอช (pH)ระยะเวลาปั่นกวน (equilibrium time หรือ shaking time) ระยะเวลาสัมผัส (contact time) ขนาดของตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับและปริมาณโลหะไอออนเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)และฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สารละลายสังกะสี ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักสังกะสี พบว่า พีเอชที่เหมาะสม เท่ากับ 5 ระยะเวลาการสัมผัส เท่ากับ 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกวน เท่ากับ 90 นาที ขนาดของตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้ดีที่สุด คือ ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 2 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นร้อยละการกำจัดจะต่ำลง ซึ่งความเข้มข้นที่ให้ค่าการดูดซับสูงที่สุด คือ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าการดูดซับในเปลือกเมล็ดและใบใกล้เคียงกัน เท่ากับ 80.18 และ 81.64 % ตามลำดับ และสอดคล้องทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดริช และค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่อน้ำหนักตัวดูดซับจากสบู่ดำ (q_m) พบว่า เปลือกเมล็ดสามารถดูดซับได้ดีกว่าลำต้นดีกว่าเปลือกลำต้น ลำต้นและเปลือกผลตามลำดับ ทำการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบว่า เปลือกเมล็ดและใบมีร้อยละการดูดซับสูงที่สุดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 71.84 และ 70.98 ตามลำดับ

สารละลายทองแดง ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักสังกะสี พบว่า พีเอชที่เหมาะสม เท่ากับ 4 ระยะเวลาการสัมผัส เท่ากับ 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกวน เท่ากับ 60 นาที ขนาดของตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้ดีที่สุด คือ ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 2 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นร้อยละการกำจัดจะต่ำลง ซึ่งความเข้มข้นที่ให้ค่าการดูดซับสูงที่สุด คือ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าการดูดซับในเปลือกเมล็ดและใบใกล้เคียงกัน เท่ากับ 84.71 และ 84.67 %

ตามลำดับ และสอดคล้องทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดริช และค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่อน้ำหนักตัวดูดซับจากสบู่ดำ (q_m) พบว่า ใบมีความสามารถในการดูดซับดีกว่า เปลือกเมล็ดสามารถดูดซับได้ดีกว่าลำต้นดีกว่าเปลือกลำต้น ลำต้นและเปลือกผลตามลำดับ ทำการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบว่า ใบสามารถดูดซับทองแดงได้ดีกว่าเปลือกเมล็ดและใบมีร้อยละการดูดซับสูงที่สุด เท่ากับ 76.57 รองลงมาคือ เปลือกเมล็ดร้อยละการกำจัด เท่ากับ 68.83

จากการศึกษาลักษณะองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ พบว่า ที่ใบและเปลือกเมล็ดสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีนั้น เนื่องจากมีปริมาณลิกนิน และสารประกอบฟีนอลลิกที่มากกว่าตัวอื่น และใบมีปริมาณสารแทรกมากกว่าส่วนอื่น และพื้นที่ผิวของใบที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่า มีรูเล็ก ลึก จำนวนมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ ซึ่งเป็นไปได้ว่าใบนั้นใช้พื้นที่ผิวที่มีมากเพื่อใช้ในการดูดซับ

ข้อเสนอแนะ

1.ในการศึกษาครั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องการกำจัดสีที่เกิดจากกวัสดุดูดซับ

2. ควรทำการศึกษาแบบต่อเนื่องหรือแบบคอลัมน์และวิธีการแยกโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอน

3. ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ ในการดูดซับโลหะหนัก ที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์

4ควรทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เช่นการปรับสภาพด้วยเบส

5. ควรมีการศึกษาการนำมวลสดมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ใบสดของสบู่ดำ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธิยา ชนะศักดิ์. 2542. **การดูดซับของฟอสเฟตบนถ่านกัมมันต์เคลือบผิว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นภดล แช่มช้อย และปิยบุตร วิเชียรเพริศ. 2546. **การดูดซับโลหะหนักสังกะสีโดยมวลแห้งสาหร่ายหางกระรอก(*Hydrilla verticillata*)**. โครงการวิจัยทางชีววิทยา. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

นิธิรัชต์ สงวนเดือน. 2545. **การบำบัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทางตะวัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัชรา เพ็ชร์พิรุณ. 2531. **ปริมาณโลหะหนักบางชนิดในห่วงโซ่อาหารของปลาหมึกและปลากินเนื้อที่พบบริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดระยอง จันทบุรี ตราด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภานุมาศ พรหมเทศ. 2528. **การดูดซับโลหะหนักโดยกากของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำผลไม้.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ภารดี คะลา. 2541. **ศักยภาพของแม่น้ำเพชรบุรีต่อการรองรับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รังษี เจริญสถาพรและอมรรัชฎ์ คิดใจเดียว. 2548. **การวิจัยและพัฒนาสารสกัดจากพืชเพื่อควบคุมโรคพืช**. รายงานความก้าวหน้างานวิจัยและพัฒนาด้านพืชและเทคโนโลยีการเกษตรปี 2548 ไตรมาสที่ 2 (มกราคม-มีนาคม 2548) เล่ม 2 8-10 มิถุนายน 2548 ณ กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

รัตนา มหาชัย. 2542. **การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของโลหะหนักบางตัวบนวัสดุดูดซับเถ้าแกลบ**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วรพันธ์ แก้วอุดม. 2532 . **การลดปริมาณโลหะหนักในน้ำ ดินตะกอน ผักตบชวาในบึงมักกะสัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศรินทิพย์ ผดุงสันติกุล. 2550**. การกำจัดและการคืนสภาพของสังกะสีและแคดเมียม ในสารละลายด้วยเนื้อไม้มะละกอ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิโรรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร์. 2543. **การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิทธิชัย ตันธนะสฤษดิ์. 2528. **พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม**. โครงการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 .ม.ป.ป. **พิษสังกะสี**. เอกสารโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. จังหวัดพิษณุโลก. แหล่งที่มา: www.dcp9.ddc.moph.go.th**.** วันที่ 20 มีนาคม 2550.

อภิชาต โพธิ์สุ. 2536. **ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในน้ำ และดินตะกอนจาก ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำเลย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

แอนนา สารมณีรัตน์ พิทยาภรณ์ สุภรพัฒน์ สุปราณี งานประสิทธิ แสงแข สาวานิช สุขุม โชติช่วง มณีรัตน์ ฉัตรพงศ์ ขาลลาและเอ็จ สโรยล. 2547. **โครงการการรวบรวมพันธุ์สบู่ดำเพื่อใช้เป็นเชื้อพันธุกรรม** . รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปีงบประมาณ 2545 และ 2546.

อรพินท์ จันทร์ผ่องแสง. 2550. **ปริมาณการสะสมของโลหะหนักบางชนิดตามเนื้อเยื่อต่างๆ ของปลาทะเล ในเนื้อสัตว์ทะเลบางชนิดในอ่าวไทยซึ่งมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

.

Agaceta, L.M., P.U. Dumag, J.A. Atolos and F.C. Bandiola. 1981. Studies on the control of snail vector of fasciolasis. Molluscicidal activity of some Indigenous plants. National Science Development Board (NSDB). **Technology J**. 6 (2): 30-34.

Ajmal ,H.,A.H.Khan.,S.Ahmad and A. Ahmad . 1998. Role of Sawdust in the Removal of Copper (II) from Industrial Wastes. **Journal of Wat.Res.** 32(10): 3085-3091.

Apone, C. Hernandez. 1978. **Estudio de *Jatropha curcas* L. como recurso biotico.** Diploma thesis. University Veracruz, Yalapa-Insiquez, Veracruz, Mexico.

Berman. 1980. **Heavy Metal Analysis in the River Tigris.** Copper in toxic Metals and Their Analysis Chapter 12. Available Source: http://gis.esri.com/geography. wssd.project2002.1289project.pdf, April 10, 2007.

Bidwell,A.M. and R.H. Dowdy . 1987. Cadmium and zinc availability to corn following termnation of ssewage sludge application. **Journal of Environ.Qual**.19 (4): 438-442.

Bruland, K.W., Knauer, G.A. and Martin, J.H. 1978. Zinc in North-east Pacific Water. **Nature J**. 271: 741-743.

Chakravarty. S., S Bhathacharee. et al. 2007. Adsorption of zinc form aqueous solution using chemically treated newspaper pulp. **Bioresource Technology J**. 98: 3136-3141.

Cheremisnoff, P.N. and F. Ellerbusch. 1978. **Carbon Adsorption Handbook.** Ann Arbor Science Publishers, Michigan.

Davies, N.T. 1980. Studies on the adsorption of zinc by rat intestine Br**. Journal of Nutri**. 43: 189-203.

Diallo, N. 1994. **Trees and hedges in the agricultural systems in Faranah prefecture.** Flamboyant 31: 24-29.

Duke, J.A. 1985. **CRC Handbook of Medicinal Herbs**. CRC Press Inc, Boca Raton.

Eisenberg, M. and J.J. Topping. 1980. Trace metal residences in shellfish from Maryland water. **Journal of Environ.Sci. Health**. 19(7): 649-671.

Enk, M.D. and B.J.Mathis . 1977. Distribution of Cadmium and Lead in Stream Ecosystem. **Hydrobiological J.** 52: 153-158.

Faust, S.D. and O.M. Aly. 1998. **Chemistry of Water Treatment.** 2 nd ed. Ann Arbor Press, Inc. Michigan, United State of America.

Frenet,M. 1981 . The Dristribution of Mercury , Cadmium and Lead between Water and Suspended Matter in the Loire Estuary as a Function of the Hydrological Regime. **Water Residue J.** 15: 1345-1350.

Gand & Weixing. 1998. Sunflower stalks as adsorbents for the nemoval of metal ions from wastewater. **Industrial & Engineering Chemisty Research.** 37(1): 1324-1328.

Gauss, J.D., P.E. Woods. R.W. Winner and J.H.Skillings . 1985. Acute toxicity of copper to three life stages of chironnomous tentans as affected by water hardness alkalinity **Environmental Pollutance Ser**. A37: 149-157.

Goyer, R.A. 1996. **Toxic Effects of Metals**. In C.D. Klaassen (ed.).Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 5th McGraw-Hill, New York.

Gübitz, G.M., M. Mittelbach, and M. Trabi. 1997. **Biofuels and Industrial Products from *Jatropha curcas.*** Developed from the Symposium Jatropha Managua, Nicaragua February 23-27, 1997.

Harrison,R.M. and D.D.H. Laxen . 1981. **Lead Pollution causes and Control**. The University Press, Cambridge.

Hodgson, J.F. 1963. **Chemistry of Micronutrient Elements in Soils**. In advances in Agronomy 15, American Society of Agronomy**,** Madison, Wisconsin.

Howarth, R.S. and J.B. Sprague . 1978. Copper lethality to rainbow trout in waters of various hardness and pH. **Wet. Res.** 12: 455-462.

Igbal, M. and Edyvean. R. G. J. 2004. Biosorption of lead Copper and zinc on loofg sponge immobilized biomass of *P. Chrysosporium*. **Minerals Engineering J**.17(2): 217-223.

Joker, D. and J. Jepen. 2003. ***Jatropha curcas* L. Seed Leaflet No.83**. Danida Forest Seed Center, Denmark.

Kalyani. S. et al. 2004. Removal of nickel from aqueous solution using marine macroalgae as the gorbing biomass. **Chemosphere J**. 57(9): 1225-1229.

King, P., P. Srinivas,Y.Prasanna Kumar and V.S.R.K.Prasad . 2006. Sorption of Copper(II) ion from aqueous solution by *Tectona grandis* i.f.(teak leaves power). **Journal of Hazardous Materials.** 43: 345-351.

Lele, S. 2005. **The cultivation of *Jatropha cucas***. Available Source: http:// www.svlele.com/ jatropha_plant.htm. april 10,2007.

McNeely, R.N., V.P. Neimanis and L.Dwyer . 1979 . **Water Quality Source Book a Guide to Water Quality Parameter**. Inlend Water. Directorate, Water Quality Branch,Ottawa.

Mount, D.I. 1968. Chronc Toxicity of copper to fathead monows (Pimephales promelas Refinesque).**Marine Pollution J.** 11: 93-101.

Nriagu, J.O. 1980. **Zinc in the Atmosphere**. In J.O. Nriagu (ed.). Zinc in the Environment Part I: Ecological Cycling. John Wiley & Sons, New York.

Osvaldo Jr. et al. 2006. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. **Bioresource Technology J**. 98: 1291-1297.

Oudhia, P. 2003. ***Jatropha curcas*** . Available Source: http://www.botanical.com/site/column-poudhia/44- jatropha.html. April 10, 2007.

Ozer,A.,D. Ozer and A.Ozer. 2003. Theadsorption of copper(II) on to dehydrated wheat bran (DWB): determination of the equilibrium and thermodynamic parameters **Journal of Process Biochemistry**. 39: 2183-2191.

Reilly,C . 1980 . **Metal Contamination of Food.** App;ied Science Publishers Ltd.,London.

Sadakorn, J. 1982. **Report on Collection of *Jatropha curcas* L.** (Saboo-dam) in the North of Thailand.

Saeed ,A ., M.Waheed Akhter and M.Iqbal. 2005. Removel and recovery of heavy merals from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. **Separation Purification Technology J**. 45: 25-31

Saeed. A., Iqbal. M. 2005. Removal and recovery of lead from single and multimetaleed, Cu, Ni, Zn) Solution by crop Milling waste (black gram husk). **Journal of Hazardeus Maerials.** 117(1): 65-73.

Singh,D.B. et al. 1998. Studies on the Cd(II) removal from water by adsorption. **Journal of hazardous materials**, 60(1): 29-40.

Shraboni ,S. Sujoy K. Tapan S. and Gopal C. 2008. Adsorption behavior of copper ions on *Mucor rouxii* biomass through microscopic and FTIR analysis. **Colloids and Surfaces J**. 63(2008): 138-145.

Vassiliades, G. 1984. Notes sus les proprietes molluscicides de deux Euphorbiacees *Euphorbia tirucalli* et *Jatropha cureas.* Essais en laboratories. Rev. Elev. **Med. Vet**. Pays Trop. 37(1): 32-34.

Vöhringer. 1987. **Untersuchungszeugnis fÜr Futter-mittel**. Land wirtschaftlicheUntersuc-hung and Forschungsanstalt, Bonn.

Volesky, B. 1990. **Biosorption of heavy metals**. Boca Roton. CRC press.

Wood, J. M. 1975. **Metabolic Cycles for Toxic Elements in the Environment**. A study of Kinetic and Machanism.In P.Q.Krenel (ed). Heavy metals in the Aquatic Environment. Pergaman Press. Oxford.

Zhou. J. L. and Kiff. R. J. (1991). The uptake of copper from aqueous solution by immobilized fungal biomass. **Chemical Technology and biotechnology J.** 52: 317-330.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
2	1	0.5029	34.52	30.21	1.50	0.37
	2	0.5044	35.25			
	3	0.5012	34.92			
3		0.5045	21.21	59.29	2.95	0.86
	2	0.5013	19.50			
	3	0.5032	20.36			
4	1	0.5018	19.37	61.39	3.06	0.46
	2	0.5025	19.73			
	3	0.5016	18.81			
5	1	0.5014	18.39	63.61	3.16	0.74
	2	0.5052	18.81			
	3	0.5036	17.38			
6	1	0.5034	18.52	62.55	3.11	0.37
	2	0.5019	18.50			
	3	0.5027	19.15			
6.6	1	0.5034	20.48	61.15	3.04	0.97
	2	0.5032	18.56			
	3	0.5031	19.24			
ใบ						
2	1	0.5022	33.87	31.50	1.57	0.58
	2	0.5021	33.96			
	3	0.5029	34.92			

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
3		0.5017	25.67	48.94	2.44	0.36
	2	0.5024	25.80			
	3	0.5018	25.12			
4	1	0.5034	24.94	49.99	2.49	0.52
	2	0.5018	24.52			
	3	0.5022	25.56			
5	1	0.5021	20.95	58.37	2.91	0.71
	2	0.5011	20.05			
	3	0.5021	21.45			
6	1	0.5011	25.57	49.38	2.46	0.26
	2	0.5048	25.05			
	3	0.5016	25.31			
6.6	1	0.5039	24.79	50.64	2.52	0.18
	2	0.5016	24.47			
	3	0.5028	24.78			
ลำต้น						
2	1	0.5016	46.31	8.33	0.42	0.41
	2	0.5011	45.58			
	3	0.5014	45.62			
3		0.5039	32.53	36.74	1.83	0.78
	2	0.5009	31.25			
	3	0.5005	31.11			
4	1	0.5028	31.54	37.85	1.89	0.48
	2	0.5017	30.58			
	3	0.5015	31.10			
5	1	0.5036	25.32	48.41	2.40	0.90

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
	2	0.5032	25.24			
	3	0.5043	26.83			
6	1	0.5029	29.54	41.15	2.04	0.33
	2	0.5072	29.68			
	3	0.5060	29.05			
6.6	1	0.5032	29.04	43.71	2.17	0.79
	2	0.5031	27.56			
	3	0.5034	27.84			
เปลือกผล						
2	1	0.5016	31.28	36.89	1.84	0.45
	2	0.5006	31.31			
	3	0.5032	32.08			
3		0.5017	30.35	38.32	1.91	0.95
	2	0.5025	30.23			
	3	0.5023	31.94			
4	1	0.5035	30.28	40.67	2.02	0.60
	2	0.5017	29.08			
	3	0.5018	29.64			
5	1	0.5030	27.01	45.47	2.26	0.56
	2	0.5040	27.90			
	3	0.5040	26.88			
6	1	0.5021	28.81	42.84	2.13	0.63
	2	0.5049	27.87			
	3	0.5015	29.06			
6.6	1	0.5022	29.69	42.68	2.12	0.90
	2	0.5015	28.01			

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
	3	0.5038	28.28			
เปลือกลำต้น						
2	1	0.5015	26.87	47.79	2.38	0.8
	2	0.5016	25.30			
	3	0.5028	26.15			
3		0.5002	26.25	47.45	2.37	0.60
	2	0.5014	25.69			
	3	0.5011	26.89			
4	1	0.5057	27.36	46.87	2.33	0.7
	2	0.5031	26.21			
	3	0.5020	26.13			
5	1	0.5020	24.58	49.70	2.47	0.61
	2	0.5024	25.08			
	3	0.5051	25.79			
6	1	0.5009	28.96	44.26	2.20	0.9
	2	0.5005	27.32			
	3	0.5044	27.33			
6.6	1	0.5001	29.65	41.12	2.05	0.4
	2	0.5038	29.69			
	3	0.5021	28.98			

ตารางผนวกที่ ก2 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
2	1	0.5012	19.85	59.64	2.98	0.37
	2	0.5004	20.58			
	3	0.5014	20.11			
3		0.5007	17.45	65.27	3.26	0.53
	2	0.5008	17.85			
	3	0.5012	16.80			
4	1	0.5007	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5002	15.75			
	3	0.5001	15.38			
5	1	0.5003	16.78	66.33	3.31	0.32
	2	0.5007	17.18			
	3	0.5008	16.55			
6	1	0.5003	16.19	66.75	3.33	0.47
	2	0.5002	17.13			
	3	0.5007	16.55			
6.6	1	0.5004	17.80	63.70	3.18	0.64
	2	0.5010	17.76			
	3	0.5001	18.89			
ใบ						
2	1	0.5001	24.37	49.21	2.46	0.92
	2	0.5008	25.68			
	3	0.5004	26.14			
3	1	0.5012	19.47	60.4	3.01	0.65

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด (mg/g)	SD
	2	0.5008	20.55			
	3	0.5009	19.38			
	2	0.5002	17.13			
4	1	0.5001	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5005	16.51			
	3	0.5008	16.02			
5	1	0.5005	18.51	63.00	3.15	0.47
	2	0.5002	18.03			
	3	0.5006	18.96			
6	1	0.5011	17.70	63.35	3.16	0.55
	2	0.5005	18.72			
	3	0.5001	18.55			
6.6	1	0.5005	19.85	59.78	2.99	0.38
	2	0.5004	19.94			
	3	0.5001	20.54			
ลำต้น						
2	1	0.5011	33.92	31.87	1.59	0.42
	2	0.5005	34.54			
	3	0.5006	33.73			
3	1	0.5012	30.57	39.61	1.98	0.35
	2	0.5012	29.88			
	3	0.5004	30.14			
4	1	0.5003	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5006	27.92			
	3	0.5001	27.52			

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
5	1	0.5004	27.95	44.37	2.22	0.42
	2	0.5006	27.35			
	3	0.5012	28.15			
6	1	0.5005	28.45	42.77	2.14	0.57
	2	0.5014	28.14			
	3	0.5003	29.25			
6.6	1	0.5003	29.96	39.45	1.97	0.28
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5001	30.48			
เปลือกผล						
2	1	0.5009	34.14	32.36	1.62	0.30
	2	0.5003	33.77			
	3	0.5004	33.55			
3		0.5007	30.78	39.43	1.97	0.47
	2	0.5006	29.85			
	3	0.5009	30.22			
4	1	0.5003	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5008	28.64			
	3	0.5002	29.11			
5	1	0.5003	28.43	42.21	2.11	0.43
	2	0.5003	28.98			
	3	0.5004	29.28			
6	1	0.5003	29.90	39.35	1.97	0.45
	2	0.5007	30.80			
	3	0.5009	30.27			

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

pH	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
6.6	1	0.5010	29.58	41.09	2.05	0.96
	2	0.5015	28.44			
	3	0.5038	30.35			
เปลือกลำต้น						
2	1	0.5009	31.68	34.95	1.74	0.88
	2	0.5012	33.43			
	3	0.5005	32.46			
3		0.5006	32.12	35.67	1.78	0.39
	2	0.5002	31.80			
	3	0.5011	32.58			
4	1	0.5006	30.17	39.66	1.98	0.21
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5006	29.96			
5	1	0.5003	33.94	32.25	1.61	0.32
	2	0.5004	33.53			
	3	0.5003	34.16			
6	1	0.5003	34.44	30.39	1.52	0.51
	2	0.5006	34.58			
	3	0.5001	35.39			
6.6	1	0.5012	37.66	25.50	1.27	0.37
	2	0.5011	36.95			
	3	0.5006	37.14			

ตารางผนวกที่ ก3 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
30	1	0.5017	21.02	58.33	2.91	0.19
	2	0.5016	20.85			
	3	0.5014	20.64			
60	1	0.5014	18.40	63.61	3.16	0.73
	2	0.5052	18.81			
	3	0.5036	17.38			
90	1	0.5013	18.59	63.11	3.15	0.16
	2	0.5013	18.28			
	3	0.5015	18.47			
120	1	0.5016	18.47	62.76	3.13	0.39
	2	0.5017	18.33			
	3	0.5014	19.06			
150	1	0.5017	18.71	62.44	3.11	0.21
	2	0.5014	18.61			
	3	0.5016	19.02			
180	1	0.5014	18.72	62.88	3.14	0.31
	2	0.5015	18.2			
	3	0.5014	18.76			
ใบ						
30	1	0.5017	25.53	48.91	2.44	0.43
	2	0.5015	25.12			
	3	0.5013	25.98			

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
60	1	0.5021	20.95	58.37	2.91	0.70
	2	0.5011	20.06			
	3	0.5021	21.45			
90	1	0.5014	21.23	57.89	2.89	0.18
	2	0.5014	20.87			
	3	0.5015	21.07			
120	1	0.5014	22.09	56.02	2.79	0.22
	2	0.5016	21.74			
	3	0.5017	22.14			
150	1	0.5013	21.19	57.65	2.87	0.19
	2	0.5015	21.35			
	3	0.5014	20.98			
180	1	0.5014	22.46	55.65	2.77	0.37
	2	0.5016	21.76			
	3	0.5018	22.31			
ลำต้น						
30	1	0.5016	29.94	40.35	2.01	0.16
	2	0.5017	29.90			
	3	0.5015	29.64			
60	1	0.5036	25.33	48.40	2.40	0.90
	2	0.5032	25.24			
	3	0.5043	26.83			
90	1	0.5015	25.89	48.03	2.39	0.10
	2	0.5014	26.09			
	3	0.5016	25.98			

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
120	1	0.5015	26.12	47.57	2.37	0.20
	2	0.5014	26.44			
	3	0.5016	26.08			
150	1	0.5017	26.58	47.01	2.34	0.30
	2	0.5015	26.16			
	3	0.5014	26.75			
180	1	0.5015	27.42	45.96	2.29	0.39
	2	0.5014	27.00			
	3	0.5014	26.64			
เปลือกผล						
30	1	0.5014	31.76	36.07	1.80	0.21
	2	0.5013	32.17			
	3	0.5017	31.96			
60	1	0.5003	27.01	45.47	2.26	0.55
	2	0.5004	27.90			
	3	0.5004	26.88			
90	1	0.5014	27.32	44.49	2.22	0.56
	2	0.5013	27.56			
	3	0.5015	28.38			
120	1	0.5016	27.92	44.65	2.23	0.23
	2	0.5016	27.64			
	3	0.5014	27.46			
150	1	0.5015	28.16	44.02	2.19	0.15
	2	0.5014	27.89			
	3	0.5016	27.92			

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
180	1	0.5014	28.54	42.95	2.14	0.04
	2	0.5016	28.48			
	3	0.5018	28.56			
เปลือกลำต้น						
30	1	0.5015	28.76	43.29	2.16	0.36
	2	0.5013	28.06			
	3	0.5015	28.25			
60	1	0.5002	24.58	49.70	2.47	0.61
	2	0.5024	25.08			
	3	0.5051	25.79			
90	1	0.5015	25.90	48.73	2.43	0.31
	2	0.5014	25.29			
	3	0.5016	25.71			
120	1	0.5017	25.93	48.62	2.42	0.30
	2	0.5014	25.78			
	3	0.5015	25.36			
150	1	0.5014	26.27	47.63	2.38	0.18
	2	0.5013	26.30			
	3	0.5015	25.98			
180	1	0.5014	26.47	46.64	2.32	0.25
	2	0.5016	26.96			
	3	0.5017	26.61			

ตารางผนวกที่ ก4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	**ซ้ำที่**	**น้ำหนักตัวอย่าง(g)**	**ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)**	**ร้อยละการกำจัด**	**โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)**	**SD**
เปลือกเมล็ด						
30	1	0.5005	16.82	65.80	3.28	0.39
	2	0.5004	17.54			
	3	0.5014	16.94			
60	1	0.5007	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5002	15.75			
	3	0.5001	15.38			
90	1	0.5001	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5004	15.75			
	3	0.5008	15.38			
120	1	0.5004	15.85	68.53	3.42	0.45
	2	0.5007	16.11			
	3	0.5006	15.24			
150	1	0.5001	16.14	69.00	3.45	0.63
	2	0.5005	14.88			
	3	0.5007	15.48			
180	1	0.5005	14.84	69.54	3.47	0.61
	2	0.5010	14.92			
	3	0.5002	15.93			
ใบ						
30	1	0.5004	18.64	62.73	3.13	0.21
	2	0.5009	18.84			
	3	0.5004	18.43			

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
60	1	0.5001	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5005	16.51			
	3	0.5008	16.02			
90	1	0.5012	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5011	16.51			
	3	0.5001	16.02			
120	1	0.5004	16.32	67.55	3.38	0.34
	2	0.5001	15.85			
	3	0.5005	16.50			
150	1	0.5005	16.37	66.09	3.30	0.71
	2	0.5004	16.75			
	3	0.5003	17.75			
180	1	0.5005	17.87	66.46	3.32	0.98
	2	0.5006	16.46			
	3	0.5004	15.98			
ลำต้น						
30	1	0.5008	30.66	39.17	1.96	0.50
	2	0.5004	30.74			
	3	0.5001	29.84			
60	1	0.5003	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5006	27.92			
	3	0.5001	27.52			
90	1	0.5006	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5004	27.92			
	3	0.5009	27.52			

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
120	1	0.5006	27.96	43.62	2.18	0.48
	2	0.5003	27.87			
	3	0.5007	28.74			
150	1	0.5007	27.69	44.61	2.23	0.75
	2	0.5004	28.44			
	3	0.5002	26.95			
180	1	0.5003	27.85	43.87	2.19	0.34
	2	0.5005	27.88			
	3	0.5006	28.46			
เปลือกผล						
30	1	0.5003	30.55	39.63	1.98	0.32
	2	0.5002	29.95			
	3	0.5007	30.05			
60	1	0.5003	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5008	28.64			
	3	0.5002	29.11			
90	1	0.5004	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5004	28.64			
	3	0.5002	29.11			
120	1	0.5003	28.48	42.23	2.11	0.38
	2	0.5005	29.22			
	3	0.5008	28.96			
150	1	0.5005	28.88	43.29	2.16	0.71
	2	0.5002	28.64			
	3	0.5008	27.55			

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
180	1	0.5009	27.84	43.37	2.16	0.42
	2	0.5009	28.65			
	3	0.5006	28.46			
เปลือกลำต้น						
30	1	0.5010	33.77	32.46	1.62	0.31
	2	0.5005	33.46			
	3	0.5008	34.08			
60	1	0.5006	30.17	39.66	1.98	0.21
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5006	29.96			
90	1	0.5006	30.48	39.18	1.96	0.19
	2	0.5004	30.55			
	3	0.5009	30.20			
120	1	0.5004	30.51	39.09	1.95	0.29
	2	0.5008	30.72			
	3	0.5001	30.14			
150	1	0.5008	29.85	38.96	1.95	0.59
	2	0.5004	30.76			
	3	0.5006	30.95			
180	1	0.5012	30.58	38.60	1.93	0.10
	2	0.5006	30.77			
	3	0.5006	30.75			

ตารางผนวกที่ ก5 ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที

เวลา (นาที)	**ซ้ำที่**	**น้ำหนักตัวอย่าง(g)**	**ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)**	**ร้อยละการกำจัด**	**โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)**	**SD**
เปลือกเมล็ด						
30	1	0.5016	18.33	63.24	3.15	0.12
	2	0.5014	18.29			
	3	0.5017	18.52			
60	1	0.5014	18.40	63.61	3.16	0.73
	2	0.5052	18.81			
	3	0.5036	17.38			
90	1	0.5016	13.80	72.75	3.63	0.27
	2	0.5017	13.32			
	3	0.5014	13.76			
120	1	0.5016	14.14	72.15	3.60	0.19
	2	0.5018	13.78			
	3	0.5017	13.86			
150	1	0.5015	13.43	72.68	3.62	0.22
	2	0.5017	13.86			
	3	0.5014	13.69			
180	1	0.5018	13.39	73.21	3.65	0.25
	2	0.5016	13.15			
	3	0.5017	13.64			
ใบ						
30	1	0.5014	20.75	58.50	2.92	0.04
	2	0.5016	20.79			
	3	0.5017	20.71			

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
60	1	0.5021	20.95	58.37	2.91	0.70
	2	0.5011	20.06			
	3	0.5021	21.45			
90	1	0.5017	17.25	66.61	3.32	0.54
	2	0.5011	16.65			
	3	0.5017	16.18			
120	1	0.5013	17.22	65.26	3.25	0.19
	2	0.5013	17.59			
	3	0.5017	17.30			
150	1	0.5015	17.37	66.00	3.29	0.32
	2	0.5013	16.86			
	3	0.5015	16.77			
180	1	0.5018	16.55	66.65	3.32	0.46
	2	0.5015	16.29			
	3	0.5014	17.18			
ลำต้น						
30	1	0.5014	27.81	45.10	2.25	0.33
	2	0.5013	27.38			
	3	0.5015	27.16			
60	1	0.5036	25.33	48.40	2.40	0.90
	2	0.5032	25.24			
	3	0.5043	26.83			
90	1	0.5017	25.63	49.62	2.47	0.38
	2	0.5018	25.02			
	3	0.5014	24.92			

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
120	1	0.5014	25.12	50.08	2.50	0.14
	2	0.5017	24.84			
	3	0.5014	24.92			
150	1	0.5017	24.61	51.21	2.55	0.34
	2	0.5014	24.01			
	3	0.5017	24.57			
180	1	0.5016	24.16	51.13	2.55	0.42
	2	0.5015	24.22			
	3	0.5016	24.92			
เปลือกผล						
30	1	0.5014	29.02	42.41	2.11	0.19
	2	0.5016	28.70			
	3	0.5014	28.67			
60	1	0.5030	27.01	45.47	2.26	0.55
	2	0.5040	27.90			
	3	0.5040	26.88			
90	1	0.5015	24.23	51.05	2.54	0.26
	2	0.5017	24.74			
	3	0.5016	24.46			
120	1	0.5013	25.22	49.74	2.48	0.37
	2	0.5013	24.72			
	3	0.5018	25.45			
150	1	0.5014	25.55	49.05	2.44	0.41
	2	0.5016	25.04			
	3	0.5015	25.84			

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
180	1	0.5014	25.18	48.85	2.44	0.35
	2	0.5014	25.71			
	3	0.5015	25.83			
เปลือกลำต้น						
30	1	0.5016	25.04	48.60	2.42	0.57
	2	0.5018	26.07			
	3	0.5015	25.99			
60	1	0.5020	24.58	49.70	2.47	0.61
	2	0.5024	25.08			
	3	0.5051	25.79			
90	1	0.5015	21.88	55.87	2.79	0.43
	2	0.5016	21.76			
	3	0.5015	22.55			
120	1	0.5014	22.82	54.32	2.71	0.02
	2	0.5017	22.85			
	3	0.5015	22.85			
150	1	0.5015	21.79	55.46	2.76	0.42
	2	0.5016	22.58			
	3	0.5017	22.44			
180	1	0.5015	22.07	55.64	2.77	0.13
	2	0.5016	22.32			
	3	0.5017	22.15			

ตารางผนวกที่ ก6 ผลของระยะเวลาปั่นกวนที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมที่ขนาดตัวดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที

เวลา (นาที)	**ซ้ำที่**	**น้ำหนักตัวอย่าง(g)**	**ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)**	**ร้อยละการกำจัด**	**โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)**	**SD**
เปลือกเมล็ด						
30	1	0.5005	18.075	62.16	3.11	0.87
	2	0.5003	18.87			
	3	0.5004	19.82			
60	1	0.5007	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5002	15.75			
	3	0.5001	15.38			
90	1	0.5005	16.49	67.41	3.37	0.77
	2	0.5001	16.95			
	3	0.5008	15.44			
120	1	0.5009	15.93	68.26	3.41	0.12
	2	0.5007	15.73			
	3	0.5006	15.95			
150	1	0.5002	15.75	69.42	3.47	0.41
	2	0.5002	14.98			
	3	0.5007	15.14			
180	1	0.5001	15.32	68.62	3.43	0.32
	2	0.5005	15.92			
	3	0.5006	15.83			
ใบ						
30	1	0.5005	20.13	59.06	2.95	0.50
	2	0.5006	20.24			
	3	0.5002	21.04			

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
60	1	0.5001	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5005	16.51			
	3	0.5008	16.02			
90	1	0.5004	15.09	69.9	3.49	0.10
	2	0.5008	14.94			
	3	0.5005	15.12			
120	1	0.5006	14.94	70.11	3.50	0.48
	2	0.5002	15.42			
	3	0.5009	14.47			
150	1	0.5009	14.79	69.70	3.48	0.32
	2	0.5012	15.28			
	3	0.5007	15.38			
180	1	0.5006	15.14	69.31	3.46	0.52
	2	0.5004	14.96			
	3	0.5009	15.94			
ลำต้น						
30	1	0.5006	29.65	40.54	2.02	0.78
	2	0.5007	28.99			
	3	0.5004	30.55			
60	1	0.5003	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5006	27.92			
	3	0.5001	27.52			
90	1	0.5006	28.09	43.75	2.18	0.10
	2	0.5002	28.05			
	3	0.5009	28.24			

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
120	1	0.5007	28.16	43.57	2.18	0.17
	2	0.5004	28.08			
	3	0.5007	28.41			
150	1	0.5002	27.55	43.11	2.15	0.79
	2	0.5008	29.04			
	3	0.5003	28.75			
180	1	0.5003	28.65	42.61	2.13	0.37
	2	0.5006	29.08			
	3	0.5008	28.35			
เปลือกผล						
30	1	0.5006	30.38	38.91	1.94	0.43
	2	0.5002	31.04			
	3	0.5008	30.22			
60	1	0.5003	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5008	28.64			
	3	0.5002	29.11			
90	1	0.5006	29.63	41.60	2.08	0.50
	2	0.5002	29.32			
	3	0.5007	28.65			
120	1	0.5006	29.63	42.41	2.12	0.83
	2	0.5006	28.77			
	3	0.5008	27.98			
150	1	0.5002	29.87	40.99	2.05	0.34
	2	0.5004	29.44			
	3	0.5002	29.21			

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
180	1	0.5002	29.79	41.46	2.07	0.70
	2	0.5008	28.47			
	3	0.5006	29.55			
เปลือกลำต้น						
30	1	0.5002	36.74	27.58	1.38	0.50
	2	0.5005	35.75			
	3	0.5008	36.14			
60	1	0.5006	30.17	39.66	1.98	0.21
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5006	29.96			
90	1	0.5002	30.44	39.23	1.96	0.22
	2	0.5003	30.14			
	3	0.5008	30.58			
120	1	0.5004	30.37	39.33	1.96	0.44
	2	0.5008	29.88			
	3	0.5009	30.76			
150	1	0.5008	30.46	39.28	1.96	0.19
	2	0.5002	30.48			
	3	0.5008	30.14			
180	1	0.5009	29.88	39.31	1.96	0.45
	2	0.5004	30.39			
	3	0.5006	30.77			

ตารางผนวกที่ ก7 ผลของขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 90 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ขนาด(mm)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
<0.25	1	0.5016	13.8	72.75	3.63	0.27
	2	0.5017	13.32			
	3	0.5014	13.76			
0.25-0.42	1	0.5018	15.1	69.01	3.44	0.35
	2	0.5018	15.65			
	3	0.5016	15.74			
0.42-0.84	1	0.5016	26.46	47.51	2.37	0.54
	2	0.5017	25.63			
	3	0.5014	26.64			
ใบ						
<0.25	1	0.5017	17.25	66.61	3.32	0.54
	2	0.5011	16.65			
	3	0.5017	16.18			
0.25-0.42	1	0.5016	20.19	59.23	2.95	0.31
	2	0.5011	20.23			
	3	0.5012	20.74			
0.42-0.84	1	0.5017	22.1	56.53	2.82	0.37
	2	0.5011	21.36			
	3	0.5017	21.75			
ลำต้น						
<0.25	1	0.5017	25.63	49.62	2.47	0.38
	2	0.5018	25.02			
	3	0.5014	24.92			

ตารางผนวกที่ ก 7 (ต่อ)

ขนาด(mm)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
0.25-0.42	1	0.5014	27.16	46.53	2.32	0.42
	2	0.5015	26.72			
	3	0.5015	26.33			
0.42-0.84	1	0.5017	27.88	43.77	2.18	0.24
	2	0.5018	28.11			
	3	0.5014	28.36			
เปลือกผล						
<0.25	1	0.5015	24.23	51.05	2.54	0.26
	2	0.5017	24.74			
	3	0.5016	24.46			
0.25-0.42	1	0.5012	25.91	48.21	2.40	0.25
	2	0.5012	25.64			
	3	0.5014	26.14			
0.42-0.84	1	0.5015	26.55	46.56	2.32	0.31
	2	0.5017	27.08			
	3	0.5016	26.53			
เปลือกลำต้น						
<0.25	1	0.5015	21.88	55.87	2.79	0.43
	2	0.5016	21.76			
	3	0.5015	22.55			
0.25-0.42	1	0.5012	26.10	47.73	2.38	0.17
	2	0.5013	25.99			
	3	0.5016	26.32			
0.42-0.84	1	0.5016	26.76	46.53	2.32	0.18
	2	0.5014	26.55			
	3	0.5015	26.90			

ตารางผนวกที่ ก8 ผลของขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ขนาด(mm)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
<0.25	1	0.5007	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5002	15.75			
	3	0.5001	15.38			
0.25-0.42	1	0.5008	17.93	63.57	3.17	0.36
	2	0.5009	18.62			
	3	0.5006	18.09			
0.42-0.84	1	0.5006	21.22	57.53	2.87	0.17
	2	0.5009	21.08			
	3	0.5014	21.41			
ใบ						
<0.25	1	0.5001	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5005	16.51			
	3	0.5008	16.02			
0.25-0.42	1	0.5006	21.93	57.03	2.85	0.46
	2	0.5001	21.52			
	3	0.5006	21.01			
0.42-0.84	1	0.5007	24.07	51.21	2.56	0.43
	2	0.5009	24.23			
	3	0.5007	24.89			
ลำต้น						
<0.25	1	0.5003	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5006	27.92			
	3	0.5001	27.52			

ตารางผนวกที่ ก 8 (ต่อ)

ขนาด(mm)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
0.25-0.42	1	0.5004	28.95	41.48	2.07	0.43
	2	0.5009	29.08			
	3	0.5005	29.75			
0.42-0.84	1	0.5007	30.27	38.90	1.94	0.28
	2	0.5006	30.56			
	3	0.5004	30.82			
เปลือกผล						
<0.25	1	0.5003	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5008	28.64			
	3	0.5002	29.11			
0.25-0.42	1	0.5012	29.31	39.89	1.99	0.72
	2	0.5010	30.74			
	3	0.5002	30.11			
0.42-0.84	1	0.5005	32.12	35.55		0.09
	2	0.5012	32.28			
	3	0.5014	32.28			
เปลือกลำต้น						
<0.25	1	0.5006	30.17	39.66	1.98	0.21
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5006	29.96			
0.25-0.42	1	0.5011	32.10	35.06	1.75	0.46
	2	0.5005	32.99			
	3	0.5009	32.32			
0.42-0.84	1	0.5006	35.76	28.61	1.43	0.15
	2	0.5007	35.52			
	3	0.5012	35.80			

ตารางผนวกที่ ก9 ผลของปริมาณตัวซับที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดตัวซับที่ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 90 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
0.5	1	0.5016	13.8	72.75	3.63	0.27
	2	0.5017	13.32			
	3	0.5014	13.76			
1	1	1.0011	10.55	78.17	1.95	0.39
	2	1.0016	11.33			
	3	1.0008	10.86			
2	1	2.0010	9.87	80.18	1.00	0.17
	2	2.0015	10.1			
	3	2.0014	9.76			
3	1	3.0011	9.33	81.40	0.68	0.14
	2	3.0015	9.42			
	3	3.0008	9.15			
4	1	4.0017	9.08	82.03	0.51	0.14
	2	4.0012	8.82			
	3	4.0021	9.05			
5	1	5.0009	8.97	82.15	0.41	0.06
	2	5.0011	8.85			
	3	5.0012	8.95			
ใบ						
0.5	1	0.5017	17.25	66.61	3.32	0.54
	2	0.5011	16.65			
	3	0.5017	16.18			

ตารางผนวกที่ ก 9 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
1	1	1.0016	12.61	74.39	1.86	0.57
	2	1.0005	12.36			
	3	1.0018	13.45			
2	1	2.0006	9.18	81.34	1.02	0.14
	2	2.0012	9.36			
	3	2.0018	9.45			
3	1	3.0009	8.3	83.33	0.69	0.11
	2	3.0004	8.25			
	3	3.0012	8.46			
4	1	4.0011	8.06	83.58	0.52	0.19
	2	4.0012	8.15			
	3	4.0008	8.42			
5	1	5.0004	7.58	84.81	0.42	0.09
	2	5.0008	7.69			
	3	5.0010	7.52			
ลำต้น						
0.5	1	0.5017	25.63	49.62	2.47	0.38
	2	0.5018	25.02			
	3	0.5014	24.92			
1	1	1.0004	22.98	54.83	1.37	0.35
	2	1.0008	22.47			
	3	1.0014	22.31			
2	1	2.0006	19.22	61.68	0.77	0.12
	2	2.0006	19.02			
	3	2.0010	19.24			

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
3	1	3.0017	18.08	63.89	0.53	0.20
	2	3.0012	18.24			
	3	3.0004	17.84			
4	1	4.0020	15.54	68.97	0.43	0.11
	2	4.0012	15.61			
	3	4.0009	15.40			
5	1	5.0004	15.03	70.35	0.35	0.21
	2	5.0017	14.61			
	3	5.0004	14.84			
เปลือกผล						
0.5	1	0.5015	24.23	51.05	2.54	0.26
	2	0.5017	24.74			
	3	0.5016	24.46			
1	1	1.0009	23.46	53.37	1.33	0.50
	2	1.0005	22.76			
	3	1.0006	23.72			
2	1	2.0013	22.02	56.07	0.70	0.17
	2	2.0011	22.10			
	3	2.0006	21.78			
3	1	3.0020	20.56	59.04	0.49	0.39
	2	3.0006	20.82			
	3	3.0014	20.06			
4	1	4.0015	19.05	62.19	0.39	0.40
	2	4.0018	19.21			
	3	4.0019	18.45			

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
5	1	5.0012	16.05	68.39	0.34	0.57
	2	5.0009	16.21			
	3	5.0015	15.15			
เปลือกลำต้น						
0.5	1	0.5015	21.88	55.87	2.79	0.43
	2	0.5016	21.76			
	3	0.5015	22.55			
1	1	1.0017	21.02	58.31	1.46	0.52
	2	1.0008	21.25			
	3	1.0009	20.26			
2	1	2.0015	20.59	59.43	0.74	0.27
	2	2.0010	20.12			
	3	2.0009	20.14			
3	1	3.0021	19.52	61.00	0.51	0.37
	2	3.0012	19.86			
	3	3.0017	19.12			
4	1	4.0015	18.36	63.30	0.40	0.11
	2	4.0021	18.24			
	3	4.0023	18.45			
5	1	5.0021	17.48	64.53	0.32	0.29
	2	5.0016	17.67			
	3	5.0014	18.05			

ตารางผนวกที่ ก10 ผลของปริมาณตัวซับที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดตัวซับที่ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
0.5	1	0.5007	15.99	68.59	3.43	0.31
	2	0.5002	15.75			
	3	0.5001	15.38			
1	1	1.0010	14.70	70.61	1.76	0.21
	2	1.0012	14.90			
	3	1.0006	14.48			
2	1	2.0005	13.47	72.99	0.91	0.41
	2	2.0009	13.93			
	3	2.0008	13.12			
3	1	3.0008	13.87	73.56	0.61	0.66
	2	3.0009	13.24			
	3	3.0011	12.55			
4	1	4.0008	13.07	73.69	0.46	0.36
	2	4.0003	13.55			
	3	4.0001	12.85			
5	1	5.0006	11.71	77.07	0.39	0.29
	2	5.0004	11.14			
	3	5.0007	11.55			
ใบ						
0.5	1	0.5001	16.13	67.56	3.37	0.26
	2	0.5005	16.51			
	3	0.5008	16.02			

ตารางผนวกที่ ก 10 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
1	1	1.0004	9.64	80.51	2.01	0.10
	2	1.0005	9.75			
	3	1.0009	9.84			
2	1	2.0013	8.26	83.23	1.04	0.32
	2	2.0008	8.14			
	3	2.0004	8.75			
3	1	3.0013	7.54	84.87	0.71	0.14
	2	3.0007	7.44			
	3	3.0008	7.72			
4	1	4.0002	6.45	86.79	0.54	0.30
	2	4.0008	6.42			
	3	4.0001	6.95			
5	1	5.0012	5.68	88.75	0.44	0.07
	2	5.0007	5.65			
	3	5.0001	5.55			
ลำต้น						
0.5	1	0.5003	27.69	44.58	2.23	0.20
	2	0.5006	27.92			
	3	0.5001	27.52			
1	1	1.0009	27.22	45.88	1.15	0.16
	2	1.0005	26.90			
	3	1.0011	27.06			
2	1	2.0005	23.98	52.03	0.65	0.44
	2	2.0004	24.42			
	3	2.0001	23.55			

ตารางผนวกที่ ก 10 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
3	1	3.0004	22.02	55.47	0.46	0.40
	2	3.0007	22.05			
	3	3.0004	22.73			
4	1	4.0008	19.94	59.98	0.37	0.12
	2	4.0002	20.15			
	3	4.0009	19.94			
5	1	5.0014	18.69	62.68	0.31	0.10
	2	5.0017	18.74			
	3	5.0009	18.55			
เปลือกผล						
0.5	1	0.5003	28.51	42.49	2.12	0.32
	2	0.5008	28.64			
	3	0.5002	29.11			
1	1	1.0009	24.84	50.33	1.26	0.09
	2	1.0004	24.75			
	3	1.0011	24.92			
2	1	2.0006	20.55	58.71	0.73	0.27
	2	2.0007	20.44			
	3	2.0009	20.95			
3	1	3.0001	18.27	63.40	0.53	0.14
	2	3.0004	18.45			
	3	3.0002	18.18			
4	1	4.0009	16.74	65.83	0.41	0.42
	2	4.0005	17.55			
	3	4.0014	16.96			

ตารางผนวกที่ ก 10 (ต่อ)

ปริมาณ (g)	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
5	1	5.0018	15.21	68.86	0.34	0.39
	2	5.0017	15.52			
	3	5.0008	15.98			
เปลือกลำต้น						
0.5	1	0.5006	30.17	39.66	1.98	0.21
	2	0.5004	30.38			
	3	0.5006	29.96			
1	1	1.0013	28.86	42.23	1.05	0.15
	2	1.0005	29.05			
	3	1.0009	28.75			
2	1	2.0002	25.86	47.52	0.59	0.38
	2	2.0003	26.62			
	3	2.0002	26.24			
3	1	3.0006	24.32	51.73	0.43	0.44
	2	3.0009	24.45			
	3	3.0001	23.64			
4	1	4.0009	21.62	56.89	0.36	0.06
	2	4.0002	21.54			
	3	4.0005	21.51			
5	1	5.0016	19.32	61.07	0.31	0.12
	2	5.0012	19.53			
	3	5.0008	19.54			

ตารางผนวกที่ ก11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ขนาดตัวซับที่ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 90 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
25	1	2.0009	3.29	83.93	0.52	0.63
	2	2.0004	4.31			
	3	2.0012	4.45			
50	1	2.0010	9.87	80.18	1.00	0.17
	2	2.0015	10.1			
	3	2.0014	9.76			
75	1	2.0016	19.69	74.07	1.39	0.33
	2	2.0008	19.58			
	3	2.0009	19.08			
100	1	2.0003	27.65	73.19	1.83	0.74
	2	2.0006	26.25			
	3	2.0009	26.54			
150	1	2.0015	42.26	72.21	2.71	0.50
	2	2.0012	41.39			
	3	2.0006	41.41			
200	1	2.0014	56.25	71.81	3.59	0.25
	2	2.0013	56.68			
	3	2.0009	56.24			
ใบ						
25	1	2.0004	4.12	83.64	0.52	0.06
	2	2.0010	4.02			
	3	2.0009	4.13			

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
50	1	2.0006	9.18	81.34	1.02	0.14
	2	2.0012	9.36			
	3	2.0018	9.45			
75	1	2.0005	20.63	72.41	1.36	0.14
	2	2.0011	20.59			
	3	2.0013	20.85			
100	1	2.0011	36.81	62.59	1.56	0.58
	2	2.0004	37.45			
	3	2.0007	37.97			
150	1	2.0012	58.23	60.94	2.28	0.74
	2	2.0015	59.45			
	3	2.0006	58.11			
200	1	2.0015	92.71	54.16	2.71	0.90
	2	2.0008	91.26			
	3	2.0012	91.06			
ลำต้น						
25	1	2.0004	8.69	65.40	0.41	0.18
	2	2.0009	8.45			
	3	2.0014	8.81			
50	1	2.0006	19.22	61.68	0.77	0.12
	2	2.0006	19.02			
	3	2.0010	19.24			
75	1	2.0008	37.01	49.95	0.94	0.47
	2	2.0016	37.69			
	3	2.0005	37.92			

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
100	1	2.0012	50.88	48.94	1.22	0.18
	2	2.0007	51.06			
	3	2.0004	51.23			
150	1	2.0009	80.91	46.38	1.74	0.42
	2	2.0011	80.23			
	3	2.0015	80.15			
200	1	2.0009	113.23	43.09	2.15	0.56
	2	2.0002	114.35			
	3	2.0014	113.86			
เปลือกผล						
25	1	2.0003	10.10	57.07	0.36	0.55
	2	2.0010	10.98			
	3	2.0011	11.12			
50	1	2.0013	25.02	50.07	0.63	0.17
	2	2.0011	25.10			
	3	2.0006	24.78			
75	1	2.0007	42.92	43.77	0.82	0.74
	2	2.0013	42.14			
	3	2.0009	41.45			
100	1	2.0015	57.83	41.98	1.05	0.30
	2	2.0006	58.36			
	3	2.0008	57.87			
150	1	2.0009	90.12	39.30	1.47	0.87
	2	2.0012	91.15			
	3	2.0001	91.86			

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
200	1	2.0008	119.85	40.10	2.00	0.67
	2	2.0014	120.46			
	3	2.0007	119.12			
เปลือกลำต้น						
25	1	2.0009	8.78	63.53	0.40	0.44
	2	2.0015	9.62			
	3	2.0013	8.95			
50	1	2.0015	20.59	59.43	0.74	0.27
	2	2.0010	20.12			
	3	2.0009	20.14			
75	1	2.0005	35.21	52.88	0.99	0.13
	2	2.0012	35.35			
	3	2.0004	35.46			
100	1	2.0014	86.26	42.63	1.60	0.92
	2	2.0011	86.86			
	3	2.0005	85.05			
150	1	2.0011	118.56	40.81	2.04	0.80
	2	2.0009	117.52			
	3	2.0012	119.09			
200	1	2.0011	86.86			
	2	2.0005	85.05			
	3	2.0011	118.56	40.81	2.04	0.80

ตารางผนวกที่ ก12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ขนาดตัวซับที่ขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาทีระยะเวลาการปั่นกวน 60 นาทีที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
เปลือกเมล็ด						
25	1	2.0009	3.79	84.71	0.53	0.04
	2	2.0010	3.86			
	3	2.0006	3.82			
50	1	2.0005	13.47	72.99	0.91	0.41
	2	2.0009	13.93			
	3	2.0008	13.12			
75	1	2.0012	21.96	70.55	1.32	0.15
	2	2.0008	22.25			
	3	2.0013	22.06			
100	1	2.0005	30.86	69.19	1.73	0.34
	2	2.0014	31.12			
	3	2.0015	30.45			
150	1	2.0008	47.06	68.53	2.57	0.45
	2	2.0007	46.85			
	3	2.0011	47.71			
200	1	2.0006	67.20	66.50	3.32	0.74
	2	2.0008	67.62			
	3	2.0010	66.18			
ใบ						
25	1	2.0014	3.83	84.67	0.53	0.13
	2	2.0011	3.71			
	3	2.0002	3.96			

ตารางผนวกที่ ก 12 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
50	1	2.0013	8.26	83.23	1.04	0.32
	2	2.0008	8.14			
	3	2.0004	8.75			
75	1	2.0006	13.21	82.00	1.54	0.25
	2	2.0008	13.62			
	3	2.0011	13.67			
100	1	2.0005	18.55	81.52	2.04	0.19
	2	2.0004	18.62			
	3	2.0006	18.27			
150	1	2.0009	30.41	79.55	2.98	0.23
	2	2.0004	30.85			
	3	2.0006	30.75			
200	1	2.0001	41.23	79.22	3.96	0.37
	2	2.0008	41.52			
	3	2.0011	41.96			
ลำต้น						
25	1	2.0005	9.89	59.36	0.37	0.24
	2	2.0011	10.36			
	3	2.0080	10.23			
50	1	2.0005	23.98	52.03	0.65	0.44
	2	2.0004	24.42			
	3	2.0001	23.55			
75	1	2.0090	36.36	51.69	0.97	0.14
	2	2.0005	36.25			
	3	2.0001	36.08			

ตารางผนวกที่ ก 12 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
100	1	2.0012	53.74	46.87	1.17	0.54
	2	2.0007	52.72			
	3	2.0009	52.93			
150	1	2.0005	90.78	39.43	1.48	0.09
	2	2.0003	90.82			
	3	2.0006	90.96			
200	1	2.0009	117.03	40.93	2.05	1.00
	2	2.0007	118.42			
	3	2.0012	118.96			
เปลือกผล						
25	1	2.0009	8.21	65.08	0.41	0.45
	2	2.0012	8.96			
	3	2.006	9.02			
50	1	2.0006	20.55	58.71	0.73	0.27
	2	2.0007	20.44			
	3	2.0009	20.95			
75	1	2.0005	36.42	50.72	0.95	0.61
	2	2.0010	36.84			
	3	2.0012	37.62			
100	1	2.0009	54.78	44.78	1.12	0.42
	2	2.0013	55.25			
	3	2.0012	55.62			
150	1	2.0005	89.02	40.82	1.53	0.47
	2	2.0011	88.23			
	3	2.0008	89.06			

ตารางผนวกที่ ก 12 (ต่อ)

ความเข้มข้น mg/l	ซ้ำที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	ความเข้มข้นที่เหลือ(mg/l)	ร้อยละการกำจัด	โลหะหนักที่ถูกกำจัด(mg/g)	SD
200	1	2.0010	119.84	39.95	2.00	0.36
	2	2.0005	120.52			
	3	2.0001	119.96			
เปลือกลำต้น						
25	1	2.0003	8.55	64.96	0.41	0.27
	2	2.0012	8.67			
	3	2.0006	9.06			
50	1	2.0002	25.86	47.52	0.59	0.38
	2	2.0003	26.62			
	3	2.0002	26.24			
75	1	2.0011	40.02	45.93	0.86	0.48
	2	2.0009	40.68			
	3	2.0005	40.95			
100	1	2.0006	56.89	43.20	1.08	0.31
	2	2.0001	56.45			
	3	2.0004	57.05			
150	1	2.0014	86.36	42.43	1.59	0.27
	2	2.0012	86.62			
	3	2.0005	86.09			
200	1	2.0004	121.23	39.71	1.98	0.74
	2	2.0006	119.78			
	3	2.0010	120.75			

ตารางผนวกที่ ก13 แสดงข้อมูลสมการการดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์ในสารละลายสังกะสี

สบู่ดำ	c	q	1/c	1/q	log c	log q
เปลือกเมล็ด	4.02	0.52	0.2489627	1.9070693	0.6038658	-0.2803665
	9.91	1.00	0.1009082	0.9984034	0.9960737	0.0006939
	19.45	1.39	0.0514139	0.7204677	1.2889196	0.1423855
	26.81	1.83	0.0372949	0.546712	1.4283508	0.2622414
	41.69	2.71	0.0239885	0.3695019	1.6199972	0.4323834
	56.39	3.59	0.0177336	0.2786992	1.7512021	0.5548642
ใบ	4.09	0.52	0.2444988	1.9136939	0.6117233	-0.2818725
	9.33	1.02	0.1071811	0.9841153	0.9698816	0.006954
	20.69	1.36	0.0483325	0.7368684	1.3157605	0.1326101
	37.41	1.56	0.0267308	0.6393145	1.5729877	0.1942855
	58.60	2.28	0.0170658	0.437861	1.7678729	0.3586637
	91.68	2.71	0.0109079	0.36948	1.9622588	0.4324091
ลำต้น	8.65	0.41	0.1156069	2.4475825	0.9370161	-0.3887373
	19.16	0.77	0.0521921	1.2974922	1.2823955	-0.1131048
	37.54	0.94	0.0266383	1.0683217	1.5744943	-0.028702
	51.06	1.22	0.0195861	0.8175853	1.7080525	0.0874669
	80.43	1.74	0.0124332	0.5752961	1.9054181	0.2401085
	113.81	2.15	0.0087863	0.4643026	2.0561931	0.3331989
เปลือกผล	10.73	0.36	0.0931677	2.8048439	1.0307346	-0.4479087
	24.97	0.63	0.0400534	1.5986673	1.3973606	-0.2037581
	42.17	0.82	0.0237135	1.2189877	1.6250036	-0.0859993
	58.02	1.05	0.0172354	0.9532959	1.7635777	0.0207723
	91.04	1.47	0.0109838	0.6787143	1.9592481	0.168313
	119.81	2.00	0.0083465	0.4990559	2.0784931	0.3018508

ตารางผนวกที่ ก 13 (ต่อ)

สบู่ดำ	c	q	1/c	1/q	log c	log q
เปลือกลำต้น	9.12	0.40	0.1096892	2.5199098	0.9598361	-0.401385
	20.28	0.74	0.0493016	1.3468075	1.3071393	-0.1293055
	35.34	0.99	0.0282965	1.0089259	1.5482665	-0.0038593
	49.12	1.27	0.0203569	0.7866607	1.6912878	0.1042125
	86.06	1.60	0.0116203	0.6258655	1.9347845	0.203519
	118.39	2.04	0.0084467	0.4903972	2.073315	0.309452

ตารางผนวกที่ ก14 แสดงข้อมูลสมการการดูดซับของฟรุนดิชและแลงเมียร์ในสารละลายทองแดง

สบู่ดำ	c	q	1/c	1/q	log c	log q
เปลือกเมล็ด	3.82	0.53	0.2615519	1.8896583	-0.2763833	0.5824422
	13.51	0.91	0.0740375	1.0964922	-0.0400056	1.1305482
	22.42	1.31	0.0445964	0.7612121	0.1184943	1.3507002
	30.81	1.73	0.032457	0.5784459	0.2377372	1.4886917
	46.87	2.58	0.0213341	0.3880404	0.411123	1.6709258
	66.00	3.35	0.0151515	0.2986269	0.5248711	1.8195439
ใบ	3.83	0.53	0.2608696	1.8906158	-0.2766033	0.5835766
	8.38	1.04	0.1192843	0.9615546	0.017026	0.9234167
	13.50	1.54	0.0740741	0.6506773	0.1866343	1.1303338
	18.48	2.04	0.0541126	0.4907998	0.3090956	1.266702
	30.67	2.98	0.0326052	0.3353111	0.4745521	1.4867138
	41.57	3.96	0.0240558	0.2525615	0.5976329	1.61878
	3.83	0.53	0.2608696	1.8906158	-0.2766033	0.5835766

ตารางผนวกที่ ก 14 (ต่อ)

สบู่ดำ	c	q	1/c	1/q	log c	log q
ลำต้น	10.16	0.37	0.0984252	2.6997032	-0.431316	1.0068937
	23.98	0.65	0.0416956	1.5377309	-0.1868804	1.3799095
	36.23	0.97	0.0276014	1.0333668	-0.0142545	1.5590683
	48.80	1.28	0.0204932	0.7815637	0.1070356	1.6883902
	73.52	1.91	0.0136017	0.5231344	0.2813867	1.8664055
	94.47	2.64	0.0105854	0.3792159	0.4211134	1.9752939
เปลือกผล	8.73	0.41	0.1145475	2.4617893	-0.3912509	0.9410142
	20.65	0.73	0.048434	1.3632064	-0.1345616	1.3148499
	36.96	0.95	0.0270563	1.051996	-0.0220141	1.567732
	55.22	1.12	0.0181105	0.8936951	0.0488106	1.7420702
	88.77	1.53	0.0112651	0.6535363	0.1847303	1.9482662
	120.11	2.00	0.0083259	0.5008011	0.3003347	2.0795671
เปลือกลำต้น	8.76	0.41	0.1141553	2.4639159	-0.3916259	0.9425041
	26.24	0.59	0.0381098	1.6836976	-0.2262641	1.4189638
	40.55	0.86	0.0246609	1.1615883	-0.0650522	1.6079909
	56.80	1.08	0.0176067	0.9260238	0.0333779	1.7543228
	86.36	1.59	0.0115799	0.628827	0.2014688	1.9362959
	120.59	1.98	0.0082928	0.5038617	0.2976886	2.0812993

ภาคผนวก ข

แสดงการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสบู่ดำ

การหาปริมาณสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เอทานอล-เบนซีน วิเคราะห์ตาม TAPPI T204 Om-88

1. ชั่งตัวอย่างสบู่ดำ น้ำหนักประมาณ 3 กรัม แล้วใส่ลงไปใน extraction thimble

2. ตวงสารละลายผสมของเอทานอลกับเบนซีน (อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร) จำนวน 200 mlใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 ml

3. จัดชุดสกัด soxhlet apparatus ควบคุมอุณหภูมิและจุดเดือดของตัวทำละลาย และใช้เวลาสกัดประมาณ 4-5 ชั่วโมง

4. นำสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหย ให้เหลือปริมาตรประมาณ 20-25 ml โดยเครื่อง rotary evaporator แล้วเทใส่บีกเกอร์ ที่รู้น้ำหนักแล้วนำเข้าไประเหยใน oven ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100 $\pm$5°C จนแห้ง แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงใน dessicator แล้วชั่งน้ำหนักของสารที่เหลือรวมกับน้ำหนักของบีกเกอร์

5. ทำ blank โดยการนำตัวทำละลายเอทานอล-เบนซีน 200 ml ไประเหยให้แห้งโดยทำการทดลองต่างๆ เหมือนกับการทดลองข้อ 4

6. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์สารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายจากสูตร

$$\text{สารแทรก} = [(We-Wb)/Wp] \times 100$$

เมื่อ We คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของสารที่ถูกสกัด
Wb คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของ blank
Wp คือ น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่างไม้ที่ใช้ทดลอง

การปริมาณโฮโลเซลลูโลสโดยวิธี Acid chlorite ของ Browing ใน method of wood chemistry

1. ชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่างสบู่ดำที่ปราศจากสารแทรกประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มล.

2 .เติมน้ำกลั่น 160 มล. และ กรดอะซิติก 0.5 มล. และ โซเดียมคลอไรต์ 1.5 $\pm$ 0.1 กรัม ตามลำดับ ลงในขวดรูปกรวยและทำการทดลองในตู้ควัน

3. นำขวดรูปกรวยไปตั้งใน water bath ที่มีอุณหภูมิประมาณ 70-80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเขย่าขวดอย่างสม่ำเสมอ

4. หลังจากครบ 1 ชั่วโมง เติมกรดอะซิติก 0.5 มล. ตามด้วย โซเดียมคลอไรต์ 1.5 กรัม ตามลำดับทำในทำนองนี้ต่อไปอีกชั่วโมงที่ 2, 3 และ 4 หรือจนกว่าผงตัวอย่างจะมีสีขาว

5. นำขวดรูปกรวยมาวางในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งสารละลายในขวดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10°C แล้วนำสารละลายมากรองผ่าน sinter glass crucible เบอร์ 3 ล้างด้วยน้ำเย็นและอะซีโตนหลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100± 5°C หลังจากอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างไว้วิเคราะห์หาปริมาณแอลฟาเซลลูโลสต่อไป

6. คำนวณหาปริมาณโฮโลเซลลูโลสจาก

$$\%\ \text{โฮโลเซลลูโลส} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของโฮโลเซลลูโลสหลังการอบ X 100}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่างไม้}}$$

การหาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส วิเคราะห์ตาม TAPPI T203 om-88

1. ชั่งตัวอย่างจากการวิเคราะห์ % โฮโลเซลลูโลสประมาณ 1.5 0.1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มล. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 75 มล. ลงไปปรับอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ปริมาณ 2.5± 0.2°C

2. คนสารละลายด้วยเครื่องกวนจนกระทั่งเยื่อกระจายอย่างสมบูรณ์

3. ล้างเครื่องกวนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 2.5 มล.(ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 100 มล.) คนสารละลายด้วยแท่งแก้วนำไปแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 2.5± 0.2°C เป็นเวลา 30 นาที

4. เติมน้ำกลั่นลงในสารละลายปริมาตร 100 มล. แล้วคนด้วยแท่งแก้ว ทิ้งไว้อีก 30 นาที

5. กรองสารละลายโดยใช้ sinter glass crucible เบอร์ 3

6. ล้างเยื่อที่เหลือด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลางและ 10% กรดอะซิติก ปริมาตร 40 มล. นำไปอบแห้งที่ 105°C ในเตาอบ

7. คำนวณหา% แอลฟาเซลลูโลสจาก

$$\%\ \text{แอลฟาเซลลูโลส} = \frac{\text{น้ำหนักแอลฟาเซลลูโลส X 100}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

การหาปริมาณลิกนินวิเคราะห์ตาม TAPPI T222 om-88

1. ชั่งน้ำหนักแห้งที่ปราศจากสารแทรกของสบู่ดำหนัก 1±0.1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 ml

2. วางบีกเกอร์ลงในอ่างน้ำแข็งแล้วค่อยๆ เติม 72% H_2SO_4 ที่แช่เย็นไว้ในตู้เย็นลงไป 15 ml พร้อมคนอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที เพื่อให้ผสมกันดีขึ้น

3. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำออกจากอ่างน้ำแข็งมาตั้งทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20± 1°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง พร้อมคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ทุกๆ 15 นาที

4. เติมน้ำกลั่น 400 ml ลงในขวดก้นกลมขนาด 1000 ml แล้วเทสารละลายในบีกเกอร์ลงไปในขวดก้นกลม พร้อมทั้งเติมน้ำกลั่นลงไปอีกจนถึงระดับ 575 ml ที่ขีดไว้ข้างขวดก้นกลม

5. ทำการ Reflux สารละลายนาน 4 ชั่วโมง เมื่อเสร็จเทสารละลายทั้งหมดใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml แล้วตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ 1 คืน

6. กรองผ่าน Sinter glass crucible เบอร์ 3 ที่ทราบน้ำหนักแล้ว ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนแล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงใน Dessicater หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักรวมของ glass crucible และลิกนิน

7. คำนวณหา % ลิกนินจาก

% ลิกนิน = A 100/W

เมื่อ A = น้ำหนักของลิกนินเป็นกรัม

W = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของไม้ตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาปริมาณ total phenolic compound

1. เตรียมเตรียมสารละลายมาตรฐานละลายกรดแทนนิก เข้มข้น 100 ppm

2. ปิเปตสารละลายจากข้อ 1 มา 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 ml

3. เติม 1 ml ของ Folin-ciocalteu phenolreagent และเขย่า

4. เติม 20 % ของ โซเดียวคาร์บอเนต ปริมาตร 5 ml พร้อมตั้งทิ้งไว้ 20 นาทีและนำไปวัดค่า adsorbent โดยใช้ UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 735 nm.

5. ผลจากข้อ 3.6.1-3.6.5 จะได้กราฟมาตรฐานของกรดแทนนิกที่แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า adsorbance กับความเข้มข้น

6.วิเคราะห์ตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่าง 1 ml และทำการทดลองตามข้อ 3-5

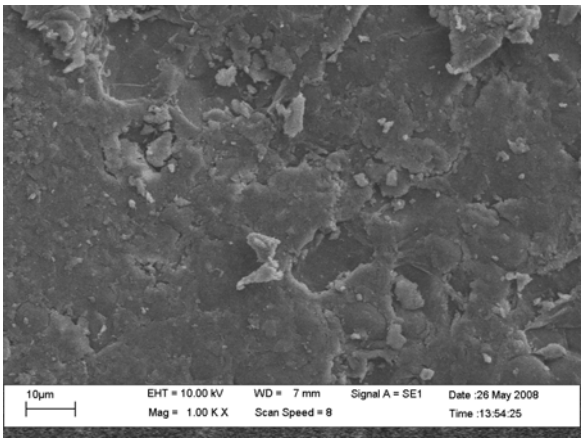
ตารางผนวกที่ ข1 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆของสบู่ดำ แสดงในรูปของ%

สบู่ดำ	องค์ประกอบทางเคมี				
	สารแทรก	ลิกนิน	โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	total phenolic compound
เปลือกผล	8.83	20.565	66.875	57.53	0.1921
เปลือกเมล็ด	3.31	39.79	56.65	56.055	1.4352
เปลือกลำต้น	7.93	13.93	63.01	57.445	0.3846
ลำต้น	2.915	23.33	72.255	54.185	0.3035
ใบ	19.285	36.005	53.505	50.495	1.5482

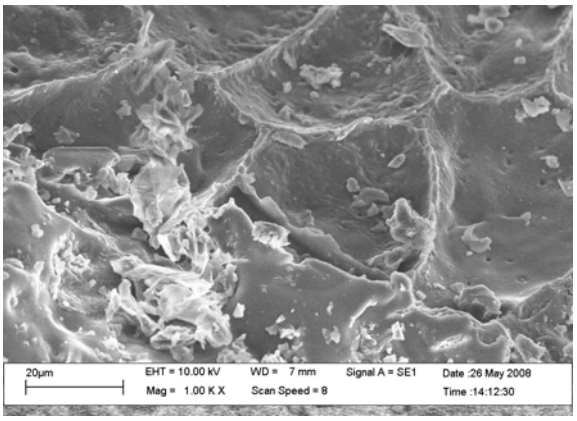
ภาคผนวก ค

แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของสบู่ดำ

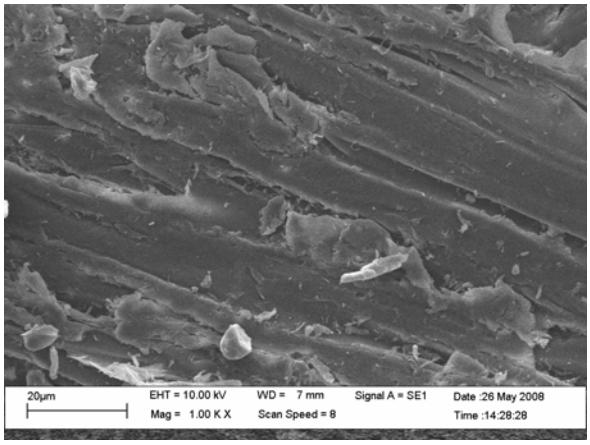
การศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบสแกน(Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



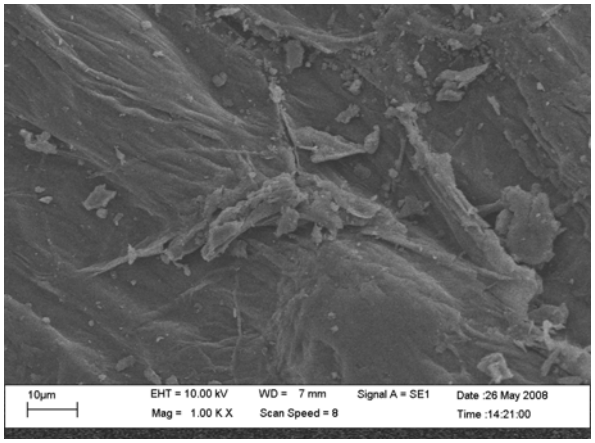
ภาพผนวกที่ ค1 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกเมล็ดสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า



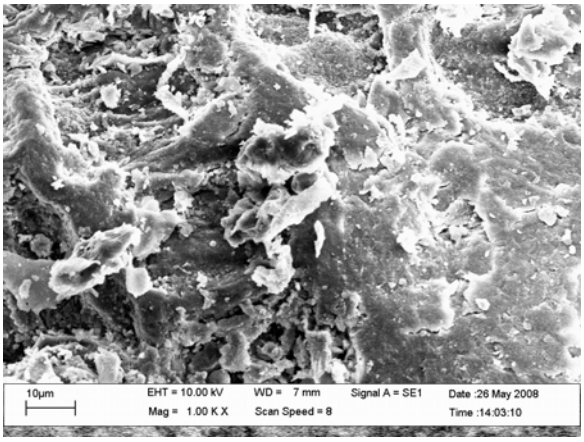
ภาพผนวกที่ ค2 ลักษณะพื้นผิวของใบสบู่ดำที่กำลัง ขยาย 1000 เท่า



ภาพผนวกที่ ค3 ลักษณะพื้นผิวของลำต้นสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า



ภาพผนวกที่ ค4 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกผลสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า



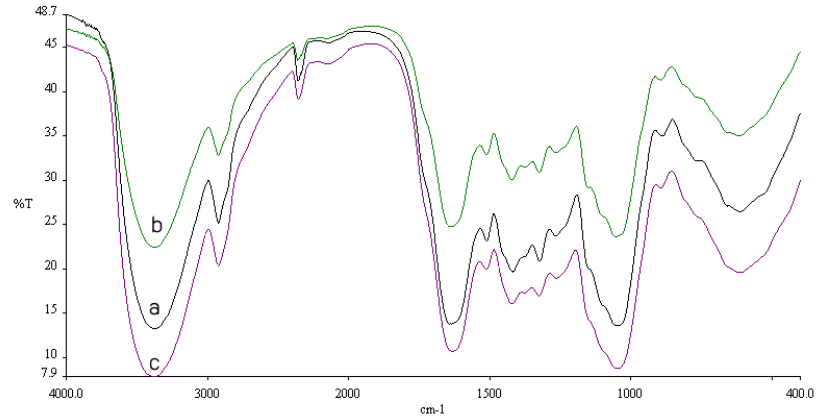
ภาพผนวกที่ ค5 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกลำต้นสบู่ดำที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ภาคผนวก ง

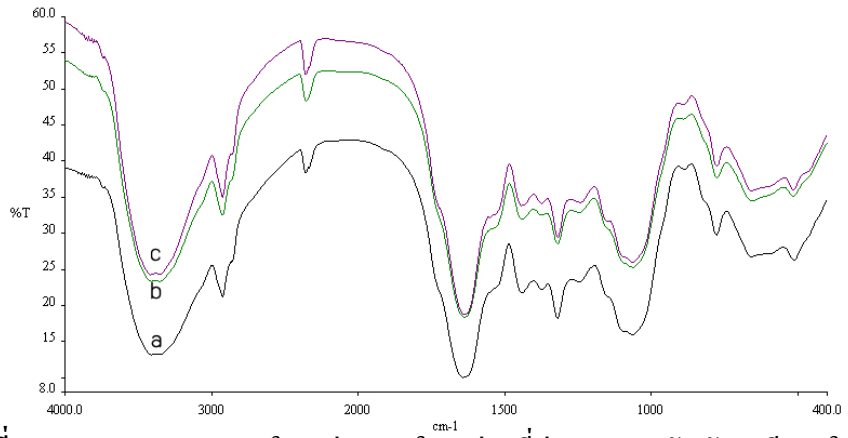
แสดงผลการศึกษา หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectrum โดย KBr method ของสบู่ดำ

การวิเคราะห์องค์ประกอบโมเลกุลโดย IR spectrum ด้วยเครื่อง FTIR spectrophotometer Parkin Elmer (Model system 2000)

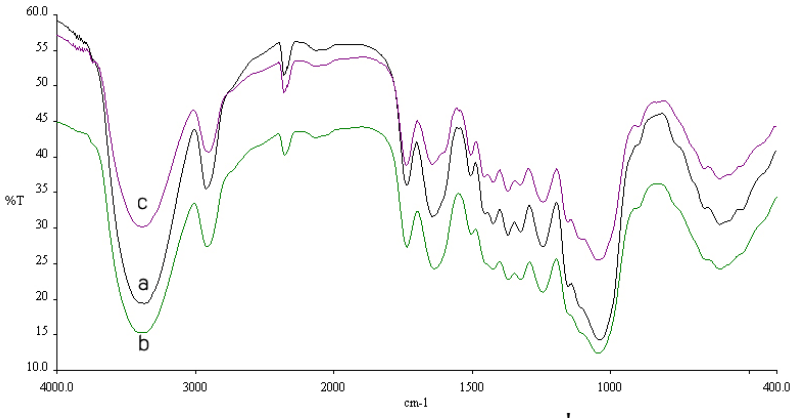
1. ชั่ง KBr ประมาณ 12 มิลลิกรัมใส่ลงในโกร่งและบดให้ละเอียด
2. ตักสารตัวอย่างจำนวน 10 มิลลิกรัมใส่เพิ่มลงไป จากนั้นบดให้เข้ากัน
3. ตักสารผสมใส่ลงในอุปกรณ์อัดเม็ดให้เรียบร้อย
4. เข้าเครื่องอัดเม็ดให้เป็นแผ่น KBr โดยใช้ความดัน 1500 psi ทิ้งไว้ 20 นาที
5. นำแผ่น KBr ที่ได้เข้าเครื่องบันทึกข้อมูล IR spectrum โดยกำหนดให้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วง 4000 - 400 cm^{-1} จำนวน scan 16 ครั้ง มี resolution เท่ากับ 4 cm^{-1}



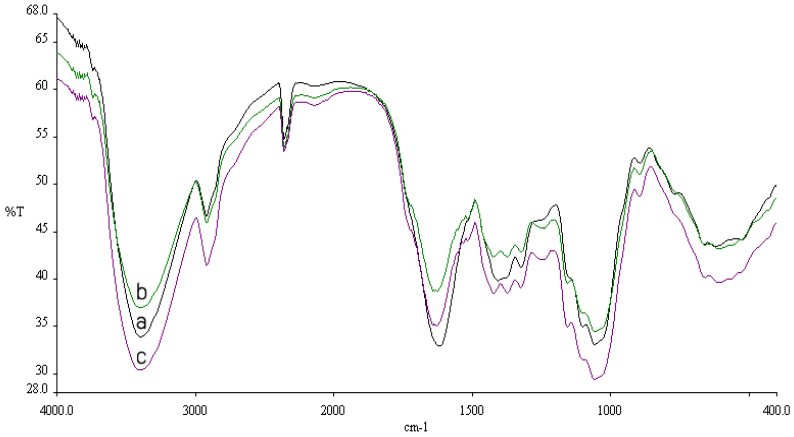
ภาพผนวกที่ ง1 FT-IR spectra ของเปลือกเมล็ดสบู่ดำ (a) เปลือกเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับสังกะสี (b) เปลือกเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับทองแดง (c)



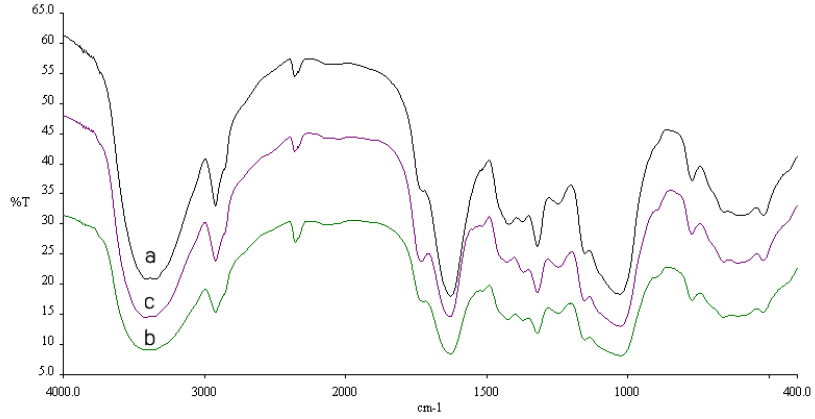
ภาพผนวกที่ ง2 FT-IR spectra ของใบสบู่ดำ (a) ใบสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับสังกะสี (b) ใบสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับทองแดง (c)



ภาพผนวกที่ ง3 FT-IR spectra ของลำต้นสบู่ดำ (a) ลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับสังกะสี (b) ลำต้นสบู่ ดำที่ผ่านการดูดซับทองแดง (c)



ภาพผนวกที่ ง4 FT-IR spectra ของเปลือกผลสบู่ดำ (a) เปลือกผลสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับสังกะสี (b) เปลือกผลสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับทองแดง (c)



ภาพผนวกที่ ง5 FT-IR spectra ของเปลือกลำต้นสบู่ดำ (a) เปลือกลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับสังกะสี (b) เปลือกลำต้นสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับทองแดง (c)

ภาคผนวก จ

แสดงการวิเคราะห์โลหะหนัก

การวิเคราะห์โลหะหนัก

หลักการ

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) อาจมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะหนักที่วิเคราะห์และหรือความเข้มข้น ปริมาณโลหะที่มีอยู่ในตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์

1. การเก็บและการรักษาน้ำตัวอย่างในการหาปริมาณโลหะหนักปริมาณน้อย ๆ สิ่งที่ต้องระวัง คือการปนเปื้อนและการสูญหายของโลหะ สาเหตุสำคัญในการปนเปื้อนของน้ำตัวอย่าง ได้แก่ ฝุ่นละอองในห้องปฏิบัติการสิ่งที่เจือปนอยู่ในรีเอเจนต์ที่ใช้และอยู่บนเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปการทดลองที่เกี่ยวกับสารที่เป็นของเหลว ภาชนะที่ใส่น้ำตัวอย่างนั้นมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงบวก หรือความคลาดเคลื่อนเชิงลบโดย

- ล้างด้วยสารซักฟอกและน้ำ
- ล้างด้วยกรดไนตริก 1 + 1 และน้ำ
- ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 + 1 ตามด้วยน้ำ
- ล้างด้วยน้ำกลั่นดีไอออนไนซ์ (deionized distilled)

2. การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ การจำแนกประเภทโลหะหนักในน้ำตัวอย่างในการหาปริมาณโลหะหนักในน้ำตัวอย่าง นิยมแบ่งโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ประเภทคือ

โลหะละลาย (dissoved metals) คือ โลหะที่ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถผ่านเยื่อกรอง (membrane filter) ขนาด 0.45 ไมครอนได้

โลหะแขวนลอย (suspended metals) คือ โลหะที่หาได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถผ่านเยื่อกรอง (membrane filter) ขนาด 0.45 ไมครอนได้

โลหะทั้งหมด (total metals) คือ โลหะที่ได้จากน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้กรองและทำการย่อยสลายอย่างรุนแรง (vogorous digestion)

โลหะสกัด (extractable metals) คือ ปริมาณโลหะที่หาได้จากน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้กรองและทำปฏิกิริยาสกัดด้วยกรดแร่ (mineral acid) ที่เจือจางและร้อน

การเตรียมน้ำตัวอย่างเพื่อใช้ในการหาปริมาณโลหะทั้งหมด

ในขณะที่เก็บน้ำตัวอย่าง ทำน้ำตัวอย่างให้เป็นกรด โดยใช้กรดไนตริก (HNO3) 1 : 1โดยไม่ต้องกรองน้ำตัวอย่าง เลือกใช้ปริมาณน้ำต้วอย่าง 50 มิลลิลิตร โดยเขย่าน้ำ ปิเปตน้ำตัวอย่างที่จะตรวจลงในบีกเกอร์ แล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร ระเหยบนแผ่นความร้อน(hot plate)จนปริมาตรลดลงเหลือ 20 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้นอีก 3 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา นำไปบนแผ่นความร้อนจนปริมาณลดลงเหลือ 10 มิลลิลิตร ตั้งให้เย็น ชะภายในของบีกเกอร์และกระจกนาฬิกาด้วยน้ำกลั่น กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 นำไปปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดพลาสติก เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การวิเคราะห์

ลักษณะการวิเคราะห์(mode)	:	absorption
เชื้อเพลิง	:	Air-Acetylene
ลักษณะของเปลวไฟ(Flame)	:	Lean-Blue

ตารางผนวกที่ จ1 แสดงค่าต่างๆในการวิเคราะห์โลหะหนักสังกะสีและทองแดง

	Wavelength (nm)	**Slit (nm)**	**CharecteristicConc. mg/l**	**Charecteristic Conc.Check mg/l**
สังกะสี	213.9	0.7	0.018	1.00
ทองแดง	324.8	0.7	0.077	4.00

วิธีการวิเคราะห์

1. ขั้นตอนของการใช้เครื่องมือ (instrument operation) เนื่องจาก AAS มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับบริษัทที่จำหน่าย โดยทั่วไปจะมีขั้นตอนดังนี้

1.1 เลือกฮอลโลวคาโทดแลมพ์ของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ นำไปติดตั้งให้เข้าที่ตามวิธีแนะนำของเครื่องแต่ละบริษัทที่ทำเครื่องมือนั้นแล้วจัดโมโนโครมิเตอร์ให้มีความยาวคลื่น (wave length) ตามตารางผนวกที่

1.2 จัดความกว้างของช่องแสงผ่าน (silt width) ตามคำแนะนำในคู่มือของเครื่องมือ

1.3 ปิดสวิทซ์ของเครื่องมือ จัดปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ผ่านฮอลโลวคาโทดแลมพ์ ด้วยปริมาณพอเหมาะตามคำแนะนำในคู่มือ

1.4 อุ่นเครื่องนานประมาณ 10-20 นาที เพื่อให้เครื่องมือถึงจุดเสถียร

1.5 นำหัวเตา (burner head) ชนิดที่ใช้อากาศอะเซทิลีน ติดตั้งให้เข้าที่

1.6 ปล่อยอากาศ (จากเครื่องอัดหรือจากท่อ) ให้ผ่านเข้าไปในเครื่องมือ จัด flow rate ให้เหมาะสมกับโลหะที่จะทำการวิเคราะห์ตามคำแนะนำในคู่มือ

1.7 ปล่อยก๊าซอะเซทิลีน จัด flow rate ตามคู่มือ เสร็จแล้วจุดเปลวไฟด้วยความระมัดระวัง

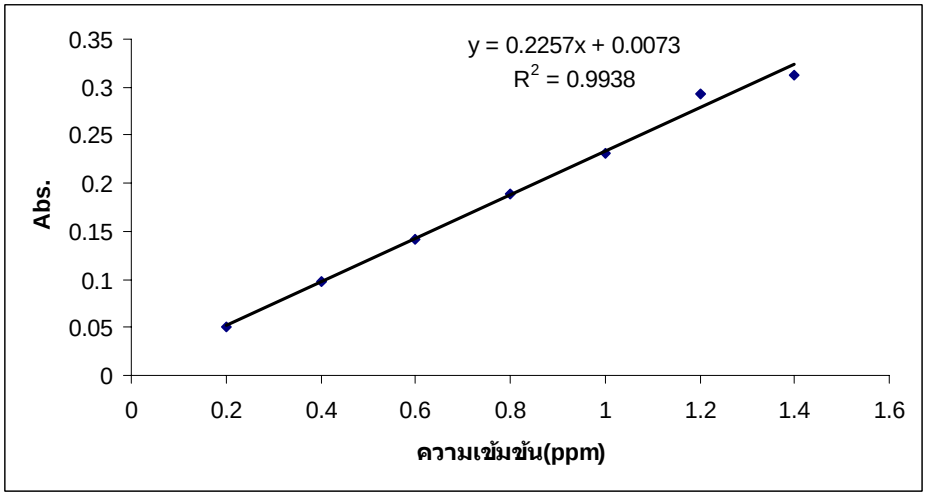
1.8 จุ่มหลอดพลาสติกรูเล็ก ของเครื่องอะตอมไมเซอร์ ลงในน้ำกลั่นนานมากกว่า 1นาที และตรวจสอบ aspiration rate ให้อยู่ระหว่าง 3-5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พร้อมกันนั้นให้เครื่องอ่านค่าศูนย์

1.9 จุ่มหลอดพลาสติกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ลงในสารละลายมาตรฐาน ในขณะเดียวกันผู้ทดลองจะจัดแนวและระดับของหัวเตาให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งดูได้จากตำแหน่งที่ทำให้มาตราของระบบอ่าน (readout system) ของเครื่องมือมีผลตอบสนองมากที่สุด

1.10 เมื่อจัดเครื่องมือตามขั้นตอนข้างบนแล้ว เครื่องมือก็พร้อมที่จะทำการวิเคราะห์ได้และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จแล้ว ให้ดับเปลวไฟโดยปิดท่ออะเซทิลีนก่อนปิดทางเดินอากาศ

ตารางผนวกที่ จ2 แสดงค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานสังกะสีในการทำกราฟมาตรฐาน

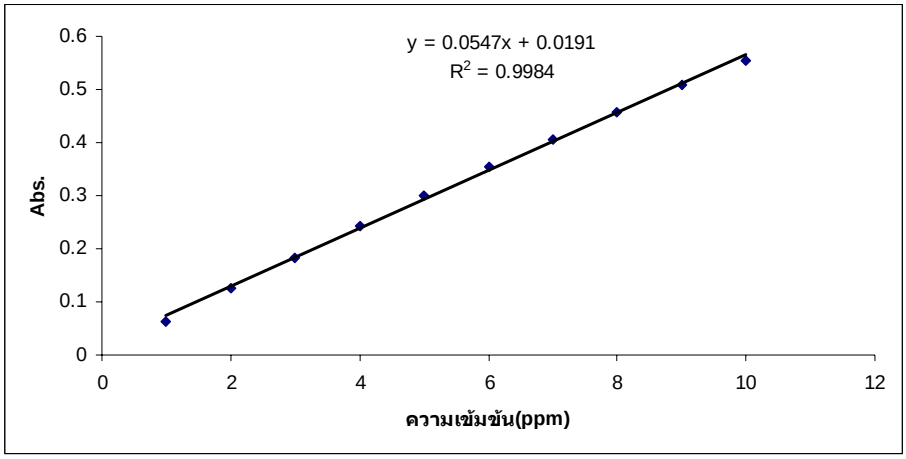
Concentration(ppm)	Abs.
0.2	0.051
0.4	0.097
0.6	0.142
0.8	0.189
1	0.231
1.2	0.293
1.4	0.312



ภาพผนวกที่ จ1 แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี

ตารางผนวกที่ จ3 แสดงค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐานทองแดงในการทำกราฟมาตรฐาน

Concentration(ppm)	Abs.
1	0.064
2	0.125
3	0.184
4	0.242
5	0.299
6	0.355
7	0.407



ภาพผนวกที่ จ2 แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายทองแดง

ภาพผนวกที่ จ3 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) บริษัทผู้ผลิต Perkin รุ่น Analyst 300

การหาค่า % Recovery ของการหาปริมาณโลหะหนัก

$$\%\ \text{recovery ของเครื่อง AAS} = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากเครื่อง}}{\text{ค่าความเข้มข้นที่ทราบค่า}} \times 100$$

$$\%\ \text{recovery ในการตรวจทองแดง} = \frac{3.028}{3.000} \times 100 = 102.8$$

$$\%\ \text{recovery ในการตรวจสังกะสี} = \frac{1.072}{1.000} \times 100 = 107.2$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวปรารถนา โป่งฟ้า
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 8 มกราคม 2526
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	ปี 2543 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนชลราษฎรอำรุง ชลบุรี ปี 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (ศึกษาศาสตร์-เกษตร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-