



ใบรับรองวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง โดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Dyes Removal in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project Using the Mixture of Macadamia Shell and Soils as Growing Materials in the Constructed Wetland Wastewater Treatment System

นามผู้วิจัย นางสาวภาวิดา นิยมทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง
โดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูก
ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Dyes Removal in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project Using
the Mixture of Macadamia Shell and Soils as Growing Materials in
the Constructed Wetland Wastewater Treatment System

โดย

นางสาวภาวิดา นิยมทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ภาวีกา นิยมทอง 2556: การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการ
พัฒนาคอยตุง โดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบ
บำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คันติตา ตั้งคณานุรักษ์,
วท.ม. 125 หน้า

งานวิจัยนี้นำเปลือกกะลามะคาเดเมียซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนมากและยากต่อการ
กำจัดจากโครงการพัฒนาคอยตุงมาใช้เป็นตัวดูดซับสีข้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงาน
ย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ตัวดูดซับที่ใช้มี 4 ชนิด คือ เปลือกกะลามะคาเดเมีย, ถ่านเปลือก
กะลามะคาเดเมีย, เปลือกกะลามะคาเดเมียและถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วย
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการ
กำจัดสีข้อม 9 ชนิด จากโครงการพัฒนาคอยตุง (Yellow LS-R-01, Yellow LS-4G, Super Black
G, Navy LS-G, Orange LS-BR, Blue LS-3R, Red LS-B, Br.Blue LS-G และ Turquoise H-GN)
ในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผลการทดลอง พบว่า ตัว
ดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีสภาวะ ที่เหมาะสมเหมือนกันคือ ปริมาณตัวดูดซับ 16 กรัม พีเอช 7 และ
ระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมง โดยที่ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย
โซเดียมคลอไรด์กำจัดสีข้อมได้ดีที่สุดคือ ร้อยละ 31.58 และร้อยละ 54.45 สำหรับน้ำเสียจาก
โรงงานย้อมผ้าคอยตุง กลไกการดูดซับของตัวดูดซับนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์
และอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยน้ำหนักของตัวดูดซับ (ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพ
ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์) ต่อดินคือ 1:5 กำจัดสีข้อมร้อยละ 95.75 การทดลองแบบไหล
ต่อเนื่องเพื่อจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนา
สิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยใช้คอลัมน์ขนาด 5.8 x 37 เซนติเมตร
ซึ่งบรรจุชั้นกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด และส่วนผสมตัวดูดซับกับดิน พบว่า กำจัดสีข้อม
ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ร้อยละ 96.31 และในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าคอยตุงได้ร้อยละ 68.45
นอกจากนี้ การทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กโดยใช้กระบะพลาสติกขนาด
51x51x54 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุวัสดุปลูกรวมกับการปลูกต้นกกกลมและต้นรูปถ่ายีย พบว่า กำจัด
สีข้อมได้ร้อยละ 96.63 (สำหรับการปลูกต้นกกกลม) และ 96.16 (สำหรับการปลูก ต้นรูปถ่ายีย)

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pawida Niyomtong 2013: Dyes Removal in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project Using the Mixture of Macadamia Shell and Soils as Growing Materials in the Constructed Wetland Wastewater Treatment System. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 125 pages.

This research, macadamia shell from macadamia production of Doi Tung Development Project which is quantities large waste and difficult to eliminate were used as dyes removal adsorbent in Doi Tung textile effluent. The utilized adsorbents 4 types were macadamia shell, macadamia charcoal and macadamia shell and macadamia charcoal by sodium chloride treatment. Batch experiment were performed to investigate the suitable condition for removal of 9 dyes from Doi Tung Development Project (Yellow LS-R-01, Yellow LS-4G, Super Black G, Navy LS-G, Orange LS-BR, Blue LS-3R, Red LS-B, Br.Blue LS-G and Turquoise H-GN) in 50 ml. of 20 mg/L. of the dyes synthetic wastewater. The results demonstrated that four types of adsorbent had the same suitable condition at 16 g. of adsorbent dosage, pH 7 and contact time 10 hours, while macadamia charcoal treated with sodium chloride gave the best dye removal at 31.58 % and 54.45 % for Doi Tung textile factory effluent. The adsorption mechanism of adsorbent was conformed to the Langmuir adsorption isotherm and the optimum ratio of adsorbent (macadamia charcoal treated with sodium chloride) to soil was 1:5 by weight to remove dyes at 95.75 %. The continuous flow experiment was performed for the constructed wetlands system model of the King's Royally Initiated Leam Phak Bia Environmental Research and Development Project by using glass column size 5.8x37 cm. that containing with gravel, fine sand, coarse sand and mixing soil with adsorbent, the removal percentage were 96.31 for the synthetic wastewater and 68.45 for Doi Tung textile factory effluent. Furthermore, the filtrated lysimeter technique was carried out in square plastic tank with size 51x51x54 cm. that containing the growing material with growing *Cyperus Corymbosus Rottb* and *Typha Angustifolia*. The results that 96.63 % (for *Cyperus Corymbosus Rottb*) and 96.16 % (for *Typha Angustifolia*) of dyes were removed.

Student's signature

Thesis Advisor's signatur

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ กรรมการร่วมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติวิเคราะห้คุณภาพน้ำในการศึกษาวิจัย และทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาโดยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อม, เปลือกกะลามะคาเคเมีย และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุรนาท คุณแม่วีรียา และครอบครัวนิคมทองที่ให้กำลังใจ แรงใจสนับสนุน อบรม สั่งสอน และช่วยเหลือทุกสิ่งอย่างตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนสิ่งแวดล้อมรุ่น 34 และทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ภาวิดา นิยมทอง

กุมภาพันธ์ 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุป	80
ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	83
ภาคผนวก	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยกับประเภทของสีที่ใช้ย้อม	10
2	การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน	10
3	กลไกการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำ	31
4	อัตราส่วนผสมระหว่างเปลือกกะลามะคาเดเมียต่อดินเหนียวปนทราย	42
5	ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้มากที่สุดของสารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด	47
6	สมการเชิงเส้นของสีย้อม 9 ชนิด	47
7	อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย	49
8	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ	50
9	อิทธิพลของพีเอชของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย	51
10	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับพีเอช	52
11	อิทธิพลของระยะเวลากำจัด (ชั่วโมง) ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย	54
12	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับระยะเวลากำจัด	55
13	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย	56
14	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	57
15	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับในสภาวะที่เหมาะสม	61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของปริมาณดินเหนียวปนทราย	64
17	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่างๆกัน	65
18	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	69
19	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง	71
20	ความเข้มข้นสีย้อมแต่ละชนิดในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง	71
21	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง หลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	72
22	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ก่อนและหลังการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	73
23	ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง หลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์	74
24	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ก่อนและหลังการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
25	ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตง หลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเด เมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปน ทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	76
26	ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการ ทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique)	79
ตารางผนวกที่		
1	อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วย เปลือกกะลามะคาเดเมีย	93
2	อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วย เปลือกกะลามะคาเดเมีย	94
3	อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วย เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	95
4	อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วย เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	96
5	อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วยถ่าน เปลือกกะลามะคาเดเมีย	97
6	อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วยถ่าน เปลือกกะลามะคาเดเมีย	98
7	อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วยถ่าน เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
8	อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	100
9	อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมีย	101
10	อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	102
11	อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมีย	103
12	อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	104
13	อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมีย	105
14	อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	106
15	อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมีย	107
16	อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	108
17	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมีย	109
18	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเคเมียที่แช่โซเดียมคลอไรด์	110
19	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมีย	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
20	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	112
21	ไอโซเทอร์มของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	113
22	ปริมาณดินเหนียวปนทราย (10, 20, 30, 40 และ 50 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อม	114
23	ปริมาณดินเหนียวปนทราย (60, 70, 80 และ 90 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อม	115
24	ประสิทธิภาพของอัตราส่วนถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายกับร้อยละการกำจัดสีข้อม โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	116
25	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ (เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 1 – 4) โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	117
26	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ (เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 5 – 8) โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	118
27	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ (เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 9 -12) โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	119
28	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
29	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	121
30	ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	122
31	ประสิทธิภาพตัวดูดซับผสมกับดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกของ ต้นกกกลมกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated lysimeter technique)	123
32	ประสิทธิภาพตัวดูดซับผสมกับดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกของ ต้นรูปฤาษีกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated lysimeter technique)	124

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะเปลือกกะลามะคาเดเมีย กะลามะคาเดเมียที่ผลติดต้น (ก) กะลามะคาเดเมียผ่านการอบ (ข)	5
2	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	22
3	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	25
4	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช	26
5	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	27
6	กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	28
7	ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวดูดซับ สูงสุด	28
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	29
9	กระบวนปลูกพืชชุดควบคุม (ชุดที่ 1) (ก)	43
10	กระบวนปลูกพืชชุดทดลอง (ชุดที่ 2) (ข)	44
11	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	45
12	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	46
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคา เดเมียทั้ง 4 ชนิดกับปริมาณตัวดูดซับ	49
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคา เดเมียทั้ง 4 ชนิดกับพีเอช	52
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคา เดเมียทั้ง 4 ชนิดกับระยะเวลากำจัด	54
16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคา เดเมียทั้ง 4 ชนิดกับความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	57
17	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีของแลงเมียร์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเมีย ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนด์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	59
19	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของโดยเฉลี่ยกับชนิดตัวดูดซับในสถานะที่เหมาะสม	62
20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของปริมาณดินเหนียวปนทราย	64
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของโดยเฉลี่ยกับถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่างๆกัน	66
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของโดยเฉลี่ย (เมื่อใช้งานซ้ำ) กับจำนวนครั้งที่ใช้งาน โดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์	67
23	คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกโดยเรียงลำดับจากชั้นกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียดและส่วนผสมของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับดินเหนียวปนทราย	68
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของ (เมื่อใช้งานซ้ำ) กับจำนวนครั้งที่ใช้งาน โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	70
25	กระเบะปลูกพืชที่ไม่ผสมตัวดูดซับ (ชุดควบคุม) ต้นกกกลม (ก) ต้นรูปไข่ (ค) กระเบะปลูกพืชที่ผสมตัวดูดซับ ต้นกกกลม (ข) ต้นรูปไข่ (ง)	77
26	สีของหลังผ่านการกำจัดในกระเบะปลูกต้นกกกลมและต้นรูปไข่	79

ภาพผนวกที่

1	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเหลือง (Yellow LS-R-01) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร	88
---	--	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
2	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเหลืองส้ม (Yellow LS-4G) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร	88
3	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีดำ (Super Black G) ที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร	89
4	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเทา (Navy LS-G) ที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร	89
5	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีส้ม (Orange LS-BR) ที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร	90
6	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีฟ้า (Blue LS-3R) ที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร	90
7	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีแดง (Red LS-B) ที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร	91
8	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีฟ้าเข้ม (Br.Blue LS-G) ที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร	91
9	กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเทอร์ควอย (Turquoise H-GN) ที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
COD	=	Chemical Oxygen Demand
TSS	=	Total Suspended Solids
TDS	=	Total Dissolved Solid
mg/L	=	milligram per Liter
ppm	=	part per million
λ	=	lambda
cm	=	centimeter
nm	=	nanometer

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง
โดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูก
ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

**Dyes Removal in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project
Using the Mixture of Macadamia Shell and Soils as Growing Materials
in the Constructed Wetland Wastewater Treatment System**

คำนำ

สีย้อม เป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ น้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมในปริมาณสูงจะมีค่าสีย้อมสูง เมื่อปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้น้ำเน่าเหม็นไม่เหมาะสมต่อการนำไปอุปโภคบริโภค ทำลายทัศนียภาพ และขาดแคลนแหล่งน้ำสำหรับไว้ใช้ด้วย อีกทั้งผลในระยะยาวสีย้อมมีผลต่อการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ใต้ผิวน้ำ ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศและทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสียได้

เปลือกกะลามะคาเดเมีย เป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตถั่วมะคาเดเมียในโครงการพัฒนาออยตุง ซึ่งมีปริมาณมากและต้องได้รับการกำจัด แต่การกำจัดเปลือกกะลามะคาเดเมียโดยการเผาจะเป็นการกำจัดทิ้งไปอย่างสูญเปล่า อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมลพิษทางอากาศสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงได้เห็นถึงปัญหาดังกล่าวและหากนำเปลือกกะลามะคาเดเมียที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโครงการพัฒนาออยตุงมากำจัดสีย้อมที่เกิดขึ้นจากโครงการดังกล่าว ซึ่งเป็นการดำเนินการตามนโยบายของเสียเป็นศูนย์ (zero waste) และเป็นการเพิ่มคุณค่าให้กับเปลือกกะลามะคาเดเมียให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากจะช่วยกำจัดสีย้อมที่ปะปนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติแล้ว ยังช่วยลดปริมาณเปลือกกะลามะคาเดเมียอีกด้วย

การกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียนั้น โดยนำมาผสมกับดินเป็นวัสดุเพาะปลูก การศึกษาใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียทั้งแบบไม่เผาและแบบถ่าน และแบบที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของเปลือกกะลามะคา

เคมีและนำมาใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนวัสดุเพาะปลูกกับดินเหนียวปนทรายร่วมกับการปลูกต้นกกกลมและต้นธูปฤาษี เพื่อนำกลับมาหมุนเวียนใช้ประโยชน์ต่อไป



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมีย
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียเป็นตัวดูดซับในวัสดุเพาะปลูก
3. เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ของเปลือกกะลามะคาเดเมีย และลดปริมาณของเสีย

การตรวจเอกสาร

1. เปลือกกะลามะคาเดเมีย

1.1 ความเป็นมาของเปลือกกะลามะคาเดเมีย

มะคาเดเมียเป็นพืชพื้นเมืองของประเทศออสเตรเลีย ถูกค้นพบในปีค.ศ. 1843 โดย Ludwig Leichardt บริเวณอ่าวมอดันใกล้กับเมืองบริสเบน รัฐควีนส์แลนด์ ต่อมาในปีค.ศ. 1857 Sir Ferdinand Jacob Hoinrich von Mueller ชาวเยอรมันร่วมกับ Walter Hill ชาวสก็อต ซึ่งเป็นผู้อำนวยการสวนพฤกษศาสตร์เมืองบริสเบน ได้สำรวจพบมะคาเดเมียแบบผลเดี่ยวที่รัฐควีนส์แลนด์ Sir Mueller จึงได้ขอจดทะเบียนมะคาเดเมียที่พบเป็นพืชสกุลใหม่มีชื่อว่า *Macadamia* เพื่อเป็นเกียรติแก่เพื่อนสนิท คือ Dr. John Macadam ซึ่งเป็นอาจารย์สอนวิชาเคมีอยู่ที่มหาวิทยาลัยเมลเบิร์น Sir Mueller และ Walter Hill จึงถือว่าเป็นผู้ค้นพบมะคาเดเมียที่แท้จริง

ต้นมะคาเดเมียเป็นไม้ไม่ผลัดใบและเป็นพืชพื้นเมืองที่พบในแถบชายฝั่งทะเลบริเวณป่าฝนเขตร้อนในแถบตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนส์แลนด์และตอนเหนือของนิวเซาท์เวลส์ ประมาณปี ค.ศ. 1950 กลุ่มชนพื้นเมืองของประเทศออสเตรเลียเท่านั้นที่รู้จักมะคาเดเมียเป็นอย่างดี และจะทำการเก็บเกี่ยวผลมะคาเดเมียในช่วงฤดูใบไม้ผลิ แต่ไม่มีการปลูกต้นมะคาเดเมียเพิ่มเติม ต่อมาได้พัฒนามาเป็นอาหารที่ผลิตเพื่อการค้า ทั้งนี้มะคาเดเมียมีชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น Queensland nut, Bush nut, Bopple nut และ Bauple nut (ฉันทะวงศ์, 2547)

1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์และสัณฐานวิทยาของผลมะคาเดเมีย

มะคาเดเมียจัดเป็นพืชยืนต้นมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Macadamia integrifolia* Maidenand Betche พืชตระกูลมะคาเดเมียจัดอยู่ในวงศ์ *Proteaceae* series *Folliculares* และ *trube Grevillea* ซึ่งกลุ่มชนพื้นเมืองของประเทศออสเตรเลียรู้จักดีในนาม *Grevillea*, *Hakea* และ *Bucklmgmie* เป็นพืชยืนต้น ลำต้นมีลักษณะตั้งตรงคล้ายปิรามิด ใบมีลักษณะเหมือนหอกหัวกลับสีเขียวเข้ม ขอบใบมีหนามเล็กน้อย ออกดอกเป็นช่อยาวและติดผลเป็นช่อ ผลมีเปลือกสีเขียวที่แข็งและหนา และมีเปลือกสีน้ำตาลอีกชั้นหนึ่งหุ้มเนื้อในที่มีสีขาวเรียกว่า กะลา

ในกะลามะพร้าวเป็นเนื้อแน่นสีขาว รับประทานได้ โดยลักษณะของเปลือกแมคคาเดเมีย มี 2 ลักษณะ คือ Rough and Smooth shell ดังแสดงในภาพที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ลักษณะเปลือกกะลามะคาเดเมีย กะลามะคาเดเมียที่ผลัดคืน (ก) กะลามะคาเดเมียที่ผ่านการอบ (ข)

2. สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับ เส้นใย ซึ่งต้องมีย้อมมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของ สีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น

อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรง แวนเดอร์วาลส์ (van der waals' force) แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้อง

ประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไปบางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสาน และแรงที่ยึดติดทางเคมีที่ดีที่สุดคือ พันธะโคเวเลนต์

2.1 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายชนิดตามชนิดของเส้นใยหรือประเภทของหรือประเภทของผ้าที่จะย้อม สีย้อมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพแบ่งเป็น 2 ชนิด (อัญราพร, 2527) คือ สารสียละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) และสารสียไม่ละลายน้ำเรียกว่า พิกเมนต์ (Pigment) สีย้อมหากจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีมีความซับซ้อนอย่างมากและยากต่อการจดจำ ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงไม่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ ทั้งนี้วิธีการจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานจะง่ายและสะดวกต่อผู้ปฏิบัติงานดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งทางสมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสีย้อมยอมรับและเห็นด้วยของการจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งนำมาจำแนกสีย้อมโดยทั่วไป ดังนี้

2.1.1 สีย้อมตรง (direct dyes)

เป็นสีย้อมประเภทแรกที่ย้อมติดใยผ้าได้โดยตรงไม่ต้องใช้สารช่วยย้อมใดๆ บางครั้งจึงเรียกว่าสีย้อมผ้า แต่ในปัจจุบันการย้อมสีย้อมตรงจะใช้เกลือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ (azo) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสียละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้มีโมโนสี คุณสมบัติในการย้อม ความคงทน ตลอดจนราคาที่แตกต่างกันมาก ซึ่งถ้าเป็นที่มีความคงทนในการย้อมสีดี โครงสร้างก็จะซับซ้อนมากขึ้น โดยจะใช้ย้อมใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

2.1.2 สีย้อมแอคทีฟ (Reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้สามารถย้อมติดใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีคุณสมบัติเป็นแอโอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่างโมเลกุลของสียจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสียจะทำให้สียเข้าไปอยู่ในเส้นใยได้

เมื่อเกิดปฏิกิริยาดั้วสีจะติดกับเส้นใยเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของดั้วสีจะทำให้สีเข้าอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาดั้วสีจะติดกับเส้นใย

2.1.3 สีเบสิก (Basic dyes)

เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ละลายน้ำได้ โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ดั้วสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromophore ให้แก่แคทไอออน (Cation) บางครั้งจึงเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับดั้วสีได้ก่อน เพื่อทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างดั้วสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (mordant) สีกลุ่มนี้มีความสดใสของสี แต่ไม่ทนแสง จึงนิยมใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด

2.1.4 สีแอซิด (Acid dyes)

เป็นสีที่เกิดสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวไอออนที่มีประจุลบ บางครั้งจึงเรียกว่าสีแอนไอออน สีในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสถานะที่เป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้เช่นปอ ป่าน และโพลีเอสเตอร์ ดั้วสีย้อมเกิดจากสารประกอบ

2.1.5 สีเมอร์แดนท์ (Mordant dyes)

มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับสีเบสิก จะมีเพียงกลุ่มสารเคมีที่สามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบ Co-ordinate หรือสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะที่มีความถาวรเพิ่มขึ้น และจะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้นด้วย การย้อมติดสีเมอร์แดนท์ต้องให้ดั้วสีทำปฏิกิริยากับโครเมียมก่อนเพื่อให้คงทนต่อสภาพความเป็นด่าง สีนี้ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน

2.1.6 สีย้อม (Vat dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายจึงติดใยเซลลูโลส สีย้อมนี้เกิดจากสารประกอบอินดิโกและสีแอนทราควิโนน (Aminoanthraquinone) สีย้อมมีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันมากสารประกอบเชิงซ้อนของสีทุกตัวต้องมีหมู่คาร์บอนิลอย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมกันเสมอ เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำจึงต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมทำให้สามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เป็นสารรีดิวซ์ชนิดเดียวกับสีซัลเฟอร์ เมื่อรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (Leuco Compound) มีสีเป็นสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึม เมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศสารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์กลับไปเป็นสภาพที่ไม่ละลายน้ำทำให้ติดลงบนถาวรกับเส้นใย นอกจากนี้สีย้อมยังสามารถใช้ย้อมใยโปรตีนได้โดยตรงเพราะบางชนิดสามารถย้อมติดดีเช่น ไยอครีแลนคอเทลและโพลีเอสเตอร์ผสมฝ้ายสีอ่อนๆ

2.1.7 สีย้อมกำมะถัน (Sulphur dyes)

เป็นสีที่เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ ซึ่งเป็น Cyclic Hydrocarbon เช่น เบนซีน หรือ แนพทาลิน สีย้อมนี้จะติดใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีสภาพเป็นด่างและมีสารรีดิวซ์ โดยสารที่จะนำมารีดิวซ์ที่นิยมใช้เป็นสารละลายโซเดียมซัลไฟด์และโครโมฟอร์ของสีย้อม ประกอบด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์ (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้วจะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

2.1.8 สีย้อมกระจาย (Disperse dyes)

สีนี้ผลิตขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตด ซึ่งเป็นเส้นใยที่ดูดน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัว (dispersing agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกจากสารพา (carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น สีย้อมกระจายแบ่งออกได้อีกเป็น 2 กลุ่มโดยพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีอะโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน ซึ่งสีทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของเฮโรนาโนน

(ethanolamine) $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกันที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ สีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตทหรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย

2.1.9 สีอะโซอิก (Azoic dyes)

สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบอะโซ (Azo) แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า คัปลิง (coupling)

2.1.10 สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex Dyes)

เป็นสีเดิมของส้อมอร์แดนท์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะจะได้สารประกอบที่ให้สีชนิดใหม่ โดยทั่วไปจะนิยมใช้เกลือของโครเมียมมาทำปฏิกิริยา สีชนิดนี้สามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของน้ำย้อม ได้แก่ สีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกรด และสีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกลาง น้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายต้องค่อนข้างบริสุทธิ์ ไม่มีเกลือแร่ปนอยู่

การจำแนกสีมีความแตกต่างของส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยต่างๆ ทำให้สีย้อมติดชนิดของเส้นใยต่างกัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเส้นใยและหมู่ฟังก์ชันนอล (Functional groups) ของเส้นใยกับชนิดของสีย้อมที่ใช้

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยกับประเภทของสีที่ใช้ย้อม

เส้นใย	หมู่ฟังก์ชันนอล	สีย้อมที่ใช้
ขนสัตว์	NH ₂ , COOH, CONH	เอสิค, Metal complex, รีแอคทีฟ
ไหม	NH ₂ , COOH, CONH	เอสิค, Metal complex, เบสิค, วัต
วิสคอส เรยอน	OH-, COOH	ไดเรกต์, วัต, ซัลเฟอ์, รีแอคทีฟ
วิสคอส เรยอน	OH-, COOH	ไดเรกต์, วัต, ซัลเฟอ์, รีแอคทีฟ
เซลลูโลส ไตรอะซิเตต	OCOCH ₃	ดิสเพอร์ส

ที่มา: Johnson (1989)

ตารางที่ 2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีการใช้
สีไดเรกต์ (Direct Dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลาย ค้างอ่อน
สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสกอส	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลาย กรด
สีเบสิค (Basic Dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายฟิ เอช 3-5
สีมอร์แดนท์ (Mordant Dyes)	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว เส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลาย กรด

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีการใช้
สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes)	- เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยา ในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมใน สารละลาย ค่า pH ที่มี โซเดียม ซัลเฟอร์
สีดิสเพอร์ส (Disperse Dyes)	- ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้ น้อยมาก	- อีกลีริก - โพลีเอ สเตอร์ - ไนลอน	- คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว เส้นใย	- แช่เส้นใยใน สารละลาย pH 4.5 - เดิมสีย้อม เพิ่มอุณหภูมิ ให้ได้ 130
สีอะโซอิก (Azoic Dyes)	- เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยา ในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมใน สารละลาย ค่า pH ที่มี โซเดียม ซัลเฟอร์
สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal Complex Dyes)	- ประจุลบ - ละลายน้ำน้อย - สีติดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยใน สารละลาย pH 5-7

ที่มา: Buckley (1992)

2.2. สารช่วยข้อม

สารช่วยข้อมถือเป็นสิ่งจำเป็นในการกระบวนการข้อม เนื่องจากเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สีซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้เร็วขึ้นและทำให้สีติดทนทานสม่ำเสมอ สารช่วยข้อมที่สำคัญและใช้มากมีอยู่ 7 ชนิด ดังนี้

2.2.1 กรด

ใช้สำหรับข้อมใยโปรตีนและไนลอนด้วยสีแอซิด ทำหน้าที่เป็นตัวทำลายสี ทำให้ประจุไฟฟ้าลบในเส้นใยน้อยลงและเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก แอนไอออนจึงสามารถเข้าไปติดภายในเส้นใยยึดตัวสีที่ดูดซึมได้น้อยลงต้องเพิ่มกรดให้มากขึ้น ทำให้ตัวสีซึมกระจายตัวจากส่วนที่ติดสีมากไปยังส่วนที่ติดน้อยทำให้ข้อมได้สีสม่ำเสมอ สีประเภทนี้ต้องการกรดแก่เพื่อสามารถซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น

2.2.2 ค่าง

ใช้สำหรับช่วยข้อมใยเซลลูโลสด้วยสีอะโซอิก แร่ท กัมมะถัน และรีแอคทีฟ สีแร่ทและสีกัมมะถันต้องข้อมในน้ำข้อมที่เป็นค่างแก่และมีสารรีดิวซ์รวมอยู่ด้วย สีอะโซอิกละลายในค่างแก่(โซดาไฟ) ส่วนสีรีแอคทีฟต้องใช้ค่างอ่อน (โซเดียมคาร์บอเนต) ทำหน้าที่ให้โมเลกุลของสีทำปฏิกิริยายึดติดกับโมเลกุลของใยเซลลูโลสได้ดีขึ้น

2.2.3 เกลือ

ใช้สำหรับช่วยข้อมใยขนสัตว์ด้วยสีแอซิดหรือสีแร่ท

2.2.4 สารที่ทำให้สีสม่ำเสมอ

เป็นสารที่ช่วยลดคุณสมบัติการดูดติดเส้นใยของสีให้ช้าลง ทำให้สีติดเส้นใยสม่ำเสมอสารประกอบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า Surface Levelling Agent ปฏิกิริยาของสารนี้แบ่งออกเป็น 2 ชั้น สารประเภทนี้เป็นสารที่ดูดติดเส้นใยได้ง่าย ในขั้นต้นจึงแข่งขัน

ซึมเข้าไปภายใน เส้นใย ดังจะเห็นได้จากการย้อมขนสัตว์หรือไนลอนที่สีติดเส้นใยได้เร็วมา ขณะเดียวกันสารเคมีนี้จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่สีย้อมเพื่อรักษาสภาพเดิมของตัวสีไว้ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำรวมตัวกันเป็นสารประกอบสมบูรณ์ชนิดใหม่ จึงทำให้สีรวมตัวกับเส้นใยได้ช้าลง

2.2.5 สารพา (Carriers)

เป็นสารที่มีคุณสมบัติทำให้สามารถย้อมสีเข้มได้แม้ใช้กระบวนการย้อมปกติ โดยมากใช้เป็นสารช่วยในการย้อมใยโพลีเอสเตอร์ ทำหน้าที่โดยดูดติดอยู่ที่ผิวเส้นใยก่อน เมื่อสีเข้าไปติดตัวสีจะละลาย เส้นใยจะดูดติดสีไว้ได้มากขึ้น ระดับการติดสีก็จะเพิ่มขึ้น

2.2.6 สารละลายอินทรีย์

ใช้เป็นสารช่วยย้อมสำหรับย้อมขนสัตว์และไนลอนในกรณีที่ใช้ย้อมละลายน้ำได้น้อย จะทำให้การย้อมได้ผลดีขึ้น รวดเร็วขึ้น และเส้นใยจะมีลักษณะดีกว่าการย้อมตามปกติ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะสารละลายอินทรีย์สามารถก่อเป็นเยื่อบางๆภายในเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ซึมผ่านเข้าไปติดเส้นใยได้เร็วขึ้น

2.2.7 สารรีดิวซ์

ใช้กับสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กลงจนสามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเส้นใยได้ สารรีดิวซ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมและใช้สารตัวอื่นช่วยให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น เมื่อย้อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต้องทำให้ตัวสีนั้นกลับเป็นตัวสีที่ไม่ละลายน้ำตามเดิม

3. น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในปริมาณสูงจนกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและน่ารังเกียจของคนทั่วไป และก่อให้เกิดปัญหาต่างๆแก่แหล่งน้ำซึ่งทำหน้าที่รองรับ เช่น ทำให้น้ำเหม็นหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

3.1 น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนรวมทั้งกิจกรรมที่เป็นอาชีพด้วย ตัวอย่างน้ำเสียชุมชน ได้แก่ น้ำเสียของหมู่บ้าน อำเภอ จังหวัด เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าน้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียของสาธารณะ ซึ่งหน่วยราชการควรเป็นผู้รับผิดชอบในการดำเนินการบำบัดให้กลายเป็นน้ำสะอาดพอเพียงที่จะทิ้งลงลำน้ำสาธารณะได้

3.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หมายถึง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตมักเป็นน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดต่างๆ ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ล้างถังผสมหรือถังปฏิกริยา ล้างท่อสารเคมีล้างวัตถุดิบ ล้างผลผลิต ล้างชิ้นงานก่อนชุบโลหะ ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ส่วนประกอบของน้ำเสียมักเกี่ยวข้องกับวัตถุดิบผลผลิต หรือสารเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกริยาหรือระหว่างการผลิต ฯลฯ การเลือกพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์มักพิจารณาจากปัจจัยข้างต้นเช่นกัน จะเห็นได้ว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตมักเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกค่อนข้างมาก แต่อาจไม่ใช่ส่วนที่มีปริมาณมากที่สุด การทิ้งน้ำเสียส่วนนี้อาจเป็นแบบไหลต่อเนื่องหรือเป็นถังๆ ก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่กระบวนการผลิตที่ใช้ในแต่ละโรงงานอุตสาหกรรม

4. โซเดียมคลอไรด์

โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl) เป็นชื่อเรียกทางสารเคมี ซึ่งโดยทั่วไปอาจคุ้นเคยกับคำว่า “เกลือแกง” เกลือ เป็นสารประกอบของธาตุโซเดียม มีขนาดรัศมีอะตอมเท่ากับ 1.5 อังสตรอม และธาตุคลอรีน (Cl) ขนาดรัศมีอะตอมเท่ากับ 1.00 อังสตรอม ในอัตราส่วนจำนวนโมลที่เท่ากันคือ 1:1 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 54.44 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.165 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 801 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกขาว มีรสเค็ม ละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 35.7 กรัม ต่อ น้ำ 100 มิลลิลิตร และสามารถละลายที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 39.8 กรัมต่อ น้ำ 100 มิลลิลิตร และเกลือถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ สำหรับใช้ในการปรุงรส รวมทั้งการใช้ในครัวเรือน

ปัจจุบันเกลือที่ผลิตและวางจำหน่ายตามท้องตลาดหรือตามห้างสรรพสินค้า นั้น มีความบริสุทธิ์ได้ถึง 99.99 % โดยเกลือบางประเภทอย่างเช่นเกลือสมุทร ซึ่งมีความบริสุทธิ์มีคุณสมบัติเป็นเกลือก็สามารถนำมาประกอบอาหารได้เช่นกัน อีกทั้งราคาไม่แพงและประหยัดต้นทุนการผลิตอาหาร (มานพ, 2545)

5. น้ำเสียและลักษณะสิ่งสกปรกที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การแบ่งประเภทแหล่งกำเนิดน้ำเสีย ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

5.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมาจากแหล่งต่างๆที่สำคัญ 4 แหล่ง คือ

5.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อมพิมพ์และการตกแต่ง น้ำส่วนนี้จะปล่อยออกมาหลังการผลิต กระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดน้ำเสีย ได้แก่ กระบวนการลอกแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสีและการตกแต่ง และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตนี้จะมี ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูงกว่าและมีปริมาณน้ำที่ออกมาน้อย ซึ่งจะแตกต่างตามลักษณะของ เส้นใย ส่วนในกระบวนการฟอกย้อมที่ใช้หลังจากการฟอกย้อมหรือพิมพ์นั้น น้ำเสียส่วนนี้จะมี ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกน้อยกว่าและมีปริมาณน้ำเสียออกมามากกว่าจากกระบวนการฟอกย้อม

5.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ กระบวนการฟอกย้อมหรือพิมพ์มักจะใช้หม้อน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ เมื่อไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงจะช่วยเพิ่ม ปริมาณน้ำให้กับน้ำย้อม และส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณน้ำเสียด้วย

5.1.3 น้ำหล่อเย็น กระบวนการฟอกย้อมจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้เย็นลง ก่อนนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ จึงต้องใช้น้ำหล่อเย็นในกระบวนการ

5.1.4 น้ำที่ใช้ล้างเครื่องจักรและการทำความสะอาดโรงงาน ซึ่งน้ำส่วนนี้อาจมีน้ำเสีย ที่มีความสกปรกสูง เช่น น้ำล้างถังเตรียมสี

5.1.5 น้ำจากแหล่งอื่น ๆ เช่น น้ำจากการบริโภคอุปโภคของพนักงาน

5.2 ลักษณะสิ่งสกปรกในน้ำเสีย

ลักษณะสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ สามารถจำแนกได้ดังนี้

5.2.1 ปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีข้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน และน้ำมันซึ่งจะเป็นฟลักลุ่มฟิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำทิ้งนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.2.2 ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมต่อลิตร สารที่ทำให้น้ำทิ้งฟอกข้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring)

5.2.3 อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

5.2.4 ปริมาณของแข็ง (total solids) ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ โดยจะปนเปื้อนออกมาในปริมาณมากเกินไปและยากต่อการกำจัด

5.2.5 ความเข้มข้นสูง เนื่องจากการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยมีการดูดซึมสีข้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีข้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีข้อม และถูกปล่อยออกมารวมกับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณของสีข้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีข้อมที่ใช้

5.2.6 โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีข้อมเช่น ทองแดงและตะกั่ว

5.2.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำทิ้งในเครื่องย้อมได้

5.2.8 การปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ส่วนใหญ่ เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

6. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับ ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการ ดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว โดยเคลื่อนย้ายจาก ของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้างการจัดเรียงตัวขนาดและความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่นการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม หลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดินหรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

6.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

6.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่ตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ

6.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

6.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

6.2 รูปแบบของการดูดซับ

6.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waalsadsorption)

เป็นผลมาจากปฏิกริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ อย่างไรก็ตาม การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

6.2.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption)

เป็นลักษณะการเกิดของปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพกระบวนการนี้จะมีขนาดของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayered) ทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ (irreversible) เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้นและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ

6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

6.3.1 ความดัน ความเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ ขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปนกันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความดันสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ซึ่งการแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

6.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC) Chanuwat *et al.*, 2002 รายงานว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับในขณะที่ปริมาตรของสารละลายคงที่ จะทำให้เพิ่มร้อยละของการกำจัดสีขุ่นด้วย

6.3.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไป อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง Mehmet *et al.*, 2009 รายงานว่า จากการทดลองที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากัน แต่มีขนาดต่างกันพบว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถดูดซับปริมาณสีย้อมได้มากกว่า เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายมากการดูดซับจึงเกิดได้ดี

6.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ เป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นั่นคือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

6.3.5 พีเอช การดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนบนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีพีเอชเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH⁻ บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น

6.3.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

6.3.7 เวลาสัมผัส เป็นอิทธิพลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

6.4 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ

6.4.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวเตดซีลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นผิวประมาณ 50 -200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์ที่มีขีดจำกัดมาก

6.4.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

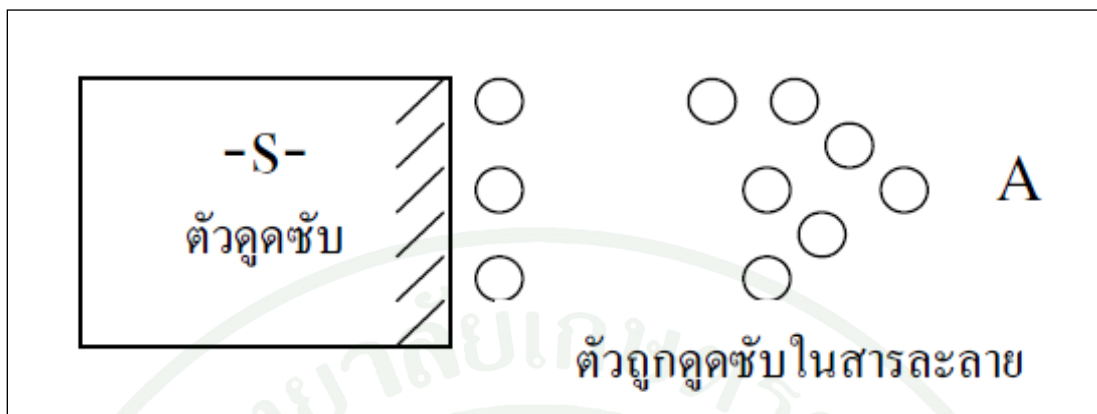
6.4.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

6.4.4 วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลียว ไคโตซาน กาแฟที่เหลือใช้ ชา ฟางข้าว เปลือกไม้ หรือเถ้าแกลบดำ เป็นต้น

6.4.5 สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

6.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลจะถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่



ภาพที่ 2 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

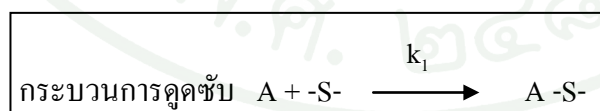
ที่มา: นิพนธ์ และ กนิดา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

S เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

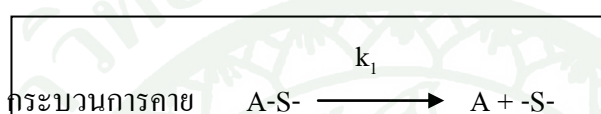
$(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย 1

$$r_2 = k_2(q)$$

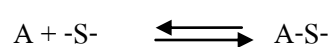
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

$$K = \frac{q}{C} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวล ตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือกิโลกรัม (kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³) หรือลิตร (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

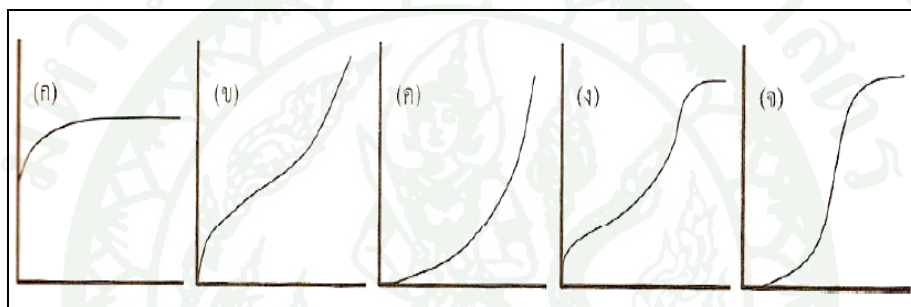
ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \dots\dots\dots (3)$$

6.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงอิทธิพลปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550) อ้างโดย Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียวส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

6.6.1 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finalay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

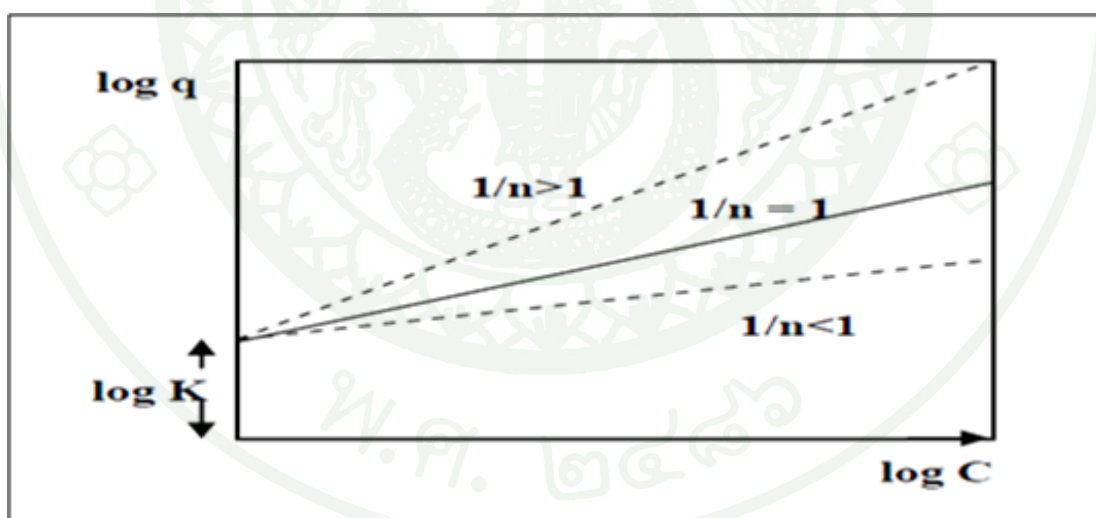
$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots (4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิจ (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอรั่มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

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



ภาพที่ 4 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิจ

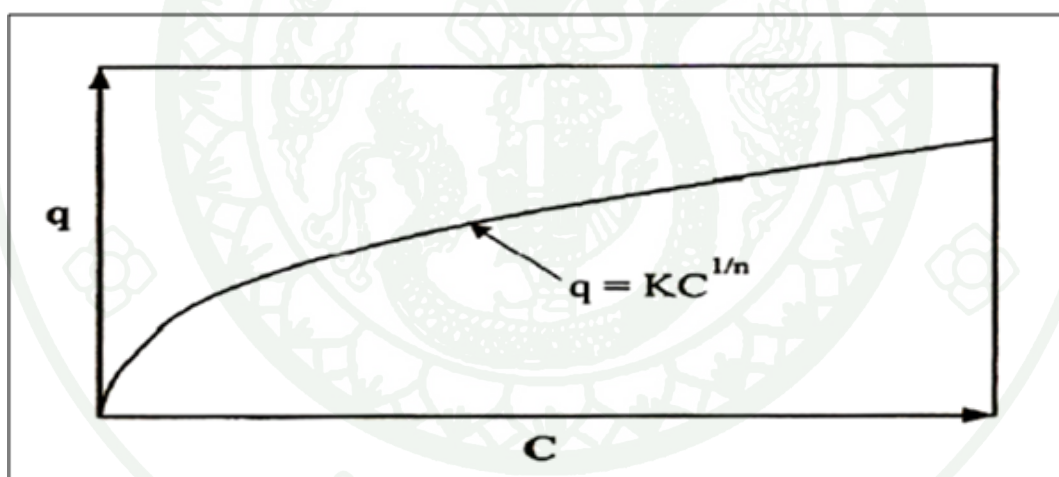
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

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

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

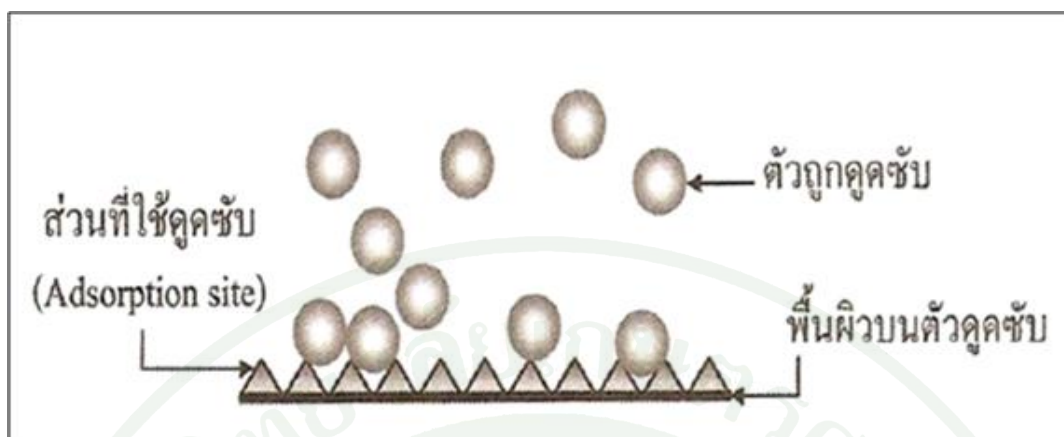
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

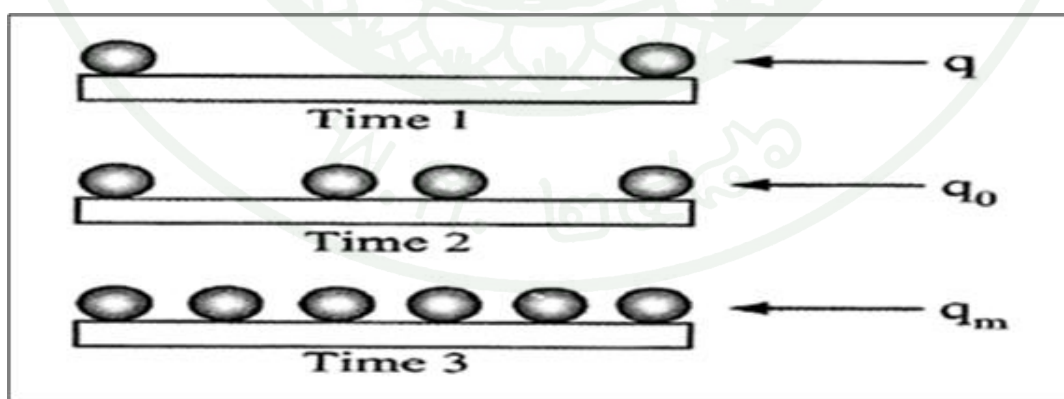
6.6.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



ภาพที่ 6 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้นจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวดูดซับสูงสุดบนผิว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

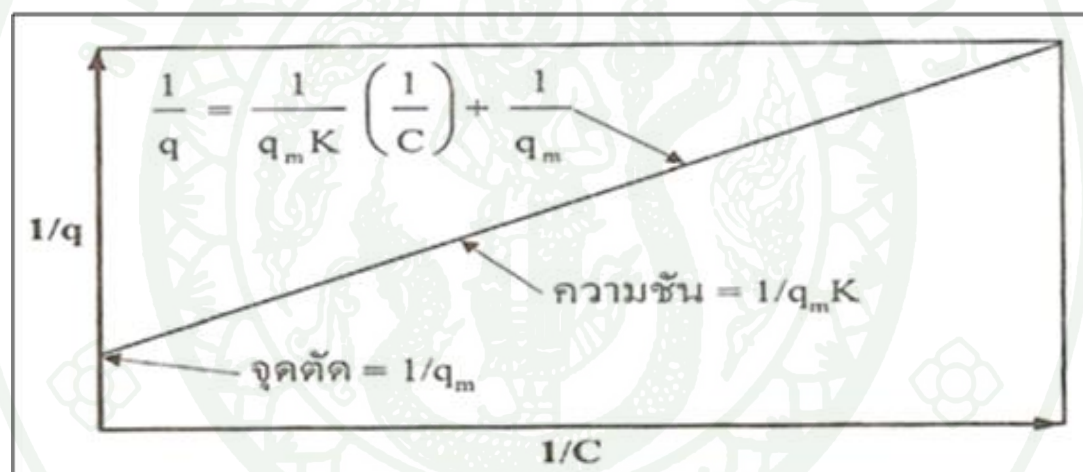
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

$\frac{1}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

7. พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands)

พื้นที่ชุ่มน้ำ คือ เป็นลักษณะของดินที่ชื้นและตลอดเวลา ก่อให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนและที่มีน้ำท่วมขังตื้นๆ ในช่วงฤดูกาลเพาะปลูก (Hammer and Bastian, 1989) หรือเป็นบริเวณพื้นที่ที่ถูกน้ำท่วมขังหรืออ้อมตัวด้วยน้ำ โดยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินที่มีจำนวนครั้งของการท่วมขัง และช่วงเวลาในการท่วมขังนานเพียงพอที่จะทำให้การแพร่กระจายของพืช

พรรณสามารถปรับตัวเจริญเติบโตเป็นปกติได้ภายใต้สภาวะอึดด้วยน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นระบบนิเวศที่เป็นไปตามธรรมชาติและมีความสามารถบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี โดยอาศัยพืชน้ำที่ลอยตัวและจมอยู่ มีจุลินทรีย์และดินเป็นตัวบำบัด (อุดร, 2537)

7.1 ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

7.1.1 พื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติ (natural wetlands) เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาจเป็นลักษณะของหนองน้ำ เช่น ที่ลุ่ม น้ำท่วมขังบางฤดูกาลแต่ไม่ตลอดปี แหล่งน้ำตื้นๆ ที่มีพืชล้มลุกขึ้นอยู่โดยรอบส่วนใหญ่มีบริเวณใกล้เคียงหรือติดอยู่กับแม่น้ำ (estuaries) เช่น บริเวณที่น้ำทะเลถูกเจือจางด้วยน้ำจืดจากแผ่นดินมีไม้ป่าชายเลนขึ้นอยู่หลายชนิด อาทิ ไม้โกงกาง ตะบูน ตันจาก แสม เหงือกปลาหมอ เป็นต้น นอกจากนั้นอาจมีลักษณะเป็นบึง (swamp) เช่น ที่ลุ่มที่มีน้ำท่วมตลอดปีและมีต้นไม้ใหญ่ขึ้นโดยรอบบริเวณบึงที่มีความลึกอยู่พอสมควร (อุดร, 2537)

7.1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือบึงประดิษฐ์ (constructed wetlands) เป็นพื้นที่ที่ถูกออกแบบและมีการก่อสร้างที่จำลองแบบเหมือนพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติ เพื่อใช้งานให้เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ในการบำบัดน้ำเสีย โดยทำการขังน้ำและระบายน้ำไหลอย่างต่อเนื่อง มีพืชพรรณที่อยู่ใต้น้ำและโผล่พ้นน้ำโดยมนุษย์เป็นผู้ปลูก มีสัตว์บกและน้ำอาศัยอยู่ด้วย (Hammer and Bastian, 1989) ปัจจุบันได้มีการเลียนแบบลักษณะของพื้นที่ชุ่มน้ำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น โดยอาศัยกลไกตามธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งสามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมและปัจจัยที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ จึงมีข้อได้เปรียบมากกว่าการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำแบบธรรมชาติ และทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย

7.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยพื้นที่ชุ่มน้ำ

ระบบนิเวศของพื้นที่ชุ่มน้ำประกอบไปด้วยส่วนสำคัญต่างๆ คือ ดินที่อึดด้วยน้ำ หรือถูกน้ำท่วมขัง พืช และจุลินทรีย์ ทำให้เกิดกระบวนการต่างๆ ขึ้นภายในระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น เช่น ภายในดินจะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เกิดการดูดซับ (absorption) การตกตะกอน (precipitation) การกรอง (filtration) เกิดเป็นสารประกอบ

เชิงซ้อน (complexation) ส่วนพืชจะมีกระบวนการดูดซึม (uptake) ธาตุอาหารจากรากเข้าสู่ลำต้น และส่วนจุลินทรีย์ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน โดยกระบวนการดังกล่าวจะช่วยบำบัดหรือเปลี่ยนรูปสารที่เป็นพิษหรืออินทรีย์สารต่างๆที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียให้มีความปลอดภัยต่อแหล่งน้ำมากขึ้น (อุคร, 2537) ซึ่งพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถบำบัด บีโอดี ของแ่งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก ตลอดจนเชื้อโรคบางชนิดได้โดยอาศัยกลไกการบำบัดทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กลไกการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำ

กลไกการทำงาน	ชนิดของสารปนเปื้อนที่บำบัดได้
วิธีการทางกายภาพ -การตกตะกอน -การกรองและการดูดซับ	ของแ่งแขวนลอย สารแขวนลอย บีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก จุลินทรีย์ และเชื้อโรคบางชนิด ของแ่งแขวนลอย และสารแขวนลอย ขนาดเล็ก
วิธีการทางเคมี - การตกตะกอนทางเคมี - การดูดซับและการย่อยสลาย	ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และสารอินทรีย์ ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และสารอินทรีย์
วิธีการทางชีววิทยา - เมตาบอลิซึมของพืชและจุลินทรีย์ - การดูดซึมของพืช	สารแขวนลอย บีโอดี ไนโตรเจน โลหะ หนัก สารอินทรีย์ และเชื้อโรค ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และ สารอินทรีย์

ที่มา: เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (2537)

8. พืชที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย

การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียนั้นจะต้องคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสม ซึ่งควรมีคุณสมบัติเช่น มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูง โดยนำออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านลงไปตามใบ ลำต้น และราก สามารถดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆ ได้ เป็นต้น (สิทธิชัย, 2538) พืชที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ เป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตและทนต่อสภาพน้ำแช่แข็งได้ดีและสามารถบำบัดน้ำเสียได้ คือ กกกลมหรือกกจันทบูรและรูปถ่าย

8.1 กกกลม

กกกลม หรือ กกจันทบูร เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีอายุหลายปี อยู่ในตระกูล Cyperaceae พบทั่วไปตามพื้นที่ลุ่มและ หนองบึง หรือตามดินเลนตามชายทะเล ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ลำต้นใต้ดินคล้ายเหง้าจึงสีน้ำตาลดำ เรียกว่า rhizome ส่วนต่อมาเป็นลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดินมีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็กสีน้ำตาล เรียกว่า stolon ซึ่งส่วนนี้จะบวมโตขึ้นเป็นที่สะสมอาหารแต่ไม่สามารถขยายพันธุ์ได้

สำหรับกกกลมที่ทำการศึกษามีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cyperus corymbosus* Rottb. ชื่อสามัญคือ Sedge ซึ่งเป็นพืชที่โครงการวิจัยและพัฒนาแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ได้วิจัยแล้วลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆกับดอกเท่านั้นที่เป็นสามเหลี่ยม ลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1-2 เมตร ดอกมีขนาดเล็ก เป็นฝอยอยู่รวมกันเป็นช่อ เมื่อยังอ่อนมีสีเขียวอ่อน พออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนและใบประดับของช่อดอกเป็นแผ่นใบยาวเรียว สั้นกว่าความยาวของช่อดอก เป็นกอกที่ปลุกกันมานานทางภาคตะวันออกแถบจังหวัดจันทบุรี ตราด และระยอง แต่จะปลุกมากที่จังหวัดจันทบุรี (ภาวสุระ, 2545)

8.2 รูปถ่าย

รูปถ่าย เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในวงศ์ Typhaceae มีชื่อสามัญว่า narrow leaved cattail ซึ่งแพร่กระจายอยู่เกือบทั่วโลก พบได้ตามหนองน้ำตื้นๆ หรือริมบ่อ สระ และแหล่งน้ำทั่วไป นับว่าเป็นพืชที่แข็งแรงทนทานมากอีกชนิดหนึ่ง ในประเทศไทยพบ 2 ชนิด คือ *Typha latifolia* L. มีใบขนาดใหญ่และอีกชนิดหนึ่งคือ *Typha angustifolia* L. เป็นชนิดพืชที่ใช้ทำการศึกษา ซึ่งมีใบแคบกว่า เป็นพืชหลายฤดูมีต้นเป็นเหง้า ขนาดใหญ่ที่มีปริมาณแป้งสูง ใบเดี่ยวแคบยาวกว่า

1 เมตร ดอกออกเป็นช่อ รูปทรงกระบอก ส่วนปลายช่อเป็นดอกตัวผู้ และโคนช่อสีอ่อนเป็นดอกตัวเมีย ซึ่งมีกาบประดับรองรับ และยอดเกสรมีลักษณะคล้ายเส้นด้าย ละอองเกสรตัวผู้ก่อนที่จะถูกปล่อยออกมาจะแยกกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ และผลมีความยาว 5 – 8 เซนติเมตร (พรรณีย์, 2551)

9. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขจรพงศ์ (2551) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติ โดยสีเขียวจากเปลือกเพกาและสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายซิงคลอไรด์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายซิงคลอไรด์ที่พีเอช 11 และเวลาสัมผัสเท่ากับ 90 นาที สามารถบำบัดสีเขียวได้ร้อยละ 33.10 และสีแดงร้อยละ 31.81 และการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถนำมาทำการดูดซับได้อีกเพียงครั้งเดียวคิดเป็นร้อยละ 89.04 จนมีค่าต่ำลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ในครั้งที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 49.32

จินตนา (2550) ทำการศึกษาถึงการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีไคเร็กท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งพบว่า ผงตัวดูดซับสามารถกำจัดสีย้อมไคเร็กท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นไปตามกลไกของสมการการดูดซับของฟรันทิชและแลงเมียร์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงและปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ ซึ่งทำการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของค่าพีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไคเร็กท์โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

รุ่งนภา (2550) ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำ โดยใช้ แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ไม้ยางพารา และเปลือกยางพาราด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ พบว่า การคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แห้ด้วยกรดฟอสฟอริก 50 องศาเซลเซียสจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนัมเบอร์เท่ากับ 385, 690, 689 และ 719 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมของแต่ละชนิดไปทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมและโลหะหนัก พบว่าขี้เลื่อย ไม้ยางพารามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมและโลหะหนักดีที่สุด

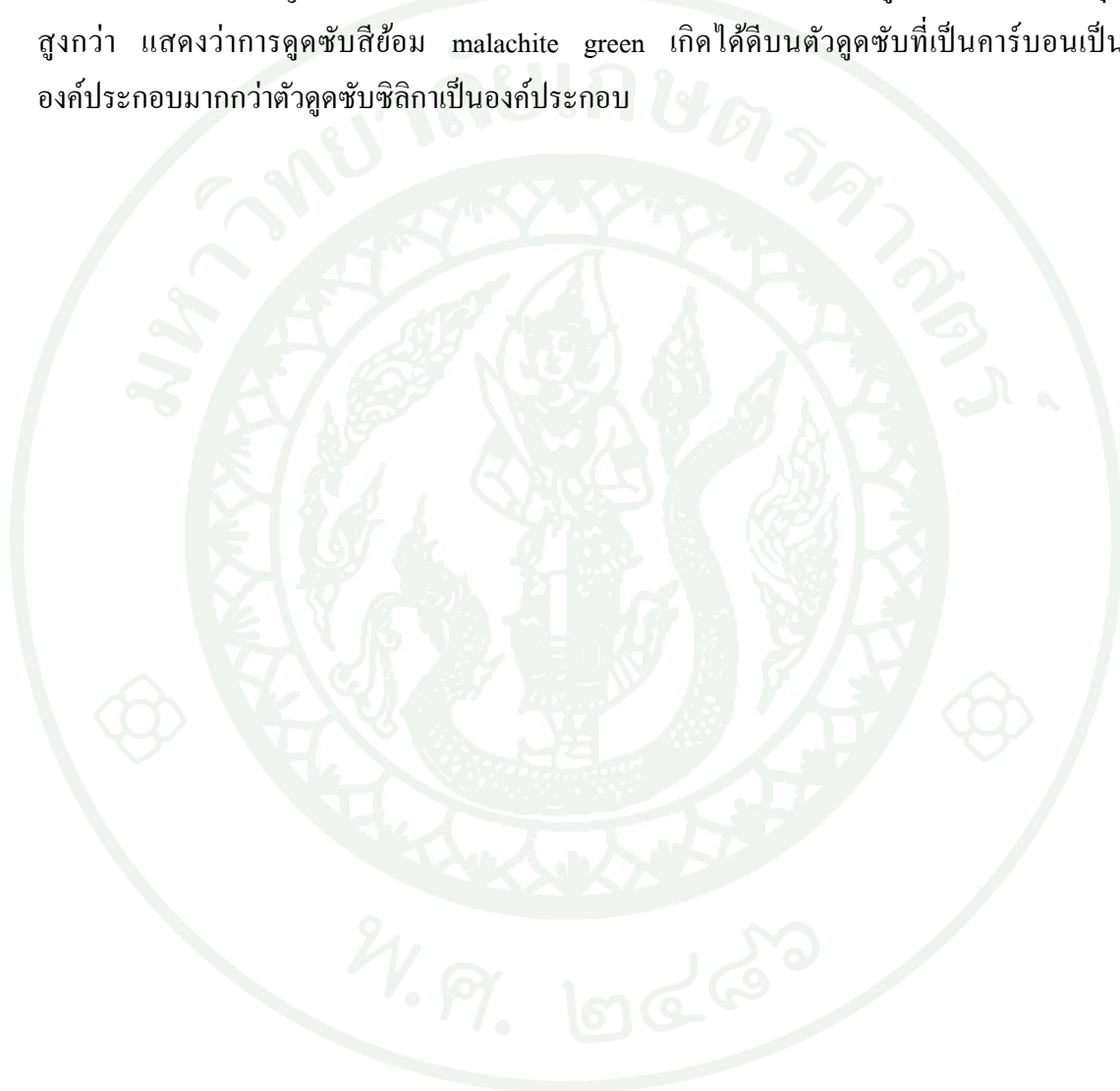
ลลิตา (2544) ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ เปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้เกลือแกง พบว่า วัสดุคิบที่ผ่านการแช่สารละลายอิมตัวของเกลือแกงเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ที่สูง โดยถ่านเปลือกทุเรียนมีค่านัมเบอร์สูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์เท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และผลการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งถ่านเปลือกทุเรียนสามารถดูดซับได้มากกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ศศิธร (2538) ศึกษาประสิทธิภาพของกกกลม(*Cyperus corymbosus*) และแห้วทรงกระเทียม(*Eleocharis dulcis*) ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยทำการสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำแบบน้ำไหลพื้นผิว (RWS) 12 แบบการทดลอง โดยศึกษาประสิทธิภาพ 9 แบบการทดลองที่ศึกษาการเจริญของพืชน้ำ 3 แบบ การทดลองโดยศึกษาระดับความลึก พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปริมาณความสกปรกในน้ำเสียที่ระดับความลึกเท่ากันพบว่า กกกลมมีประสิทธิภาพดีกว่าแห้วทรงกระเทียม และกกกลมมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุดที่ระดับความลึกของน้ำเสียที่ 0.15 เมตร โดยลดปริมาณออร์โธฟอสเฟตฟอสฟอรัส, ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน, ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ, ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและค่าบีโอดีได้มากกว่า 60 %

อรรณพ (2547) ทำการศึกษาสมรรถนะในการดูดซับสีย้อมรีแอทีฟของถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และวัชพืช ซึ่งใช้ถ่านไมยราบยักษ์ ถ่านกะละมะคาเดเมีย ถ่านขังข้าวโพด และถ่านแกลบ ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์รีแอทีฟ 2 สี คือ C.I. Reactive 124 และ C.I. Reactive 141 พบว่า ถ่านแกลบมีอัตราการดูดซับสีสูงสุดจากการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องและถ่านไมยราบยักษ์มีความสามารถในการดูดซับสีดีกว่าถ่านกะละมะคาเดเมีย

Hirata *et al.* (2002) ศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุคาร์บอนที่ผลิตจากเมล็ดกาแฟด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การดูดซับสีขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสบนวัสดุคาร์บอน โดยสีย้อมเมทเทอลินบลูและเจนเทนไวโอเลตถูกดูดซับในรูปพูนหรือบนบริเวณที่มีผิวที่เป็นกรดของวัสดุคาร์บอน ในขณะที่สีย้อมสีส้มมีการดูดซับบนพื้นผิวน้อยมาก แต่จะถูกดูดซับภายในรูปพูนของวัสดุคาร์บอน

Rahman *et al.* (2005) ศึกษาการดูดซับสีข้อมโดยเตรียมตัวดูดซับจากแกลบเพื่อดูดซับสี malachite green 2 แบบ คือ ตัวดูดซับจากแกลบที่ผ่านการล้างด้วยกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา เปรียบเทียบกับแกลบที่ผ่านการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน พบว่า แกลบที่ผ่านล้างเบสมีปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมมูลสูงกว่า แสดงว่าการดูดซับสีข้อม malachite green เกิดได้ดีบนตัวดูดซับที่เป็นคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากกว่าตัวดูดซับซิลิกาเป็นองค์ประกอบ



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophoto meter)

1.2 ตู้อบ

1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

1.4 ตู้ดูดความชื้น

1.5 เครื่องกวน

1.6 เครื่องวัด pH

1.7 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1.8 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน

1.9 กระบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร

2. สารเคมี

2.1 สีย้อม จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง 9 ชนิดได้แก่ Yellow LS-R-01, Yellow LS-4G, Super Black G, Navy LS-G, Orange LS-BR, Blue LS-3R , Red LS-B, Br.Blue LS-G และ Turquoise H-GN

2.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สำหรับใช้ปรับสภาพเปลือกกะลามะคาเดเมีย

2.3 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

3. วัสดุชุดขับ

3.1 เปลือกกะลามะคาเดเมีย

3.2 เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

3.3 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

3.4 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

4. วัสดุเพาะปลูก

4.1 กรวด

4.2 ทรายหยาบ

4.3 ทรายละเอียด

4.4 ดินเหนียวปนทราย

5. พืชที่ใช้ในการวิจัย

5.1 ต้นกกกลม

5.2 ต้นรูปถ่าย

6. น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตตง

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับ 4 ชนิด

1.1 เปลือกกะลามะคาเดเมีย นำเปลือกกะลามะคาเดเมียที่เหลือทิ้งจากโครงการพัฒนา คอยตุ้มตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 1-2 วัน แล้วนำมาทุบให้แตกออกเป็นแผ่น นำไปอบที่ตู้อบที่ อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้อบความชื้น เพื่อใช้ในการ ศึกษาขั้นตอนต่อไป

1.2 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย นำเปลือกกะลามะคาเดเมียจากข้อ 1.1 มาเผาให้เป็นถ่าน โดยใช้วิธีการเผาแบบภูมิปัญญาชาวบ้าน แล้วนำมาทุบให้แตกออกเป็นแผ่น นำไปอบที่ตู้อบที่ อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้อบความชื้น เพื่อใช้ในการ ศึกษาขั้นตอนต่อไป

1.3 เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นการเพิ่ม ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกกะลามะคาเดเมียต่อ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็น 1:1 แล้วนำมาปั่นจนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางและน้ำร้อน แล้วใช้น้ำกลั่นล้างจนมีสภาพเป็นกลาง นำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บตัวดูดซับที่ได้ไว้ในตู้อบความชื้น เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

1.4 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ นำถ่าน เปลือกกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้จากข้อ 1.2 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.3

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อม

2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด โดยชั่งสีย้อมมาตรฐาน 9 ชนิด ชนิดละ 0.02 กรัม สีย้อมแต่ละชนิดมีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ขวดปรับ ปริมาตรเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง

2.2 สารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 9 ชนิด โดยชั่งสีย้อมมาตรฐาน 9 ชนิด ชนิดละ 0.02 กรัม สีย้อมผสมมีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ขวดปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง

2.3 สารละลายมาตรฐานสีย้อม โดยชั่งสีย้อมมาตรฐานชนิดละ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 กรัม โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แต่ละขวดแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

3. การหาความยาวคลื่นที่สีย้อมแต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max})

นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมแต่ละสีที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 มาสแกนหาความยาวคลื่นที่แต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max}) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

การศึกษาใช้สารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมทั้ง 9 ชนิด ที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ และปัจจัยที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาปริมาณเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชั่งเปลือกกะลามะคาเดเมียปริมาณ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400, 420, 594, 616, 434, 588, 546, 666 และ 662 นาโนเมตร ตามลำดับ และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของเปลือกกะลามะคาเดเมียและนำตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกกะลามะคาเดเมียอีก 3 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

ซึ่งเปลือกกะลามะคาเดเมียในปริมาณที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุดจากการทดลองในข้อ 4.1 คือน้ำเสียดังเคราะห์ 20 มิลลิลิตรที่มีการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 และนำตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกกะลามะคาเดเมียอีก 3 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลากำจัด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.2 โดยปรับพีเอชน้ำเสียดังเคราะห์ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุดจากการทดลอง ข้อ 4.2 แปรผันระยะเวลากำจัดเป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง และนำตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกกะลามะคาเดเมียอีก 3 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.4 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียดังเคราะห์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.3 โดยใช้ระยะเวลากำจัดน้ำเสียดังเคราะห์ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุดจากการทดลอง ข้อ 4.3 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียดังเคราะห์เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกกะลามะคาเดเมียอีก 3 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มในการกำจัดสีข้อม

ใช้น้ำเสียดังเคราะห์ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณ 4, 8, 12 และ 16 กรัม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 โดยเลือกชนิดตัวดูดซับที่กำจัดสีข้อมดีที่สุด และตั้งทิ้งไว้นานเท่ากับระยะเวลากำจัดน้ำเสียดังเคราะห์ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุด และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียดังเคราะห์ด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียโดยวิธีการทดลองแบบเบคซ์

ใช้ปัจจัยที่ให้สภาวะการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดได้จากข้อ 4.1 -4.4 ของแต่ละตัวดูดซับมาทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดตัวดูดซับ

5. การเก็บน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ และวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ทำการเก็บน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ นำน้ำเสียมาวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมและดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperture), ของแข็งทั้งหมด (Total Solids), ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Soil), ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ค่าความเค็ม (Salinity), ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO), ค่าความต้องการออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) และค่าความต้องการออกซิเจนที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารเคมี (Chemical Oxygen Demand; COD)

6. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตงด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

นำน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง มาทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ในข้อ 4.6 โดยเลือกชนิดตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดมาทำการทดลอง จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียมาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ

7. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยดินเหนียวปนทราย

ชั่งดินเหนียวปนทรายปริมาณ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้แต่ละปัจจัยที่ให้สภาวะการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดจากข้อ 4.6 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.6 และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

8. ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเปลือกกะลามะคาเดเมียต่อดินเหนียวปนทรายที่ให้ประสิทธิภาพการจัดสีย้อมดีที่สุด โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

โดยใช้แต่ละปัจจัยที่ให้สภาวะเหมาะสมและชนิดตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการจัดสีย้อมที่ดีที่สุดในการทดลองแบบแบตช์จากข้อ 4.6 และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.6 แปรผันตามอัตราส่วนตัวดูดซับต่อดิน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมระหว่างเปลือกกะลามะคาเดเมียต่อดินเหนียวปนทราย

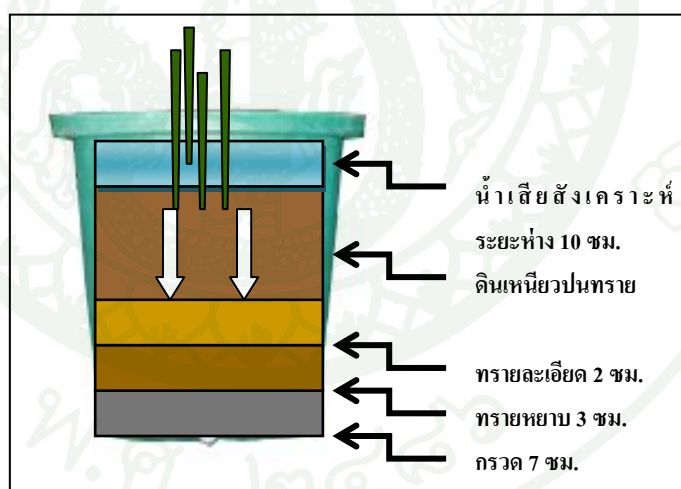
ชุดการทดลอง	เปลือกกะลามะคาเดเมีย : ดินเหนียวปนทราย
1	1:3
2	1:4
3	1: 5
4	1: 6

9. ศึกษาประสิทธิภาพการจัดสีย้อม โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

นำสภาวะที่เหมาะสมแต่ละปัจจัยที่ให้สภาวะการจัดสีย้อมที่ดีที่สุดในการทดลองแบบแบตช์จากข้อ 4.6 และอัตราส่วนผสมตัวดูดซับต่อดินเหนียวปนทรายที่การจัดสีย้อมดีที่สุดจากข้อ 8 มาทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง โดยจำลองการบรรจุวัสดุเพาะปลูกในคอลัมน์แก้วขนาด 5.7 x 37 เซนติเมตร ที่บรรจุลำดับชั้นล่างสุดเป็นกรวด 270 กรัม ต่อด้วยชั้นทรายหยาบ 30 กรัม, ทรายละเอียด 185 กรัม และเปลือกกะลามะคาเดเมียผสมดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนที่ศึกษาได้ แล้วปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงเหนือจากชั้นวัสดุเพาะปลูกที่ระดับ 10 เซนติเมตร ตามหลักการของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

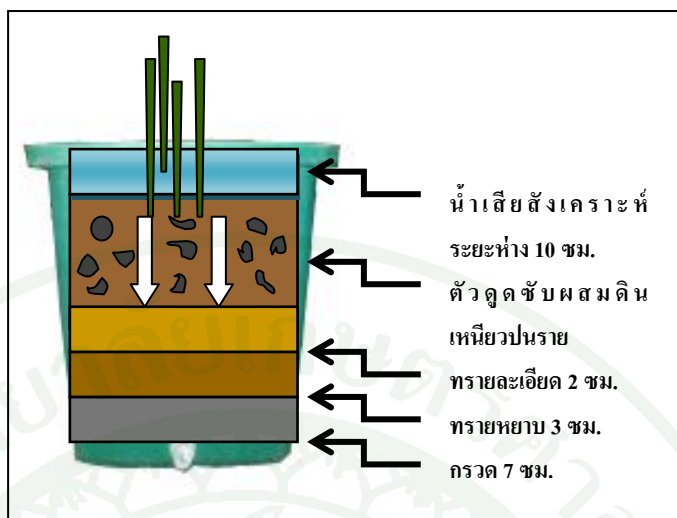
10. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique)

นำกระบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร มาบรรจุวัสดุเพาะปลูกตามลำดับชั้น โดยชั้นล่างสุดเป็นกรวดให้มีความสูง 7 เซนติเมตร ชั้นต่อมาเป็นทรายหยาบสูง 3 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียดสูง 2 เซนติเมตร และเปลือกกะลามะคาเดเมียผสมกับดินเหนียวปนทราย ในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 8 โดยปลูกต้นกกกลมและต้นรูปดาอีจนให้มีความสูงประมาณ 1 เมตรลงกระบะปลูกด้วย การทดลองนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมซึ่งเป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยทำกระบะปลูกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นกระบะปลูกที่ไม่ผสมตัวดูดซับใช้เป็นชุดควบคุม ส่วนชุดที่ 2 เป็นกระบะปลูกที่ผสมตัวดูดซับใช้เป็นชุดทดลอง และทำการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับให้มีสถานะเหมาะสมที่ศึกษาได้ ปริมาตร 11 ลิตร และเก็บน้ำที่ผ่านการกำจัดมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10



ชุดที่ 1 (ก)

ภาพที่ 9 กระบะปลูกพืชชุดควบคุม (ชุดที่ 1) (ก)



ชุดที่ 2 (ข)

ภาพที่ 10 กระบะปลูกพืชชุดทดลอง (ชุดที่ 2) (ข)

11. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

12. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน – เดือนธันวาคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2555

ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถการกำจัดสีย้อม 9 ชนิด ในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการทดลองโดยวิธีแบบแบคซ์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (2-16 กรัม) พีเอช (5-9) ระยะเวลากำจัด (2-10 ชั่วโมง) และความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ (10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ตอนที่ 2 เป็นการทดลองโดยวิธีแบบไหลต่อเนื่อง โดยจำลองการบรรจุวัสดุเพาะปลูกในคอลัมน์ แก้วเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และตอนที่ 3 เป็นการทดลองโดยวิธีเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

1. ลักษณะของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เปลือกกะลามะคาเดเมียและเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย โซเดียมคลอไรด์

นำเปลือกกะลามะคาเดเมียที่เหลือทิ้งจากโครงการพัฒนาคอยดุง เมื่อนำมาผ่าน ขั้นตอนการเตรียมตามวิธีการในข้อที่ 1.1 ทำให้ได้ตัวดูดซับมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กหรือแผ่นและแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 11 และเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตามวิธีการในข้อ ที่ 1.3 จะได้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเดียวกันกับภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เปลือกกะลามะคาเดเมีย

1.2 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียและถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

นำเปลือกกะลามะคาเดเมียที่เหลือทิ้งจากโครงการพัฒนาคอยตุง เมื่อนำมาผ่านขั้นตอนการเตรียมตามวิธีการในข้อที่ 1.2 ทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กหรือแผ่นและแห้งดังแสดงในภาพที่ 12 และเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตามวิธีการข้อที่ 1.3 จะได้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเดียวกันกับภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

2. กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อม

จากการศึกษาทดลองนี้ใช้สีย้อมจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุงทั้งหมด 9 ชนิด ดังนี้ Yellow LS-R-01, Yellow LS-4G, Super Black G, Navy LS-G, Orange LS-BR, Blue LS-3R, Red LS-B, Br.Blue LS-G and Turquoise H-GN ซึ่งใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานสีย้อมแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำมาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 400, 420, 434, 546, 588, 594, 616, 662 และ 666 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 และสมการเชิงเส้นของแต่ละสีย้อมดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้มากที่สุดของสารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด

Dyes	$\lambda_{\max}$ (nm)
Yellow LS-R-01	400
Yellow LS-4G	420
Orange LS-BR	434
Red LS-B	546
Blue LS-3R	588
Super Black G	594
Navy LS-G	616
Turquoise H-GN	662
Br.Blue LS-G	666

ตารางที่ 6 สมการเชิงเส้นของสีย้อม 9 ชนิด

ชนิดสีย้อม	สมการเชิงเส้น	ค่า R^2
Yellow LS-R-01	$Y = 0.820x + 0.360$	0.884
Yellow LS-4G	$Y = 0.720x + 0.383$	0.891
Super Black G	$Y = 0.731x + 0.348$	0.917
Navy LS-G	$Y = 0.682x + 0.409$	0.877
Orange LS-BR	$Y = 0.874x + 0.355$	0.841
Blue LS-3R	$Y = 0.801x + 0.258$	0.869
Red LS-B	$Y = 0.663x + 0.265$	0.889
Br.Blue LS-G	$Y = 0.409x + 0.207$	0.881
Turquoise H-GN	$Y = 0.420x + 0.237$	0.876

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

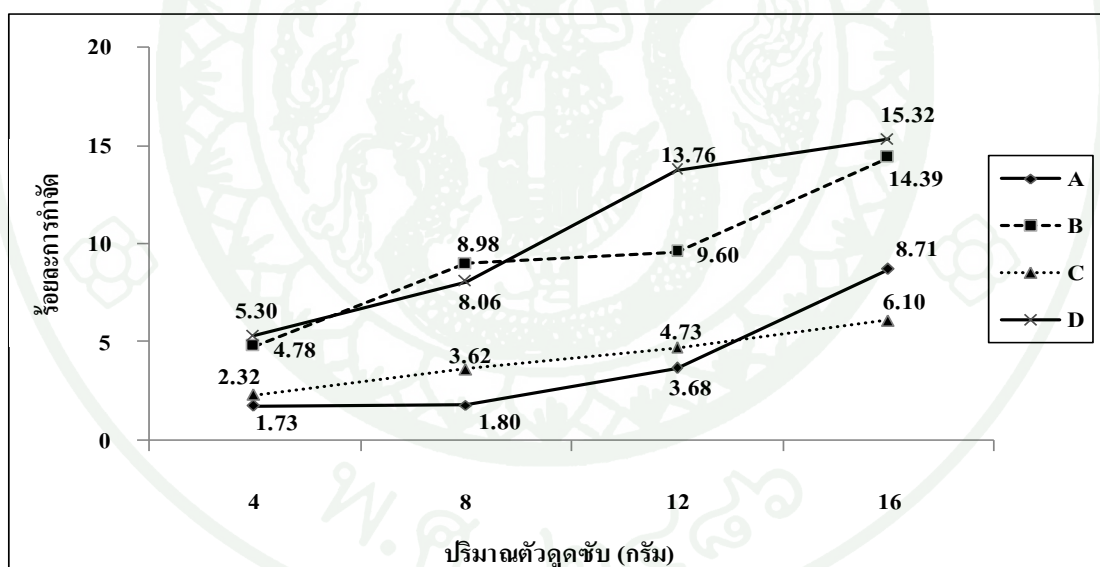
3.1 ศึกษาปริมาณเริ่มต้น

จากวิธีการทดลองในข้อ 4.1 โดยนำเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ เปลือกกะลามะคาเดเมีย, เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณอย่างละ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ผลการทดลองพบว่า เปลือกกะลามะคาเดเมีย, เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์, ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า เปลือกกะลามะคาเดเมีย 4 ชนิด สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณต่าง ๆ กันได้ร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 13 และกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดที่น้ำหนักเท่ากันคือ 16 กรัม โดยให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 8 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อปริมาณเปลือกกะลามะคาเดเมียทุกชนิดเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นด้วย และในภาพที่ 13 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อปริมาณเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการกำจัดสีย้อมมากขึ้นด้วยในขณะที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากัน (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่าเนื่องจากการใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทำให้ถ่านมีความว่องไวในการจับประจุของสีย้อม เพิ่มความบริสุทธิ์ของตัวดูดซับ (All port H.B., 1992) จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปริมาณเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิดที่ 16 กรัม มาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 7 อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีของโคลน

ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการกำจัดสีของโคลน			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
4	1.73	4.78	2.32	5.30
8	1.80	8.98	3.62	8.06
12	3.68	9.60	4.73	13.76
16	8.71	14.39	6.10	15.32



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิด กับปริมาณตัวดูดซับ

ภาพที่ 13 (ต่อ)

หมายเหตุ A คือ เปลือกกะลามะคาเดเมีย

B คือ เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

C คือ ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

D คือ ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 8 ร้อยละการกำจัดสีของน้ำดื่มแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ

ชนิดสีข้อม	ร้อยละการกำจัดสีของน้ำดื่มแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Yellow LS-R-01	5.37	11.76	5.00	14.60
Yellow LS-4G	5.41	12.10	6.24	16.67
Super Black G	7.33	12.66	4.53	11.45
Navy LS-G	8.52	14.09	6.17	13.53
Orange LS-BR	11.06	17.66	7.29	17.24
Blue LS-3R	12.25	11.11	4.86	11.95
Red LS-B	10.72	17.54	6.92	17.06
Br.Blue LS-G	2.45	16.94	7.19	18.46
Turquoise H-GN	11.62	15.68	6.75	16.92

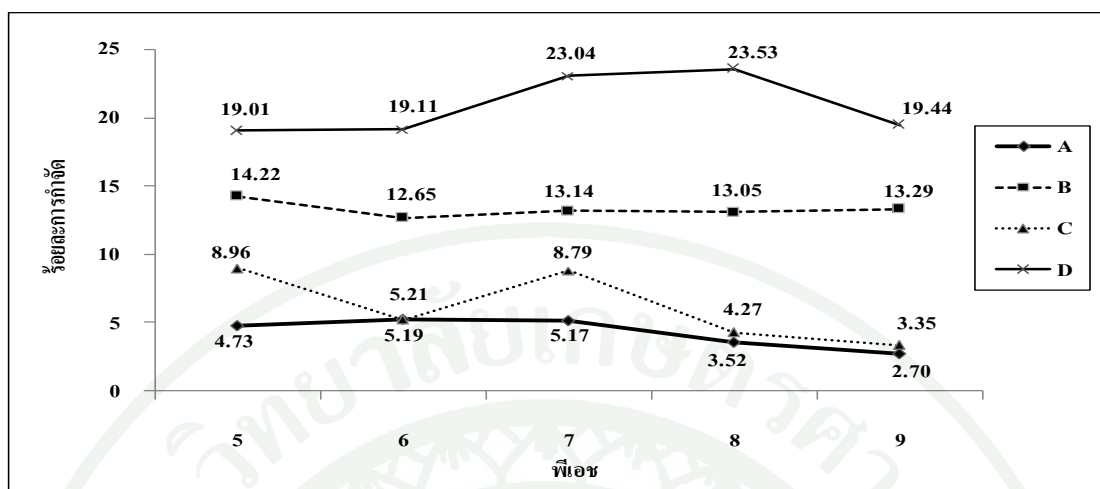
3.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

จากผลการทดลองข้อที่ 3.1 โดยตัวดูดซับ 4 ชนิดที่มีน้ำหนักเท่ากันคือ 16 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำมาทำการศึกษาอิทธิพลของพีเอช 5, 6, 7, 8 และ 9

ผลการทดลองพบว่า เปลือกกะลามะคาเดเมีย 4 ชนิด สามารถกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย สังกะระห์ที่พีเอชต่างๆ กันได้ร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 9 และดังแสดง ในภาพที่ 14 และกำจัดสีข้อมได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากันคือ พีเอช 7 โดยให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละ ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 10 ตามลำดับ จากผลการทดลอง ในภาพที่ 14 จะเห็นว่า ประสิทธิภาพ การกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่พีเอช 5 ถึง 8 และลดลงที่พีเอช 9 อธิบายได้ว่า สภาพพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะแสดงประจุเป็นบวกที่สามารถดึงดูด โมเลกุลของสีข้อมที่เป็นประจุลบได้ เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจึงทำให้เกิดดูดติดสีข้อมมากขึ้นด้วย และใน สภาพพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะแสดงประจุเป็นลบ โดยสีข้อมที่ใช้ใน การทดลอง เป็นสีข้อมประเภทสีรีแอคทีฟ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวได้หมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบซึ่ง ไม่สามารถดึงดูดโมเลกุลของสีข้อมที่เป็นประจุลบได้ จึงทำให้ค่า พีเอช 9 มีการกำจัดสีข้อมลดลง (Malik, 2003) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ พีเอช 7 ที่มีสถานะเป็นกลางมาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 9 อิทธิพลของพีเอชของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ย

พีเอช	ร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ย			
	เปลือกกะลา มะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคา เดเมียที่ปรับสภาพ ด้วยสารละลาย โซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือก กะลามะคา เดเมีย	ถ่านเปลือก กะลามะคาเด เมียที่ปรับสภาพ ด้วยสารละลาย โซเดียมคลอไรด์
5	4.73	14.22	8.96	19.01
6	5.19	12.65	5.21	19.11
7	5.17	13.14	8.79	23.04
8	3.52	13.05	4.27	23.53
9	2.70	13.29	3.35	19.44



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิด กับพีเอช

ตารางที่ 10 ร้อยละการกำจัดสีของแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับพีเอช

ชนิดสีข้อม	ร้อยละการกำจัดสีข้อมของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Yellow LS-R-01	3.81	9.37	7.88	18.45
Yellow LS-4G	4.03	9.86	8.06	18.08
Super Black G	5.25	11.43	8.02	23.17
Navy LS-G	6.38	13.54	9.13	22.89
Orange LS-BR	3.57	10.00	8.65	19.62

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Blue LS-3R	5.24	11.01	9.66	22.33
Red LS-B	6.77	14.99	10.71	24.90
Br.Blue LS-G	6.38	15.51	8.72	28.88
Turquoise H-GN	5.09	13.53	8.28	29.04

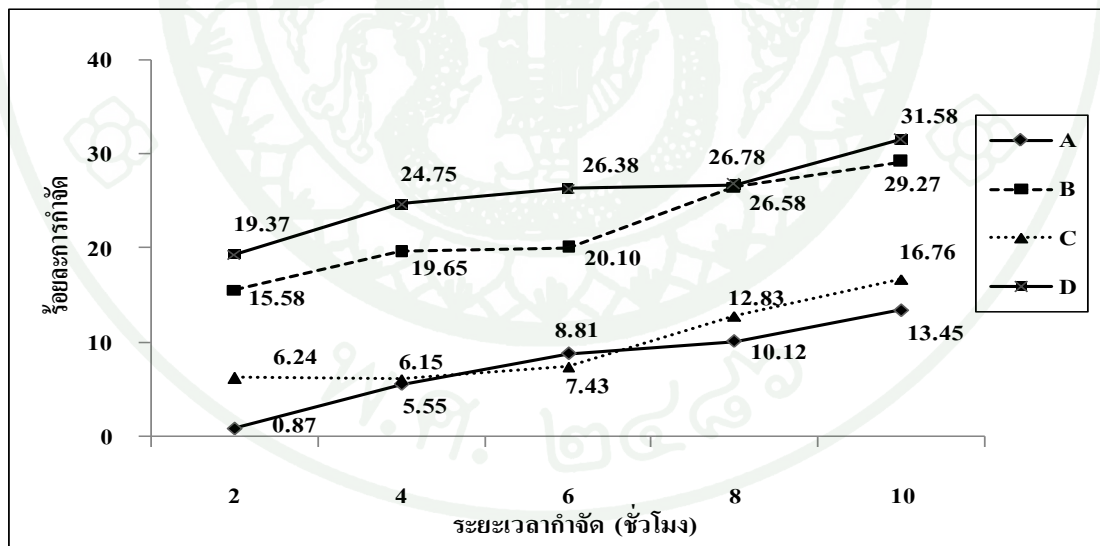
3.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลากำจัด

จากผลการทดลองข้อที่ 3.2 โดยใช้ตัวดูดซับ 4 ชนิด กำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และแปรผันระยะเวลากำจัดเป็น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่า เปลือกกะลามะคาเดเมีย 4 ชนิด สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลากำจัดต่างๆ กันได้ร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยดังแสดงใน ตารางที่ 11 และดังแสดงในภาพที่ 15 และกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดที่ระยะเวลากำจัดเท่ากันคือ 10 ชั่วโมง โดยให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 12 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลากำจัดเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นด้วยและจะลดลงในระยะเวลาหนึ่งอธิบายได้ว่า การเพิ่มระยะเวลากำจัดเป็นการเพิ่มโอกาสให้ตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับมากขึ้น แต่พื้นผิวตัวดูดซับที่มีศักยภาพในการดูดซับก็มีปริมาณจำกัด ทำให้ระยะเวลาต่อมาประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มคงที่และลดลง อาจเนื่องมาจากเกิดกระบวนการคายซับร่วมด้วย (Flavio *et al.*, 2008) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมง มาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 11 อิทธิพลของระยะเวลาการจัด (ชั่วโมง) ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัด สีข้อมโดยเฉลี่ย

ระยะเวลาการจัด (ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ย			
	เปลือกกะลา มะคาเดเมีย	เปลือกกะลา มะคาเดเมียที่ปรับ สภาพด้วย สารละลาย โซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือก กะลามะคา เดเมีย	ถ่านเปลือกกะลา มะคาเดเมียที่ ปรับสภาพด้วย สารละลาย โซเดียมคลอไรด์
2	0.87	15.58	6.24	19.37
4	5.55	19.65	6.15	24.75
6	8.81	20.10	7.43	26.38
8	10.12	26.58	12.43	26.78
10	13.45	29.27	16.76	31.58



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมของเปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิด กับระยะเวลาการจัด

ตารางที่ 12 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับระยะเวลากำจัด

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลา	เปลือกกะลา	ถ่านเปลือก	ถ่านเปลือก
	มะคาเดเมีย	มะคาเดเมียที่ปรับ	กะลามะคา	กะลามะคา
		สภาพด้วย	เคมี	เคมีที่ปรับสภาพ
		สารละลายโซเดียม		ด้วยสารละลาย
		คลอไรด์		โซเดียมคลอไรด์
Yellow LS-R-01	12.75	18.45	7.88	29.57
Yellow LS-4G	14.76	18.08	8.06	26.01
Super Black G	12.32	23.17	8.02	34.08
Navy LS-G	15.23	22.89	9.13	35.95
Orange LS-BR	12.32	19.62	8.65	25.44
Blue LS-3R	12.42	22.33	9.66	34.18
Red LS-B	12.65	24.90	10.71	38.38
Br.Blue LS-G	14.45	28.88	8.72	38.69
Turquoise H-GN	14.22	29.04	8.28	37.16

3.4 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์

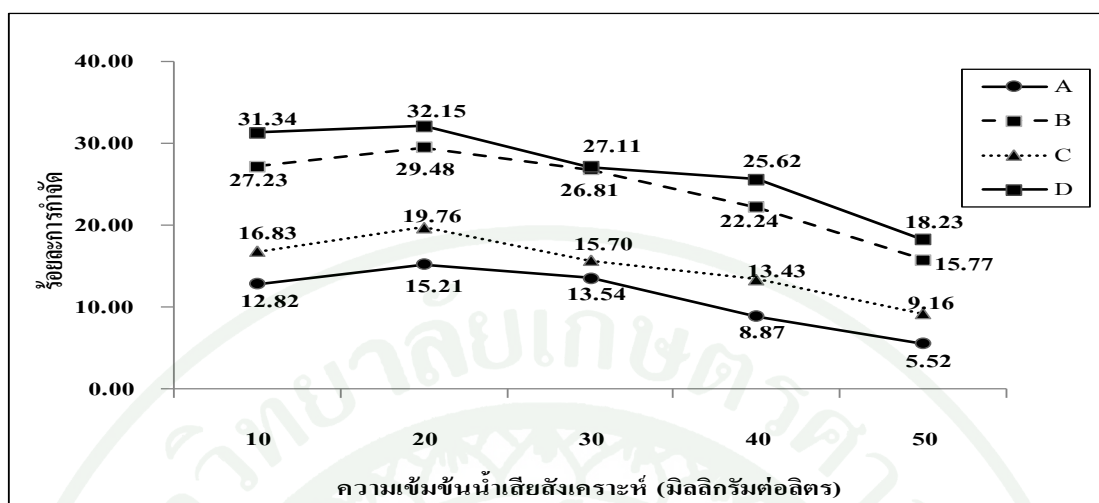
จากผลการทดลองข้อที่ 3.3 โดยใช้ตัวดูดซับ 4 ชนิด ใช้ระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมงต่อ น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำมาทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่า เปลือกกะลามะคาเคมี 4 ชนิด สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆกันได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 13 และ ดังแสดงในภาพที่ 16 และกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากันคือ 20 มิลลิลิตรต่อลิตรโดยให้ ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 14 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้น

เพิ่มขึ้นด้วย อธิบายได้ว่า ความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้การกำจัดสีย้อมลดลง เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 13 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ย			
	เปลือกกะลามะคาเคเมีย	เปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
10	12.82	27.23	14.83	31.34
20	15.21	29.48	19.76	32.15
30	13.54	26.48	17.43	27.11
40	8.87	22.24	15.70	25.62
50	5.52	15.77	10.16	18.23



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการงอกของเมล็ดของเปลือกกะลามะคาเดเมีย 4 ชนิด กับความเข้มข้นน้ำเสียสักระยะ

ตารางที่ 14 ร้อยละการงอกของเมล็ดแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับกับความเข้มข้นน้ำเสียสักระยะ

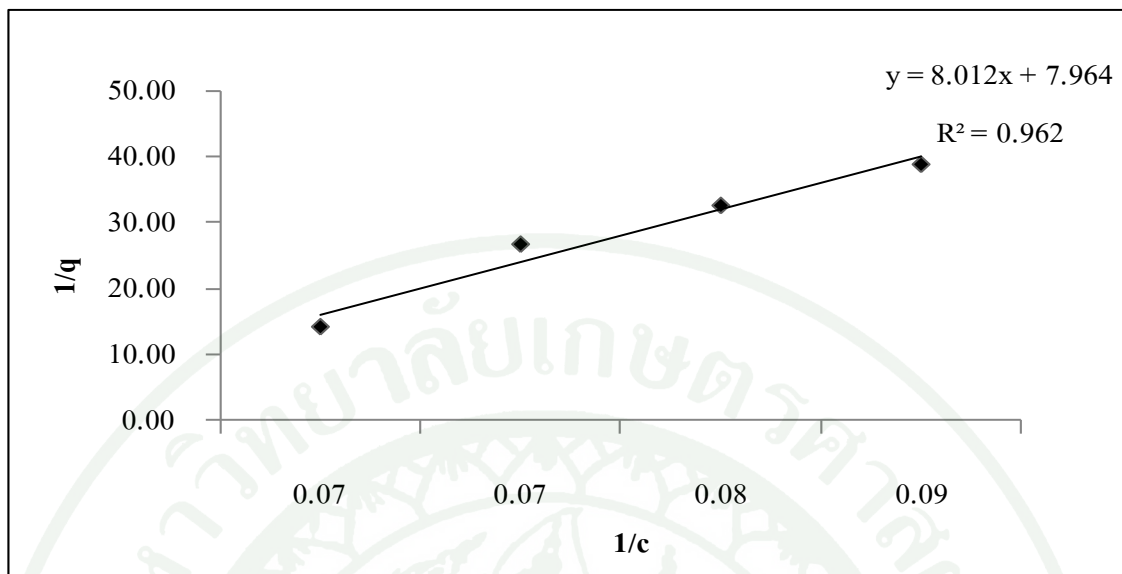
ชนิดสีย้อม	ร้อยละการงอกของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Yellow LS-R-01	14.52	29.62	18.71	31.67
Yellow LS-4G	15.23	30.55	19.73	32.16
Super Black G	13.42	27.65	18.21	30.44
Navy LS-G	15.79	29.78	19.65	32.57
Orange LS-BR	15.76	28.47	17.55	30.11
Blue LS-3R	13.85	26.35	17.44	32.62

ตารางที่ 14 (ต่อ)

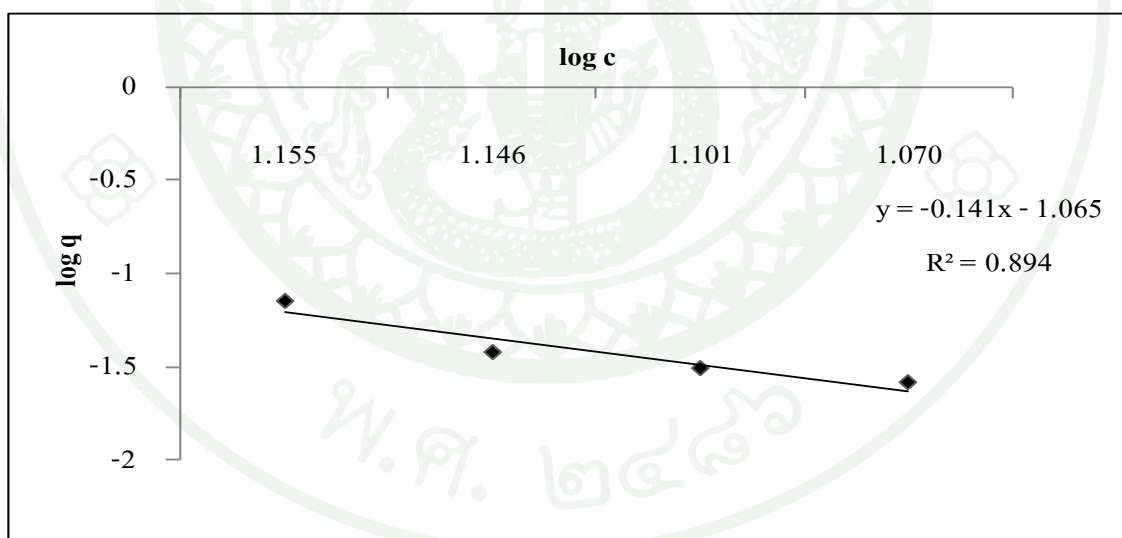
ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลา	เปลือกกะลา	ถ่านเปลือก	ถ่านเปลือก
	มะคาเดเมีย	มะคาเดเมียที่ปรับ	กะลามะคา	กะลามะคาเดเมียที่ปรับ
		สภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	เคเมีย	สภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Red LS-B	14.23	28.72	18.63	30.83
Br.Blue LS-G	15.25	29.40	19.89	31.90
Turquoise H-GN	15.70	29.11	19.81	32.87

3.5 ผลไอโซเทอร์มในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

นำถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 4, 8, 12 และ 16 กรัม ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2-3.4 มาเขียนไอโซเทอร์มการกำจัดสีย้อม และเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-squared) การกำจัดสีย้อมของแลงเมียร์ ($R^2 = 0.962$) มีค่ามากกว่า ฟรุนดลิช ($R^2 = 0.714$) ดังแสดงในภาพที่ 17 และ 18 แสดงว่า กลไกการดูดซับของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นไปตามการดูดซับของแลงเมียร์ อธิบายกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ได้ว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous adsorption surface) และมีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันจนอิ่มตัว (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของแลงเมียร์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนด์ซด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

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

$$1/q = 1/q_m K (1/c) + 1/q_m \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{แทนค่าจากสมการที่ได้ จะได้ } 1/q = 2252 (1/c) - 261.5 \quad \text{----- (2)}$$

จากสมการที่ 2 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/c$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ
นั่นคือ

$$\begin{aligned} 1/q_m K &= 2252 \\ 1/q_m &= -261.5 \\ K &= -0.0038 \end{aligned}$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะดูดซับได้น้อย อธิบายได้ว่า บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับมีปริมาณน้อย จึงเกิดการดูดซับได้น้อย

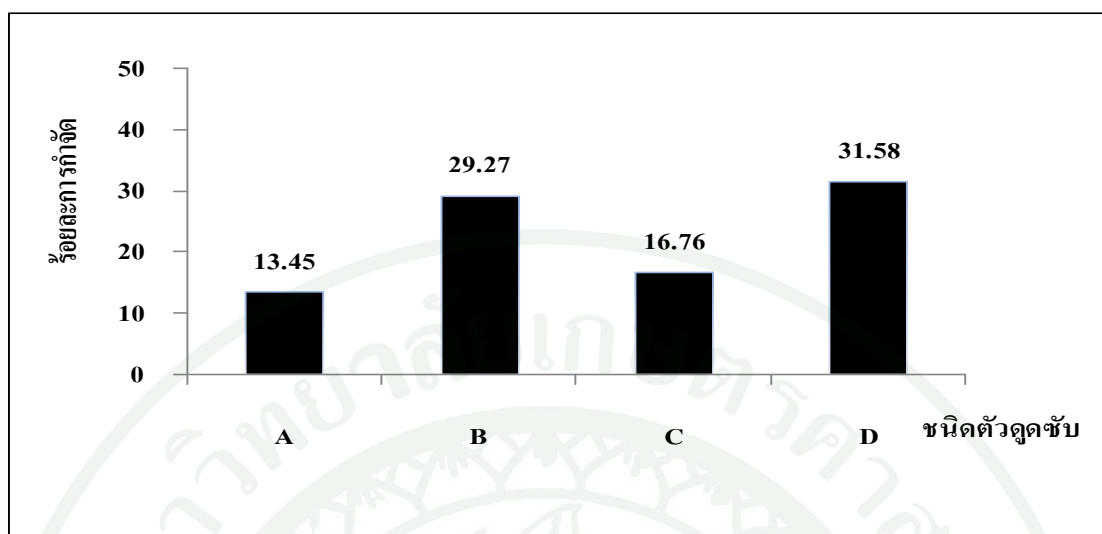
3.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ในสภาวะที่เหมาะสมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย โดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์

จากผลการทดลองแบบเบดซ์ โดยใช้ตัวดูดซับ 4 ชนิดอย่างละ 16 กรัม มากำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 และระยะเวลาการกำจัดเท่ากับ 10 ชั่วโมง ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ เปลือกกะลามะคาเดเมียทั้ง 4 ชนิด โดยให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิดและร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 15 และดังแสดงในภาพที่ 19 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยมากกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีการปรับสภาพ และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุด เนื่องจากว่าคุณสมบัติของตัวดูดซับที่เป็นถ่านจะมีพื้นที่ผิวมากและมีรูพรุนหรือโพรงภายในของคาร์บอนมาก เพื่อให้สามารถจับโมเลกุลของสารอินทรีย์หรือ อนินทรีย์ได้จำนวนมากและติดที่ผิวได้ ดังนั้น พื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) มากด้วย (เพ็ญลักษณ์, 2547) และถ่านที่ได้จากเผาไม้สภาพเป็นประจุลบ มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวคาร์บอน

อะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขวางด้วยคาร์บอนอนสัณฐาน เมื่อนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยที่โซเดียมไอออน (Na^+) จะแทรกเข้าในถ่านซึ่งเป็นประจุลบแล้วจับขั้วโมเลกุลกัน ทำให้เปิดรูพรุนที่ถูกปิดและสร้างรูพรุนใหม่ขึ้นด้วย (Jankowska *et al.*, 1991) จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าเปลือกกะลามะคาเดเมียอีก 3 ชนิด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมต่อไป

ตารางที่ 15 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของชนิดตัวดูดซับในสภาวะที่เหมาะสม

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของชนิดตัวดูดซับ			
	เปลือกกะลามะคาเดเมีย	เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย	ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
Yellow LS-R-01	12.75	29.57	14.4	29.93
Yellow LS-4G	14.76	26.01	16.41	28.50
Super Black G	12.32	30.08	13.76	23.12
Navy LS-G	15.23	33.95	16.37	25.85
Orange LS-BR	12.32	25.44	16.37	28.32
Blue LS-3R	12.42	30.18	13.77	23.83
Red LS-B	12.65	35.38	16.25	30.27
Br.Blue LS-G	14.45	35.69	16.25	32.83
Turquoise H-GN	14.22	34.16	18.32	32.91



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยกับชนิดตัวดูดซับในสภาวะที่เหมาะสม

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ เมื่อนำเปลือกกะลามะคาเคเมีย, เปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์, ถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียและถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาทำการเปรียบเทียบปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งคำนวณโดยแทนค่าในสมการดังนี้

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือลิตร (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

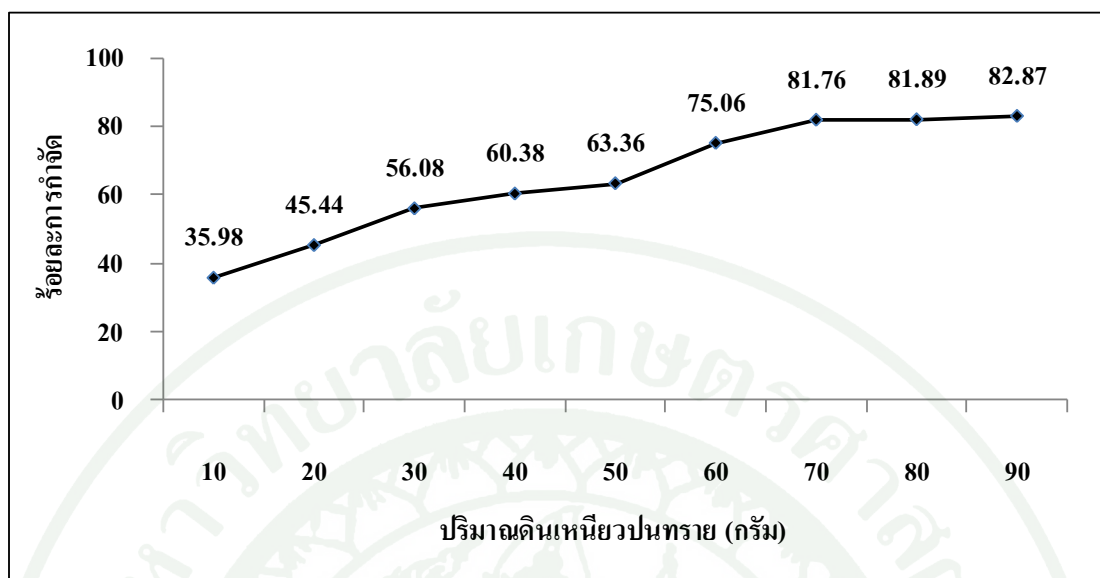
เมื่อแทนค่าในสมการข้างต้น พบว่า เปลือกกะลามะคาเดเมีย, เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์, ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียและถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 16 กรัม สามารถกำจัดสีข้อมผสมได้ 0.0084, 0.0182, 0.0104 และ 0.0197 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จึงได้เลือกถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์นำมาผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมต่อไป

3.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทราย โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

3.7.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเหนียวปนทราย

จากผลการทดลองข้อที่ 3.6 นำดินเหนียวปนทรายที่ปริมาณต่าง ๆ กันคือ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 กรัม ทำการทดลองที่สภาวะที่กำจัดสีข้อมได้ดีที่สุดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ผลการทดลองพบว่า ดินเหนียวปนทรายที่ปริมาณ 80 กรัม กำจัดสีข้อมได้ดีที่สุด โดยให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิดและร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 17 และดังแสดงในภาพที่ 20 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวปนทรายเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดสีข้อมจะเพิ่มขึ้นด้วย และในภาพที่ 19 จะเห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณดินเหนียวปนทรายเพิ่มขึ้นด้วย อธิบายได้เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 3.4 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปริมาณดินเหนียวปนทรายที่ 80 กรัม มาใช้ทดลอง



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของปริมาณดินเหนียวปนทราย

ตารางที่ 16 ร้อยละการกำจัดสีของแต่ละชนิดของปริมาณดินเหนียวปนทราย

ชนิดสี	ร้อยละการกำจัดสีของปริมาณดินเหนียวปนทราย	
	80 กรัม	
Yellow LS-R-01	84.02	
Yellow LS-4G	82.78	
Super Black G	77.77	
Navy LS-G	79.55	
Orange LS-BR	83.44	
Blue LS-3R	77.18	
Red LS-B	80.56	
Br.Blue LS-G	85.98	
Turquoise H-GN	85.77	

3.7.2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทราย

ทำการทดลองที่สภาวะที่กำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากการทดลอง ใช้ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่างๆกันคือ 1:3 (16 กรัม: 48 กรัม), 1:4 (16 กรัม: 64 กรัม), 1:5 (16 กรัม: 80 กรัม) และ 1:6 (16 กรัม: 96 กรัม) มาทำการทดลองที่สภาวะที่กำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด

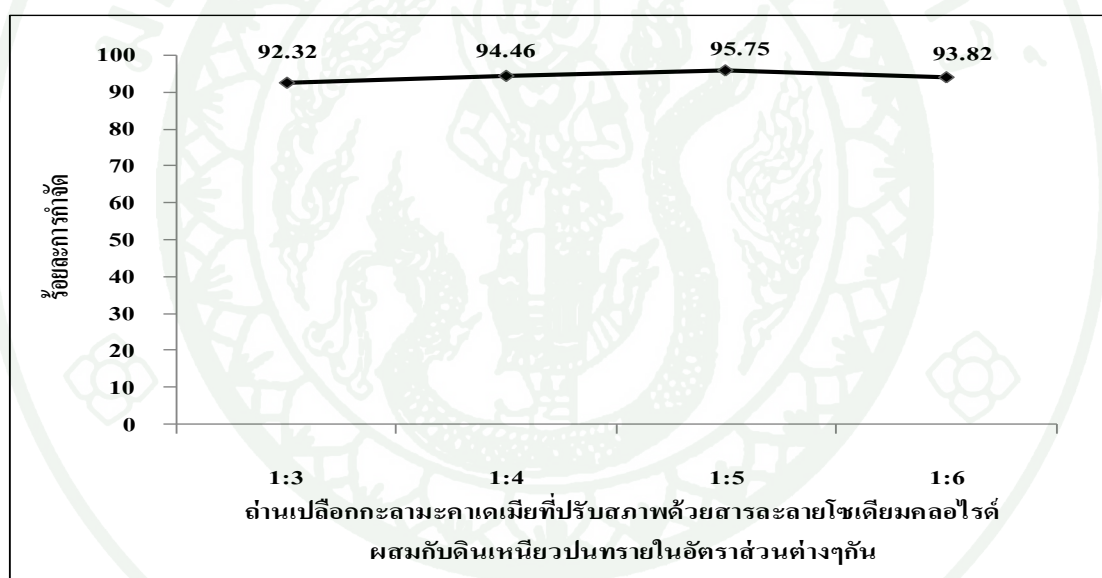
ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1: 5 ให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดและร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนที่ใช้ทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 17 และดังแสดงในภาพที่ 21 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ในแต่ละอัตราส่วนของ การกำจัดสีย้อมให้ร้อยละการกำจัดที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่า ปริมาณดินเหนียวปนทรายไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม แต่ดินเหนียวปนทรายมีประสิทธิภาพช่วยกำจัดสีย้อมได้ดีมาก

ตารางที่ 17 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่างๆกัน

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของอัตราส่วนผสมตัวดูดซับกับ ปริมาณดินเหนียวปนทราย			
	1:3	1:4	1:5	1:6
Yellow LS-R-01	88.14	88.14	96.48	89.66
Yellow LS-4G	91.27	93.90	95.53	93.12
Super Black G	93.53	95.81	96.34	95.33
Navy LS-G	94.00	96.04	96.41	95.64

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีของอัตราส่วนผสมตัวดูดซับกับ ปริมาณดินเหนียวปนทราย			
	1:3	1:4	1:5	1:6
Orange LS-BR	93.15	95.46	94.77	94.79
Blue LS-3R	92.94	95.32	96.19	94.93
Red LS-B	92.57	94.83	96.18	94.48
Br.Blue LS-G	92.48	93.91	94.80	93.05
Turquoise H-GN	92.79	94.59	94.95	93.42

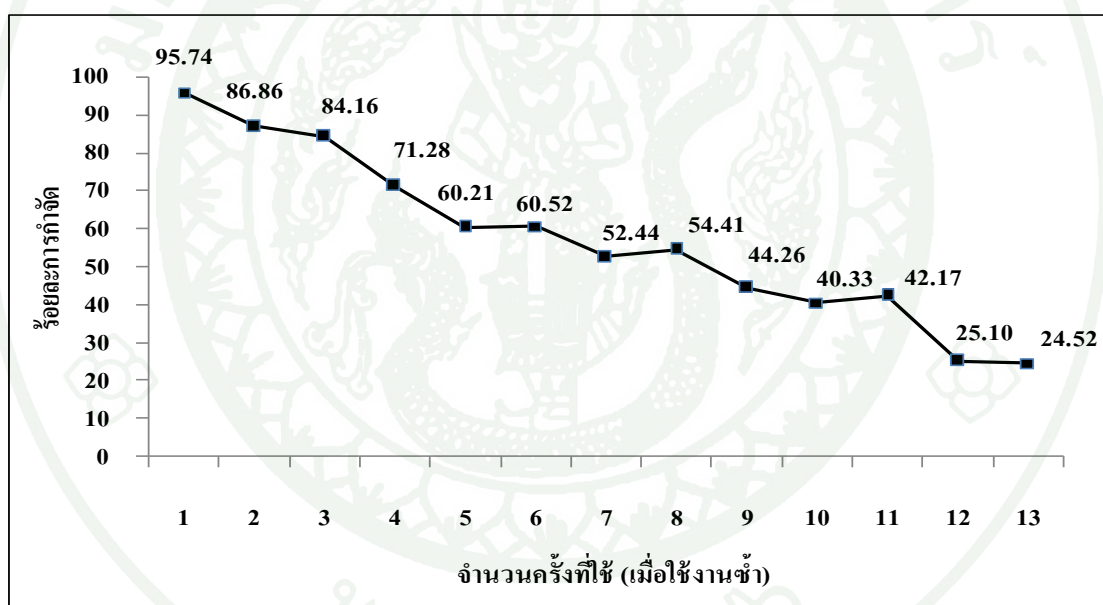


ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโดยเฉลี่ยกับแกนเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน

3.8 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแกนเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทราย เมื่อใช้งานซ้ำ โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

จากผลการทดลองในข้อที่ 3.7.2 นำถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายอัตราส่วน 1:5 กำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 และระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมง แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำมาวิเคราะห์หาสีข้อม นำตัวดูดซับที่กรองได้มาทำการทดลองใช้งานซ้ำต่อเนื่องจนประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายอัตราส่วน 1:5 มาใช้งานซ้ำพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลดลง เมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก และเมื่อใช้งานซ้ำ 13 ครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพลดลงจนเหลือ 24.52 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมโดยเฉลี่ย (เมื่อใช้งานซ้ำ) กับจำนวนครั้งที่ใช้งาน โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

3.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในข้อ 3.7.2 ได้จำลองพื้นที่ปลูกพืชของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยใช้คอลัมน์แก้วขนาด 5.8 x 37 เซนติเมตร ชั้นล่างสุดใส่กรวด 270 กรัม ต่อด้วยทรายหยาบ 30 กรัม, ทรายละเอียด 185 กรัม และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายที่ผสมกัน ในอัตราส่วน 1:5 (ปริมาณตัวดูดซับ 80 กรัม ต่อดินเหนียวปนทรายปริมาณ 400 กรัม) ดังแสดงในภาพที่ 23 และใช้สภาวะที่เหมาะสมจากผลการทดลองโดยวิธีแบบเบตซ์ คือ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 และระยะเวลากำจัดเท่ากับ 10 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่า การบรรจุลำดับชั้นวัสดุเพาะปลูกในแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมดังกล่าว สามารถกำจัดสีย้อมได้ทั้ง 9 ชนิดให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 18 จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า ลำดับชั้นวัสดุเพาะปลูกที่มีส่วนผสมตัวดูดซับถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในแบบจำลองนี้สามารถนำมาผสมกับดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมได้



ภาพที่ 23 คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกโดยเรียงลำดับจากชั้นกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียดและส่วนผสมของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับดินเหนียวปนทราย

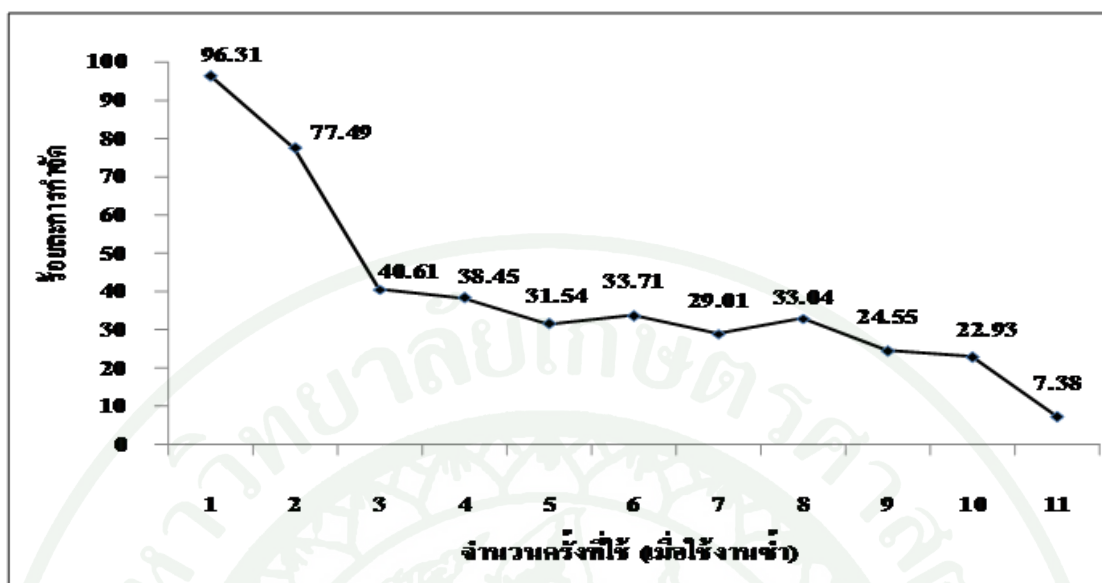
ตารางที่ 18 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมของอัตราส่วนผสมตัวดูดซับกับปริมาณดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5
Yellow LS-R-01	99.49
Yellow LS-4G	94.71
Super Black G	96.71
Navy LS-G	96.94
Orange LS-BR	95.39
Blue LS-3R	95.23
Red LS-B	96.27
Br.Blue LS-G	95.33
Turquoise H-GN	94.84

3.10 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้งานซ้ำโดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในข้อที่ 3.9 ซึ่งทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อที่ 3.9 แต่มีการบำบัดน้ำเสียต่อเนื่องจนประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง เมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก โดยให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมโดยเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 24 จากผลการทดลอง จะเห็นว่า เมื่อใช้ซ้ำหลายๆครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง อธิบายได้ว่า การใช้งานซ้ำ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยสีย้อมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเหลือพื้นที่ผิวอยู่น้อยหรือเต็มพื้นที่ผิวในที่สุด



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีขุ่น (เมื่อใช้งานซ้ำ) กับจำนวนครั้งที่ใช้งานโดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

4. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ได้เก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ในวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2555 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 19 และความเข้มข้นของสีขุ่นแต่ละชนิดดังตารางที่ 20

ตารางที่ 19 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อม ผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง
พีเอช	5.5-9.0	9.3
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3	0.9
ความขุ่น (NTU)	-	46.3
สภาพการนำไฟฟ้า (μs/cm)	-	3,660

ตารางที่ 19 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการคอยดุง
ความเค็ม	-	1.9
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	520
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	166,000
ของแข็งทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 300	165,480
COD (mg/l)	ไม่เกิน 120	809.6
BOD (mg/l)	ไม่เกิน 20	40.43
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.022

ตารางที่ 20 ความเข้มข้นสีย้อมแต่ละชนิดในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนคอยดุง

ชนิดสีย้อม	ความเข้มข้นสีย้อม (ppm)
Yellow LS-R-01	4.49
Yellow LS-4G	4.93
Super Black G	4.75
Navy LS-G	1.25
Orange LS-BR	1.73
Blue LS-3R	1.88
Red LS-B	1.98
Br.Blue LS-G	2.92
Turquoise H-GN	1.67

5. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง
หลังบำบัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

จากผลการทดลองในข้อที่ 3.6 นำน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า จากโครงการพัฒนาออยตุง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาทำการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 16 กรัม โดยปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 และระยะเวลากำจัดเท่ากับ 10 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดดังตารางที่ 21 และผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ดังตารางที่ 22 จะเห็นได้ว่า ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ถึงร้อยละ 84.21 สามารถบำบัดพีเอช, ค่าความขุ่น, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS), ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ของแข็งทั้งหมด (TS) และบีโอดีได้ แต่ไม่สามารถไขมันและน้ำมัน, ค่าความเค็มและสภาพการนำไฟฟ้าได้

ตารางที่ 21 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง หลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมหลังผ่านการกำจัด
Yellow LS-R-01	35.21
Yellow LS-4G	34.55
Super Black G	31.82
Navy LS-G	34.20
Orange LS-BR	32.82
Blue LS-3R	32.70
Red LS-B	36.16
Br.Blue LS-G	37.32
Turquoise H-GN	38.85

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง ก่อนและหลังการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสีย		ร้อยละ การ กำจัด
		ก่อน กำจัด	หลัง กำจัด	
พีเอช	5.5-9.0	9.3	7.8	16.13
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l)	ไม่น้อยกว่า 3	0.9	5.7	84.21
ความขุ่น (NTU)	-	46.3	29.5	36.29
สภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	-	3,660	5,190	-
ความเค็ม	-	1.9	2.1	-
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	520	0.253	99.95
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	166,000	0.036	98.86
ของแข็งทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 300	165,480	0.217	99.68
COD (mg/l)	ไม่เกิน 120	809.6	576	-
BOD (mg/l)	ไม่เกิน 20	40.43	30.75	23.94
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.022	0.028	-

6. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

จากผลการทดลองในข้อที่ 3.7.2 นำถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1: 5 (16 กรัม ต่อ 80 กรัม) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 และระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมง มาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

ผลการทดลองพบว่า ให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดดังตารางที่ 23 และผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงดังตารางที่ 24 จะเห็นได้ว่า ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ถึงร้อยละ 87.75 สามารถบำบัดพีเอช, ค่าความขุ่น, ของแข็งทั้งหมดที่

ละลายน้ำ (TDS), ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ของแข็งทั้งหมด (TS), ไขมันและน้ำมันซีโอดีและบีโอดีได้ แต่ไม่สามารถบำบัดค่าความเค็มและสภาพการนำไฟฟ้าได้

ตารางที่ 23 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง หลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบแบดซ์

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมหลังผ่านการกำจัด
Yellow LS-R-01	62.34
Yellow LS-4G	62.82
Super Black G	49.35
Navy LS-G	48.70
Orange LS-BR	58.10
Blue LS-3R	50.00
Red LS-B	55.93
Br.Blue LS-G	51.41
Turquoise H-GN	52.41

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง ก่อนและหลังการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบแบดซ์

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสีย		ร้อยละ การกำจัด
		ก่อน กำจัด	หลัง กำจัด	
พีเอช	5.5-9.0	9.3	8.2	11.83
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l)	ไม่น้อยกว่า 3	0.9	7.2	87.56
ความขุ่น (NTU)	-	46.3	5.95	87.10
สภาพการนำไฟฟ้า (μs/cm)	-	3,660	4,560	-

ตารางที่ 24 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสีย		ร้อยละ การกำจัด
		ก่อน กำจัด	หลัง กำจัด	
ความเค็ม	-	1.9	2.4	-
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	520	0.225	97.89
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	166,000	0.015	98.99
BOD (mg/l)	ไม่เกิน 20	40.43	18.52	54.21
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.022	0.005	77.34

7. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
ด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปน
ทรายในอัตราส่วน 1:5 โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในข้อที่ 3.9 การกำจัดสีย้อมด้วยการบรรจุลำดับชั้นกรวด, ทรายหยาบ,
ทรายละเอียดและถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับ
ดินเหนียวปนทราย โดยจำลองแบบเหมือนระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมตามโครงการ
ศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริในคอลัมน์แก้ว มาทำการ
ทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย

ผลการทดลองพบว่า ให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 25 จะเห็น
ได้ว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าวิธีการทดลองแบบเบดซ์ แสดงว่า การบรรจุลำดับ
ชั้นวัสดุเพาะปลูกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้

ตารางที่ 25 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา
คอตงหลังผ่านการกำจัดด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วย
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1:5
โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมหลังผ่านการกำจัด	
	วิธีการทดลองแบบแบตช์	วิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง
Yellow LS-R-01	62.34	62.79
Yellow LS-4G	62.82	70.09
Super Black G	49.35	73.13
Navy LS-G	48.70	70.20
Orange LS-BR	50.00	68.59
Blue LS-3R	55.93	68.78
Red LS-B	48.70	71.20
Br.Blue LS-G	50.00	66.00
Turquoise H-GN	55.93	65.26

8. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique)

เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก เป็นการจำลองการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้กระเบปพลาสติกขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร ชั้นล่างสุดบรรจุกรวด 12.4 กิโลกรัม ต่อด้วยทรายหยาบ 8.2 กิโลกรัม, ทรายละเอียด 5.9 กิโลกรัม และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 18 กิโลกรัมผสมกับดินเหนียวปนทรายปริมาณ 90 กิโลกรัม โดยปลูกต้นกกกลมและต้นธูปฤาษีร่วมกับการกำจัดสีย้อมและใส่น้ำเสียสังเคราะห์ลงในแต่ละกระเบปปริมาตร 11 ลิตร แซ่ทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง แล้วปล่อยน้ำเสียออกเก็บมาวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อม และจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเหมือนกับข้างต้นอีก 1 ชุด โดยชั้นบนใส่เฉพาะดินเหนียวปนทรายที่ไม่ผสมตัวดูดซับ ซึ่งใช้เป็นชุดควบคุมการทดลอง ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้างต้น และได้ผลดังแสดงในภาพที่ 25



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 25 กระบะปลูกพืชที่ไม่ผสมตัวดูดซับ (ชุดควบคุม) ต้นกกกลม (ก) ต้นรูปไข่ (ค)
และกระบะปลูกพืชที่ผสมตัวดูดซับ ต้นกกกลม (ข) ต้นรูปไข่ (ง)

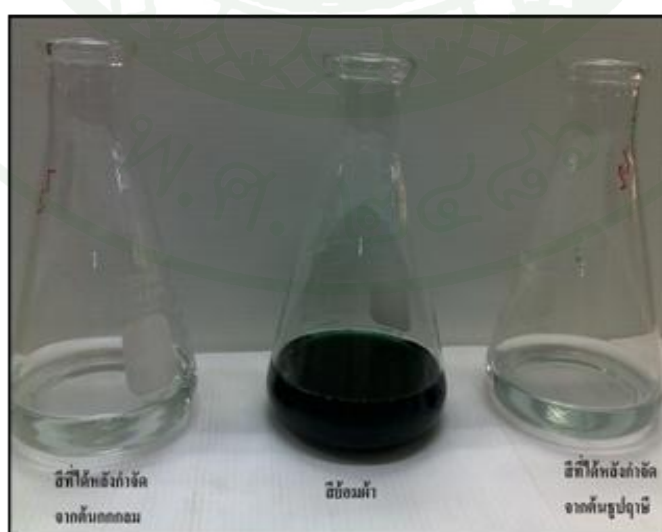
ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมแต่ละชนิดดังตารางที่ 26 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบชุดควบคุมที่ไม่ผสมตัวดูดซับกับกระบะปลูกพืชที่ผสมตัวดูดซับพบว่า กระบะปลูกพืชที่ผสมตัวดูดซับมีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมได้ดีกว่า แสดงว่า ถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายและการปลูกพืชช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพการกำจัดเสียได้ ซึ่งกระบวนการที่ปลูกต้นธูปฤๅษีมีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญโดยปรับเปลี่ยนสื่อน้ำเสียสังเคราะห์จากที่ไม่พึ่งประสงค์ให้มีสีางลงดังแสดงในภาพที่ 26 อธิบายได้ว่า กระบวนการเจริญเติบโตของต้นธูปฤๅษี ส่วนที่เป็นรากของพืชจะช่วยดูดสารอาหารจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในดินและดูดซับสารพิษ(toxin) และอินทรีย์สารให้ลดน้อยลง และย่อยสลายให้หมดไปในที่สุด เพื่อนำไปสร้างความเจริญเติบโตของต้นพืช และย่อยสลายให้หมดไปในที่สุดและเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่การดูดสารอาหารจะลดลงตามระยะเวลาและชนิดของพืชนั้น (สารุกรมไทยในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว, 2555)

นอกจากนี้ การปลูกต้นพืชเป็นการเพิ่มการย่อยสลายของสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในดินโดยปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาจากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำ เพื่อให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น (สุเทียบ, ม.ป.ป.) กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำ จะเกิดกระบวนการต่างๆภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ เช่น ดินเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การดูดซับ(adsorption) การตกตะกอน(precipitation) และการกรอง(filtration) ส่วนพืชมีกระบวนการดูดซึม(uptake) ธาตุอาหารจากรากสู่ลำต้น และจุลินทรีย์จะทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะช่วยในการเปลี่ยนรูปหรือบำบัดสารปนเปื้อนที่อาจเป็นพิษให้อยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ (ลักขณี, 2539) โดยต้นธูปฤๅษีมีโครงสร้างภายในมีคุณสมบัติในการดูดน้ำและธาตุอาหารได้ดี เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า ภายในมีองค์ประกอบของซิลิกอนและแคลเซียมปนอยู่อาจเกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับสีและกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆโดยเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสีที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงและมีจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายโมเลกุลของสีให้หมดไปด้วย (สุมล, 2549)

ตารางที่ 26 ร้อยละการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique)

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการกำจัดสีย้อมหลังผ่านการกำจัด			
	ต้นกกกลม		ต้นรูปถั่ว	
	กระบอกปลูกที่ไม่ผสมตัวดูดซับ	กระบอกปลูกที่ผสมตัวดูดซับ	กระบอกปลูกที่ไม่ผสมตัวดูดซับ	กระบอกปลูกที่ผสมตัวดูดซับ
	(ชุดควบคุม)	ดูดซับ	(ชุดควบคุม)	ดูดซับ
Yellow LS-R-01	36.13	93.95	54.62	94.67
Yellow LS-4G	54.66	96.30	44.07	97.11
Super Black G	36.02	96.13	35.17	97.11
Navy LS-G	44.61	96.44	40.69	97.58
Orange LS-BR	8.72	96.52	41.28	97.17
Blue LS-3R	3.85	95.85	3.85	97.15
Red LS-B	3.51	96.45	5.26	97.47
Br.Blue LS-G	14.55	96.93	7.27	97.03
Turquoise H-GN	25.00	96.89	26.47	97.10



ภาพที่ 26 สีย้อมหลังผ่านการกำจัดในกระบอกปลูกต้นกกกลมและต้นรูปถั่ว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง โดยใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูก โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งส่วนแรกเป็นการทดลองโดยวิธีแบบเบดซ์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีข้อม ส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยวิธีการไหลต่อเนื่อง และส่วนที่สามเป็นการทดลองโดยวิธีเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (filtrated lysimeter technique) ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การทดลองในส่วนแรก เป็นการทดลองโดยวิธีแบบเบดซ์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย 4 ชนิด คือ เปลือกกะลามะคาเดเมีย, เปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์, ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีสถานะที่กำจัดสีข้อมได้ดีที่สุดที่สถานะเดียวกัน คือ ปริมาณตัวดูดซับ 16 กรัม พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 และระยะเวลากำจัด 10 ชั่วโมง สามารถกำจัดสีข้อม 9 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีข้อมแต่ละชนิด 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ได้ร้อยละโดยเฉลี่ย 13.45, 29.27, 16.76 และ 31.58 ตามลำดับ โดยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมดีที่สุด จึงถูกเลือกมาเป็นตัวดูดซับที่จะมาผสมกับดินเป็นวัสดุเพาะปลูกต่อไป และยังพบว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับนี้มีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการกำจัดสีข้อมของแลงเมียร์มีค่ามากกว่าฟรุนดลิช

นำถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วนต่างกันคือ 1:3, 1:4, 1:5 และ 1:6 พบว่า ที่อัตราส่วน 1:5 ในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยร้อยละเฉลี่ยคือ 95.75 และ 54.45 ตามลำดับ จากอัตราส่วนโดยน้ำหนักดังกล่าว ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ถึงร้อยละ 87.75 สามารถบำบัดพีเอช, ค่าความขุ่น, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS), ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ของแข็งทั้งหมด (TS), ไนמןและน้ำมันซีโอดีและบีโอดี

แต่ไม่สามารถบำบัดค่าความเค็มและสภาพการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งได้ร้อยละ 11.8, 87.75, 87.10, 97.89, 98.99, 98.99, 77.34, 68.42 และ 54.21 ตามลำดับ แต่ไม่สามารถลดความเค็มและสภาพการนำไฟฟ้าได้

การทดลองในส่วนที่สอง เป็นการทดลองโดยวิธีแบบไหลต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม โดยจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมตามโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริในคอลัมน์แก้วขนาด 5.8 x 37 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุลำดับชั้นของกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด และถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 (80 กรัม ต่อ 400 กรัม) พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยร้อยละเฉลี่ยดีที่สุดคือ 96.31 และ 68.45 ตามลำดับ

การทดลองในส่วนที่สาม เป็นการทดลองโดยวิธีเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กในกระเบพลาสติกขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร ที่บรรจุลำดับชั้นวัสดุเพาะปลูกโดยการทดลองแบบไหลต่อเนื่องร่วมกับการปลูกต้นกกกลมและต้นรูปฤาษีในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่แช่ทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง พบว่า กระเบปลูกที่ไม่ผสมตัวดูดซับของต้นกกกลมและต้นรูปฤาษีให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยร้อยละเฉลี่ยคือ 25.23 และ 28.74 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละการกำจัดสีข้อมน้อยกว่ากระเบปลูกที่ผสมตัวดูดซับที่มีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยร้อยละเฉลี่ยคือ 96.63 และ 96.16 ตามลำดับ แสดงว่า ถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกสามารถกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อมได้และนำต้นพืชใหม่มาหมุนเวียนกลับไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวิจัยครั้งต่อไปของการทดลองเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มากขึ้นจนผลการศึกษามีค่าคงที่
2. ควรใช้เปลือกกะลามะคาเดเมียเป็นแบบชนิดผงในการกำจัดสีข้อม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสภายในและสามารถกำจัดได้มากขึ้น
3. ศึกษาหาวิธีช่วยการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับด้วยวิธีอื่นๆ เช่น กรดฟอสฟอริก หรือซิงคลอไรด์ เพื่อให้ตัวดูดซับมีความบริสุทธิ์และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมด้วย
4. ศึกษาหาพืชชนิดอื่นๆที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการบำบัดสีข้อมในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เช่น หญ้าแฝก หญ้าเลี้ยงสัตว์ หรือขิงแดง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราบำบัดน้ำเสีย. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- ขจรพงศ์ จูม่น. 2551. การกำจัดสีย้อมธรรมชาติด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จินตนา จุลอุล. 2550. การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไดเร็กซ์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ว.วิจัย. 15 (3) : 56-64.
- ณัฐพงศ์ เชนวิพากษ์. 2547. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวมะคาเดเมีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 2537. ทางเลือกใหม่ของการบำบัดน้ำเสีย ว.วิศวกรรม. 47 (9): 83-84.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ. 2547. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เถ้าของโรงงาน น้ำยางข้น ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณีย์ แดงศรี. 2551. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดและแบคทีเรียก่อโรคในน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบพืชกรองด้วยรูดานีจังหวัดสุพรรณบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาวิสุระ ลิ้มปัสวัสดิ์. 2545. ประสิทธิภาพและคุณภาพน้ำใต้ผิวดินในแปลงทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้หญ้ากรอง บริเวณแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- รุ่งนภา สุขสว่าง. 2550. การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มานพ ดิระรัตนสมโภช. 2545. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลักษณีย์ คณานิธินันท์. 2539. ประสิทธิภาพของกกกลม *Cyperus corymbosus* ฐปฤยาธิ *Typha angustifolia* อ้อ *Phragmites australis* และแห้วกระเทียม *Eleocharis dulcis* ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิตินาจารกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สารานุกรมไทยในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 2555. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชกรองน้ำเสีย. แหล่งที่มา: <http://www.haii.or.th/wiki84/index.php2012.htm>, 17 ธันวาคม 2555.
- สุเทียบ ศรีลาชัย. ม.ป.ป. พืชบำบัดน้ำเสีย. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- สุมด นิลรัตน์นิศากร. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยต้นฐปฤยาธิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สิทธิชัย ดันธนะสฤกษ์ดี. 2538. การใช้ตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศศิธร พุททวงษ์. 2538. ประสิทธิภาพของกกกลม(*Cyperus corymbosus*)และแห้วทรงกระเทียม*Eleocharis dulcis*) ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉราพร ไคตะสุต. 2527. **คู่มือการย้อมสี**. เทคนิค 19 การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

อุดร จารุรัตน์. 2537. การใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย ว.วิศวกรรม. 47 (2): 66-68.

อรรถพล ต้นไทย. 2550. การศึกษาสมรรถนะในการดูดติดสีย้อมรีแอคทีฟของถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัชพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Abrahart, E.N. 1997. **Dye and Their Intermediates**. 2nd ed. Edward Arnold, Inc., London.

Buckley, CA. 1992. Membrane Technology for the treatment of dyehouse effluents. **Sci.Tech** 25 (5): 203-209.

Flavio A. Pavan, L.P. Silvio., C. L. Eder. and V. B. Edilson. 2008. Utilization of powdered peanut hull as biosorbent for removal of anionic dyes from aqueous solution. **Dyes Pigments** 76 (28): 64-69.

Hammer, D.A. and R.K. Bastian. 1989. **Wetland Ecosystems: Natural Water Purifiers**, pp. 5-19. Lewis Publishers, Inc., Michigan.

Jankowska, H., A. Swiatkowski, and J. Choma. 1991. **Active Carbon Poland Ellis Horwood Limited**.

Johnson, A. 1989. **The theory of Coloration of Textiles**. England: Society of Dyes and Colorist.

Lian, L., G. Liping, and G. J. Chunjing. 2009. Removal efficiency of hazardous waste in landfill and wastewater. **Hazard Mater** 56(20): 126-131.

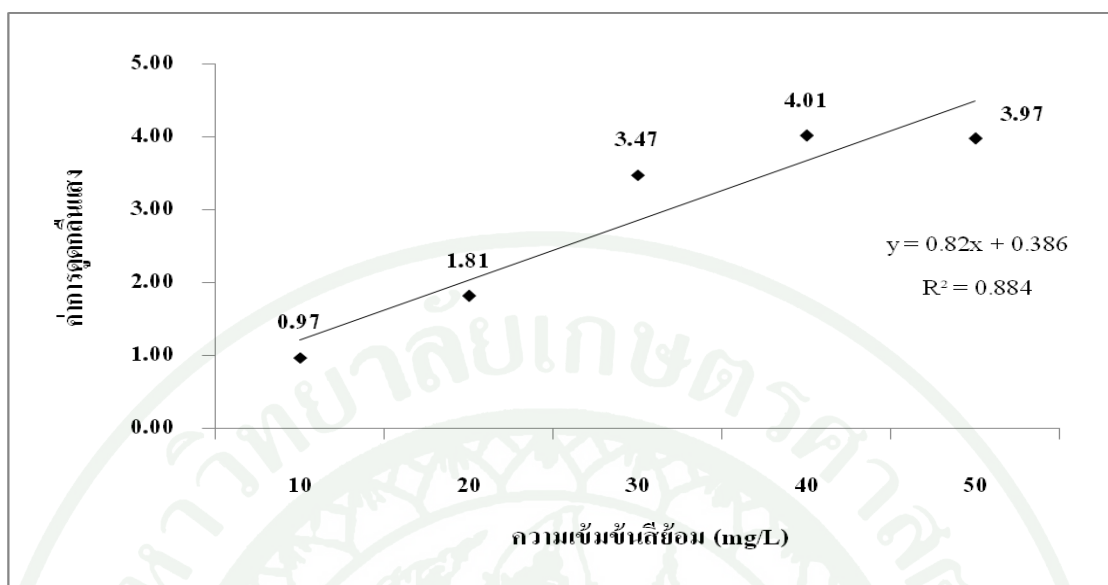
Malik P.K 2003. Adsorption of dye onto activated carbon. **Dyes Pigments** 26 (12): 239-249.

Mehmet, D., A. Harun and A. J. Mahir. 2009. The remove hazardous waste and hazardous materials. **Hazard Mater** 16 (9): 172-181.

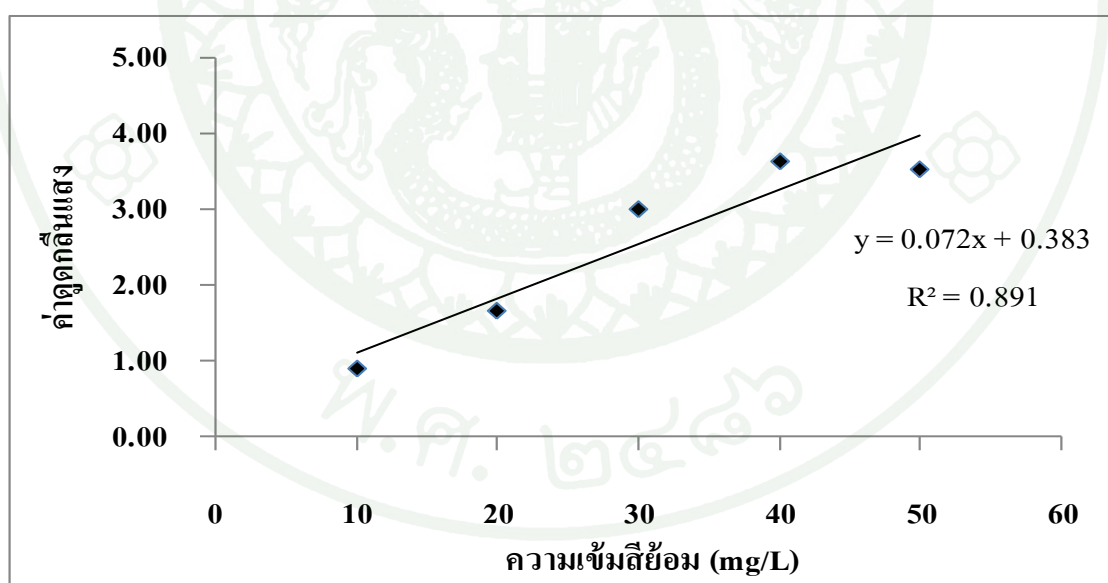
Namasivayam, C. and D. Kavitha. 2002. The adsorption of dyes in textile wastewater. **Dyes Pigments** 9 (2): 47-58.

Rahman, I.A., B. Saad, S. Shaidan and E.S. Sya/Rizal. 2005. A new technique to pyrolyse Biomass in a microwave system: Effect of stirrer speed. **Bioresour Technol** 11 (6): 1578-1583.

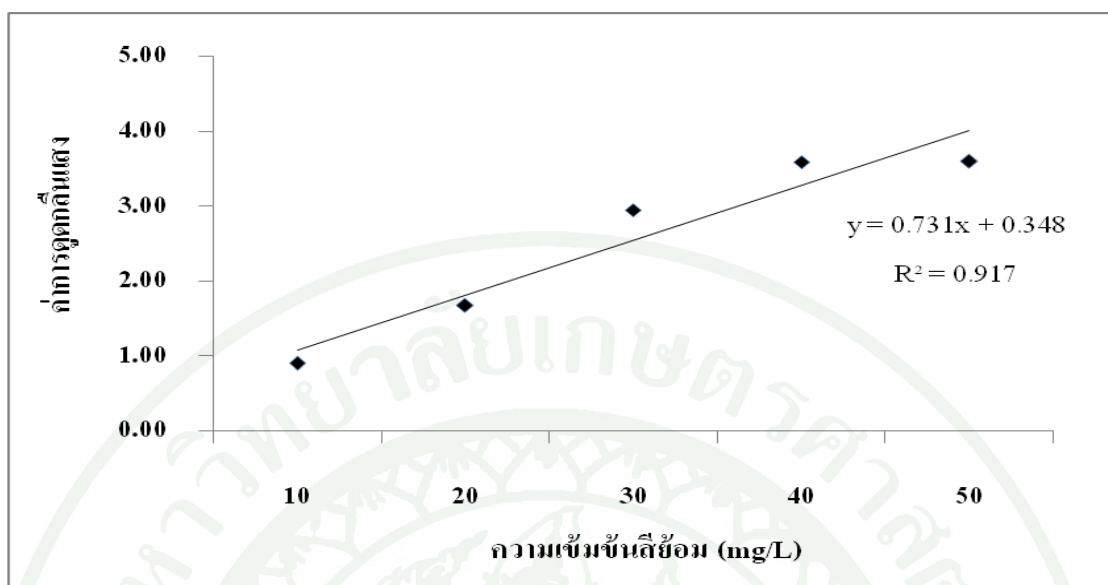




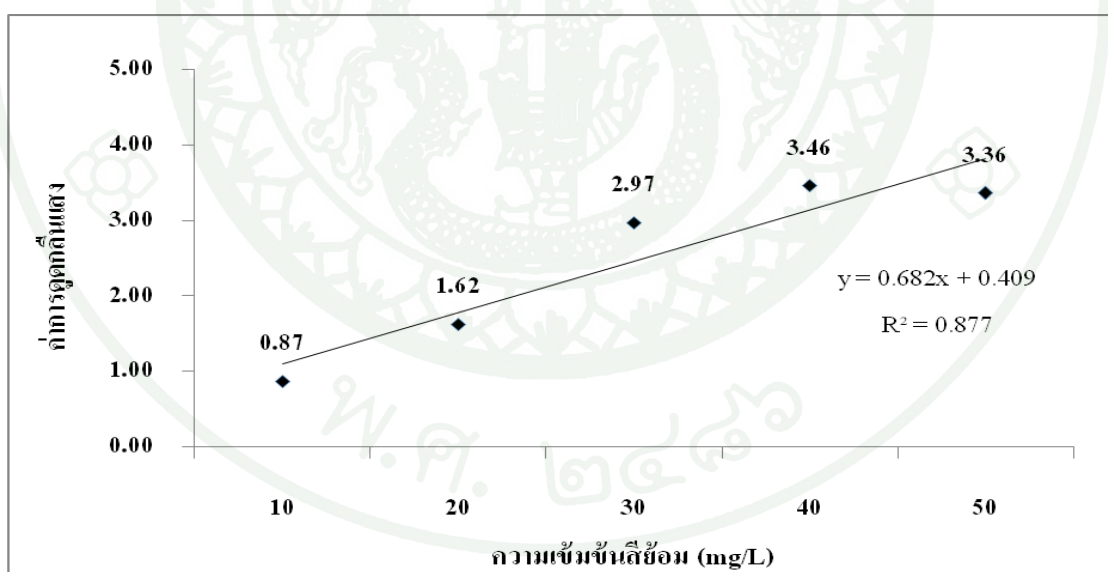
ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเหลือง (Yellow LS-R-01) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



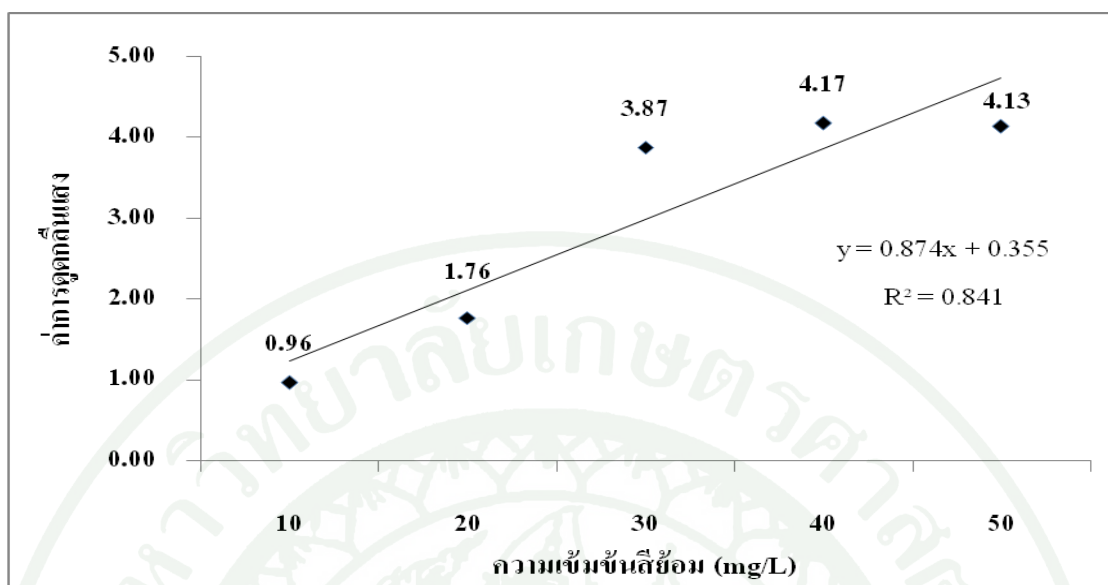
ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเหลืองส้ม (Yellow LS-4G) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร



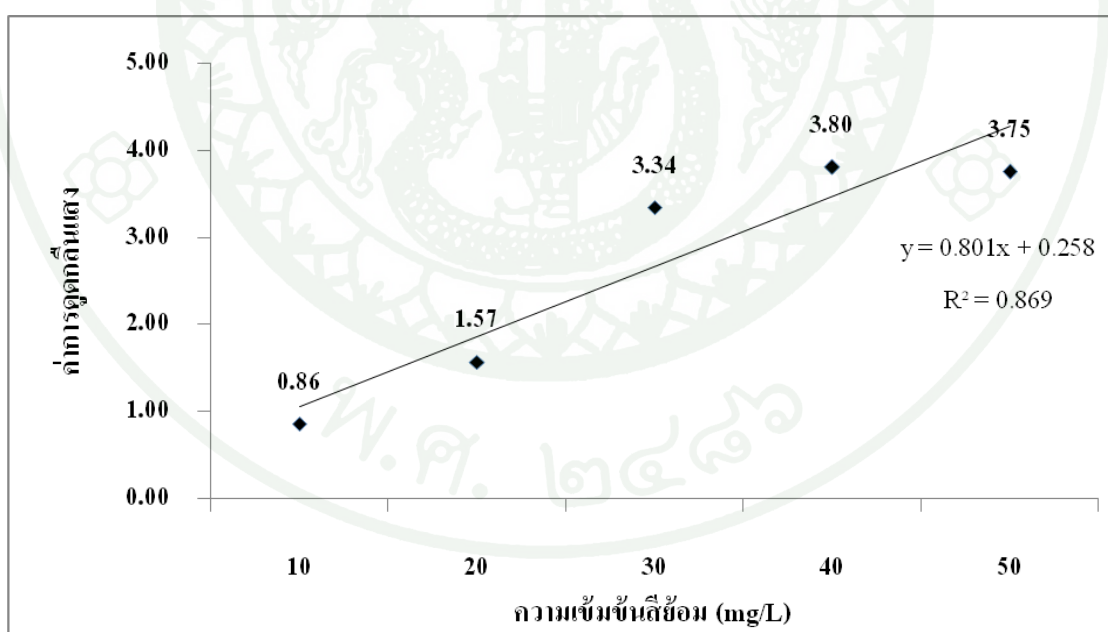
ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีดำ (Super Black G) ที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร



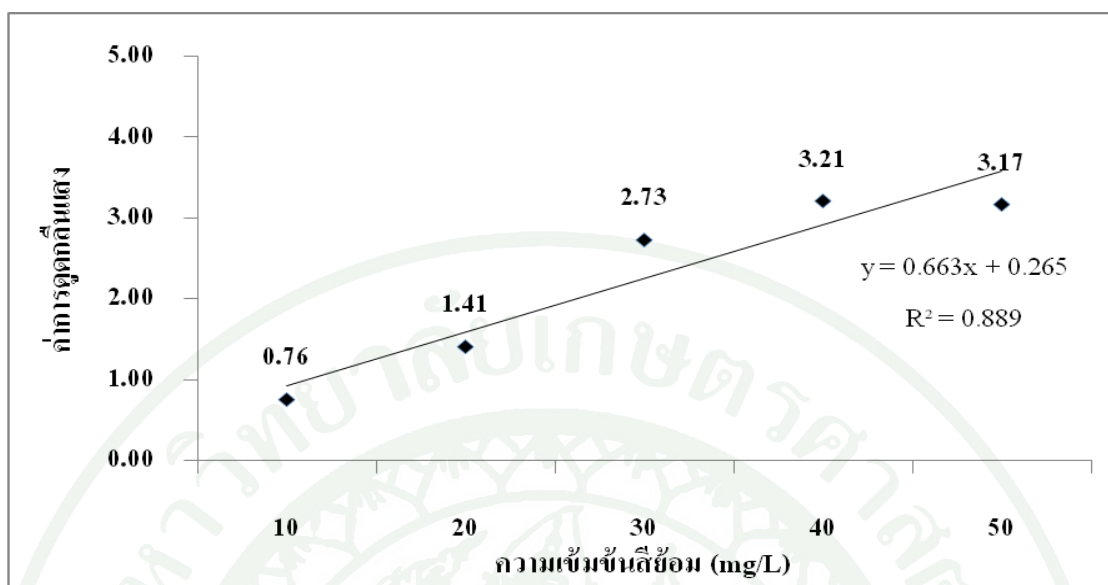
ภาพผนวกที่ 4 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเทา (Navy LS-G) ที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร



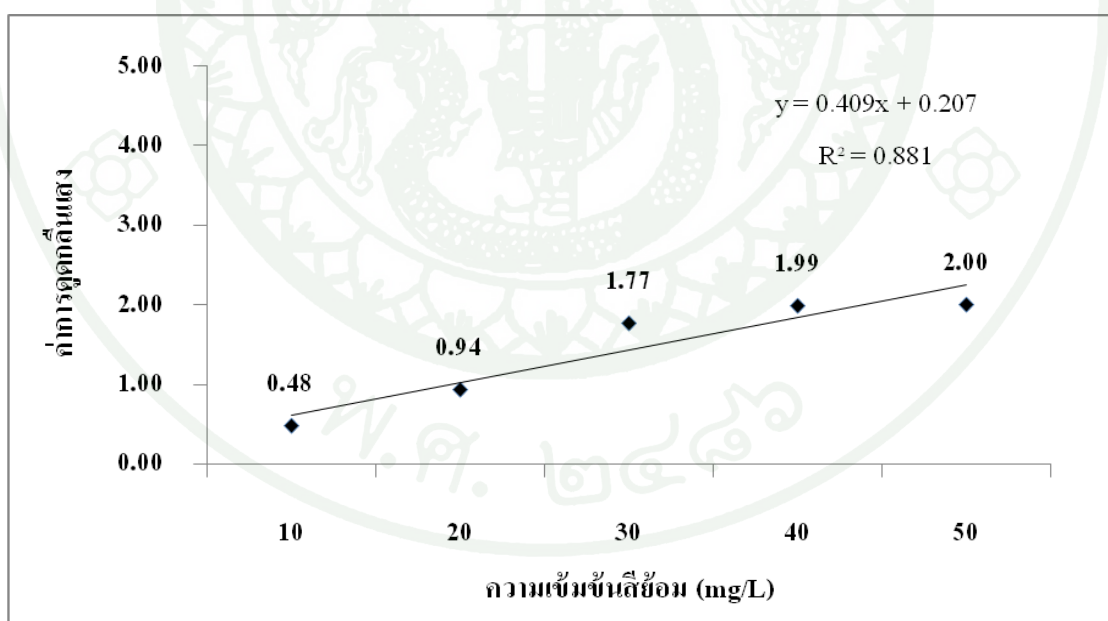
ภาพผนวกที่ 5 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีส้ม
 (Orange LS-BR) ที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร



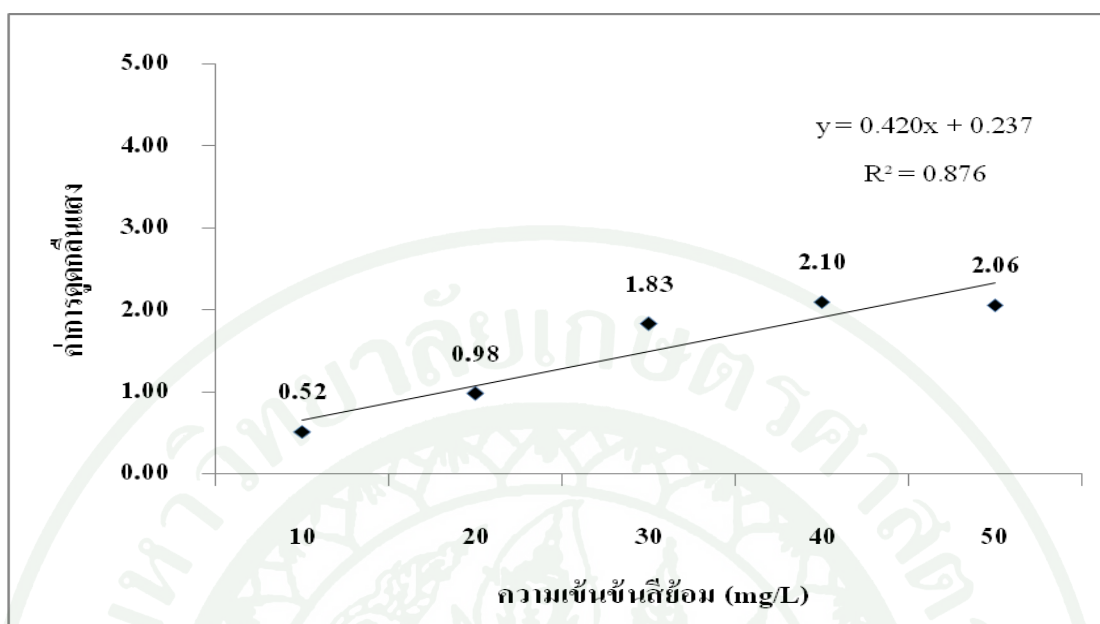
ภาพผนวกที่ 6 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีฟ้า
 (Blue LS-3R) ที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 7 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีแดง (Red LS-B) ที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 8 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีฟ้าเข้ม (Br.Blue LS-G) ที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 9 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสีเทอร์ควอยซ์ (Turquoise H-GN) ที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร

ตารางผนวกที่ 1 อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	2 กรัม		4 กรัม		6 กรัม		8 กรัม		10 กรัม	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.758	0.62	1.758	0.62	1.756	0.73	1.756	0.73	1.742	1.53
Yellow LS-4G	1.791	0.11	1.780	0.73	1.775	1.00	1.774	1.06	1.773	1.12
Super Black G	1.792	0.50	1.779	1.22	1.775	1.44	1.772	1.61	1.758	2.39
Navy LS-G	1.843	1.23	1.837	1.55	1.839	1.45	1.837	1.55	1.801	3.48
Orange LS-BR	1.366	3.12	1.360	3.55	1.361	3.48	1.363	3.33	1.347	4.47
Blue LS-3R	1.656	0.54	1.649	0.96	1.645	1.20	1.650	0.90	1.648	1.02
Red LS-B	1.501	0.66	1.479	2.12	1.476	2.32	1.476	2.32	1.454	3.77
Br.Blue LS-G	1.036	0.86	1.013	3.06	1.014	2.97	1.017	2.68	1.001	4.21
Turquoise H-GN	1.080	0.37	1.065	1.75	1.061	2.12	1.062	2.03	1.044	3.69
เฉลี่ยร้อยละ	-	0.89	-	1.73	-	1.86	-	1.80	-	2.85

ตารางผนวกที่ 2 อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	12 กรัม		14 กรัม		16 กรัม		18 กรัม	
	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้น	ร้อยละ
	ที่เหลือ (mg/L)	การ กำจัด	ที่เหลือ (mg/L)	การ กำจัด	ที่เหลือ (mg/L)	การ กำจัด	ที่เหลือ (mg/L)	การ กำจัด
Yellow LS-R-01	1.730	2.20	1.749	1.13	1.674	5.37	1.739	1.70
Yellow LS-4G	1.760	1.84	1.774	1.06	1.696	5.41	1.753	2.23
Super Black G	1.746	3.05	1.751	2.78	1.669	7.33	1.699	5.66
Navy LS-G	1.790	4.07	1.795	3.80	1.707	8.52	1.721	7.77
Orange LS-BR	1.339	5.04	1.355	3.90	1.254	11.06	1.290	8.51
Blue LS-3R	1.624	2.46	1.633	1.92	1.563	6.13	1.585	4.80
Red LS-B	1.443	4.50	1.452	3.90	1.349	10.72	1.383	8.47
Br.Blue LS-G	0.992	5.07	1.004	3.92	0.917	12.25	0.945	9.57
Turquoise H-GN	1.031	4.89	1.044	3.69	0.958	11.62	0.978	9.78
เฉลี่ยร้อยละ	-	3.68	-	2.90	-	8.71	-	6.50

ตารางผนวกที่ 3 อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	2 กรัม		4 กรัม		6 กรัม		8 กรัม		10 กรัม	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.724	2.54	1.711	3.28	1.679	5.09	1.632	7.74	1.630	7.86
Yellow LS-4G	1.749	2.45	1.725	3.79	1.676	6.53	1.658	7.53	1.664	7.19
Super Black G	1.763	2.11	1.735	3.66	1.71	5.05	1.666	7.50	1.666	7.50
Navy LS-G	1.808	3.11	1.785	4.34	1.754	6.00	1.701	8.84	1.681	9.91
Orange LS-BR	1.351	4.18	1.329	5.74	1.294	8.23	1.249	11.42	1.249	11.42
Blue LS-3R	1.629	2.16	1.616	2.94	1.597	4.08	1.556	6.55	1.557	6.49
Red LS-B	1.456	3.64	1.393	7.81	1.381	8.60	1.347	10.85	1.347	10.85
Br.Blue LS-G	1.014	2.97	0.984	5.84	0.955	8.61	0.939	10.14	0.944	9.67
Turquoise H-GN	1.055	2.68	1.023	5.63	1.003	7.47	0.973	10.24	0.984	9.23
เฉลี่ยร้อยละ	-	2.87	-	4.78	-	6.63	-	8.98	-	8.90

ตารางผนวกที่ 4 อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	12 กรัม		14 กรัม		16 กรัม		18 กรัม	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.625	8.14	1.576	10.91	1.561	11.76	1.539	13.00
Yellow LS-4G	1.650	7.98	1.601	10.71	1.576	12.10	1.552	13.44
Super Black G	1.653	8.22	1.600	11.16	1.573	12.66	1.555	13.66
Navy LS-G	1.678	10.08	1.631	12.59	1.603	14.09	1.578	15.43
Orange LS-BR	1.232	12.62	1.183	16.10	1.161	17.66	1.134	19.57
Blue LS-3R	1.542	7.39	1.507	9.49	1.48	11.11	1.475	11.41
Red LS-B	1.334	11.71	1.277	15.49	1.246	17.54	1.223	19.06
Br.Blue LS-G	0.938	10.24	0.890	14.83	0.868	16.94	0.835	20.10
Turquoise H-GN	0.975	10.06	0.933	13.93	0.914	15.68	0.882	18.63
เฉลี่ยร้อยละ	-	9.60	-	12.80	-	14.39	-	16.03

ตารางผนวกที่ 5 อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	2 กรัม		4 กรัม		6 กรัม		8 กรัม		10 กรัม	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.644	2.14	1.644	2.14	1.628	3.10	1.623	3.39	1.621	3.51
Yellow LS-4G	1.693	2.14	1.690	2.31	1.671	3.41	1.665	3.76	1.661	3.99
Super Black G	1.703	1.16	1.696	1.57	1.686	2.15	1.684	2.26	1.679	2.55
Navy LS-G	1.767	1.83	1.767	1.83	1.752	2.67	1.751	2.72	1.728	4.00
Orange LS-BR	1.646	2.49	1.645	2.55	1.612	4.50	1.607	4.80	1.605	4.92
Blue LS-3R	1.665	1.36	1.665	1.36	1.656	1.90	1.647	2.43	1.644	2.61
Red LS-B	1.391	3.80	1.388	4.01	1.377	4.77	1.371	5.19	1.378	4.70
Br.Blue LS-G	1.002	2.62	1.005	2.33	0.996	3.21	0.986	4.18	0.981	4.66
Turquoise H-GN	1.044	2.16	1.037	2.81	1.033	3.19	1.026	3.84	1.023	4.12
เฉลี่ยร้อยละ	-	2.19	-	2.32	-	3.21	-	3.62	-	3.90

ตารางผนวกที่ 6 อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	12 กรัม		14 กรัม		16 กรัม		18 กรัม	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.613	3.99	1.606	4.40	1.596	5.00	1.596	5.00
Yellow LS-4G	1.640	5.20	1.631	5.72	1.622	6.24	1.622	6.24
Super Black G	1.667	3.25	1.66	3.66	1.645	4.53	1.645	4.53
Navy LS-G	1.72	4.44	1.716	4.67	1.689	6.17	1.689	6.17
Orange LS-BR	1.586	6.04	1.564	7.35	1.565	7.29	1.565	7.29
Blue LS-3R	1.628	3.55	1.625	3.73	1.606	4.86	1.606	4.86
Red LS-B	1.362	5.81	1.356	6.22	1.346	6.92	1.346	6.92
Br.Blue LS-G	0.977	5.05	0.965	6.22	0.955	7.19	0.955	7.19
Turquoise H-GN	1.011	5.25	1.003	6.00	0.995	6.75	0.995	6.75
เฉลี่ยร้อยละ	-	4.73	-	5.33	-	6.10	-	9.15

ตารางผนวกที่ 7 อิทธิพลของปริมาณ (2-10 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียม
คลอไรด์

ชนิดสีย้อม	2 กรัม		4 กรัม		6 กรัม		8 กรัม		10 กรัม	
	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละ การ กำจัด	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละ การ กำจัด	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละ การ กำจัด	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละ การ กำจัด	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละ การ กำจัด
Yellow LS-R-01	1.698	0.41	1.663	2.46	1.616	5.22	1.611	5.51	1.519	10.91
Yellow LS-4G	1.690	3.54	1.662	5.14	1.613	7.93	1.610	8.11	1.521	13.18
Super Black G	1.702	2.58	1.689	3.32	1.649	5.61	1.649	5.61	1.593	8.82
Navy LS-G	1.756	3.04	1.714	5.36	1.681	7.18	1.669	7.84	1.614	10.88
Orange LS-BR	1.610	4.28	1.58	6.06	1.54	8.44	1.529	9.10	1.441	14.33
Blue LS-3R	1.662	3.15	1.631	4.95	1.609	6.24	1.606	6.41	1.554	9.44
Red LS-B	1.405	3.37	1.36	6.46	1.313	9.70	1.308	10.04	1.249	14.10
Br.Blue LS-G	0.954	4.31	0.923	7.42	0.894	10.33	0.893	10.43	0.85	14.74
Turquoise H-GN	1.000	3.85	0.972	6.54	0.942	9.42	0.941	9.52	0.895	13.94
เฉลี่ยร้อยละ	-	3.17	-	5.30	-	7.79	-	8.06	-	12.26

ตารางผนวกที่ 8 อิทธิพลของปริมาณ (12-18 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	12 กรัม		14 กรัม		16 กรัม		18 กรัม	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.484	12.96	1.484	12.96	1.456	14.60	1.486	16.28
Yellow LS-4G	1.49	14.95	1.49	14.95	1.46	16.67	1.498	16.22
Super Black G	1.569	10.19	1.564	10.48	1.547	11.45	1.336	18.34
Navy LS-G	1.589	12.26	1.582	12.64	1.566	13.53	1.386	20.12
Orange LS-BR	1.417	15.76	1.423	15.40	1.392	17.24	1.445	15.45
Blue LS-3R	1.536	10.49	1.522	11.31	1.511	11.95	1.307	18.21
Red LS-B	1.224	15.82	1.211	16.71	1.206	17.06	1.121	18.35
Br.Blue LS-G	0.834	16.35	0.831	16.65	0.813	18.46	0.821	20.21
Turquoise H-GN	0.883	15.10	0.88	15.38	0.864	16.92	0.867	19.65
เฉลี่ยร้อยละ	-	13.76	-	14.05	-	15.32	-	18.09

ตารางผนวกที่ 9 อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	พีเอช 5		พีเอช 6		พีเอช 7		พีเอช 8		พีเอช 9	
	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด
	เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.465	6.33	1.484	17.83	1.488	3.81	1.517	1.62	1.528	0.91
Yellow LS-4G	1.619	5.21	1.637	4.49	1.645	4.03	1.670	1.82	1.683	1.46
Super Black G	1.613	5.17	1.635	4.05	1.642	5.25	1.666	1.59	1.668	0.30
Navy LS-G	1.664	6.52	1.687	5.75	1.701	6.38	1.730	2.75	1.735	1.42
Orange LS-BR	1.599	3.38	1.613	2.77	1.620	3.57	1.651	2.37	1.657	2.01
Blue LS-3R	1.601	4.25	1.623	3.05	1.610	5.24	1.648	0.66	1.620	0.31
Red LS-B	1.334	6.39	1.348	4.80	1.350	6.77	1.375	3.98	1.373	2.49
Br.Blue LS-G	0.940	4.95	0.858	3.16	0.954	6.38	0.968	8.68	0.975	8.28
Turquoise H-GN	0.976	0.41	0.942	0.84	0.989	5.09	1.007	8.20	1.014	7.14
เฉลี่ยร้อยละ	-	5.19	-	5.17	-	3.52	-	4.73	-	2.70

ตารางผนวกที่ 10 อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	พีเอช 5		พีเอช 6		พีเอช 7		พีเอช 8		พีเอช 9	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.384	11.51	1.388	11.54	1.402	9.37	1.384	10.25	1.374	10.89
Yellow LS-4G	1.508	11.71	1.515	11.61	1.545	9.86	1.536	9.70	1.523	10.83
Super Black G	1.488	12.52	1.493	12.38	1.535	11.43	1.508	10.93	1.483	11.36
Navy LS-G	1.521	14.55	1.524	14.86	1.571	13.54	1.537	13.60	1.512	14.09
Orange LS-BR	1.459	11.84	1.469	11.45	1.512	10.00	1.500	11.30	1.491	11.83
Blue LS-3R	1.464	12.44	1.464	12.54	1.512	11.01	1.481	10.73	1.458	10.28
Red LS-B	1.191	16.42	1.193	15.75	1.231	14.99	1.207	15.71	1.194	15.20
Br.Blue LS-G	0.777	21.44	0.780	11.96	0.861	15.51	0.865	18.40	0.864	18.72
Turquoise H-GN	0.828	15.51	0.838	11.79	0.901	13.53	0.912	16.86	0.903	17.31
เฉลี่ยร้อยละ	-	14.22	-	12.65	-	13.14	-	13.05	-	13.29

ตารางผนวกที่ 11 อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	พีเอช 5		พีเอช 6		พีเอช 7		พีเอช 8		พีเอช 9	
	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่	ร้อยละการกำจัด
	เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)		เหลือ (mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.604	9.74	1.642	4.42	1.613	7.88	1.635	5.71	1.637	3.42
Yellow LS-4G	1.717	8.57	1.746	5.01	1.734	8.06	1.749	5.66	1.752	3.52
Super Black G	1.685	9.16	1.712	5.78	1.687	8.02	1.704	3.89	1.693	4.83
Navy LS-G	1.733	9.50	1.759	6.88	1.732	9.13	1.763	4.29	1.756	3.36
Orange LS-BR	1.673	9.17	1.706	6.21	1.689	8.65	1.706	4.37	1.706	5.85
Blue LS-3R	1.658	9.10	1.683	4.38	1.656	9.66	1.676	3.68	1.668	2.11
Red LS-B	1.406	9.58	1.436	5.21	1.418	10.71	1.443	3.61	1.431	2.72
Br.Blue LS-G	1.656	8.05	1.676	4.77	1.653	8.72	1.674	3.90	1.665	2.63
Turquoise H-GN	1.640	7.76	1.660	4.21	1.640	8.28	1.659	3.32	1.656	1.66
เฉลี่ยร้อยละ	-	8.96	-	5.21	-	8.79	-	4.27	-	3.35

ตารางผนวกที่ 12 อิทธิพลของพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	พีเอช 5		พีเอช 6		พีเอช 7		พีเอช 8		พีเอช 9	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.455	16.38	1.494	16.16	1.472	18.45	1.450	19.98	1.525	14.08
Yellow LS-4G	1.483	17.93	1.518	16.32	1.504	18.08	1.477	19.90	1.554	16.09
Super Black G	1.331	20.25	1.373	19.42	1.366	23.17	1.323	22.86	1.395	17.11
Navy LS-G	1.379	21.11	1.427	20.06	1.415	22.89	1.362	24.00	1.450	19.98
Orange LS-BR	1.438	17.64	1.486	15.47	1.463	19.62	1.435	19.88	1.510	14.11
Blue LS-3R	1.309	19.89	1.345	19.12	1.336	22.33	1.294	23.11	1.368	18.33
Red LS-B	1.086	23.31	1.137	20.66	1.116	24.90	1.065	27.30	1.160	20.00
Br.Blue LS-G	0.818	16.87	0.841	22.99	0.835	28.88	0.808	27.47	0.875	28.63
Turquoise H-GN	0.866	17.68	0.891	21.77	0.882	29.04	0.849	27.31	0.929	26.62
เฉลี่ยร้อยละ	-	19.01	-	19.11	-	23.04	-	23.53	-	19.44

ตารางผนวกที่ 13 อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง		8 ชั่วโมง		10 ชั่วโมง		12 ชั่วโมง	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ
	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ
	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด
Yellow LS-R	1.780	0.06	1.695	4.83	1.671	6.18	1.628	8.59	1.577	12.75	1.521	13.45
Yellow LS-4G	1.832	1.77	1.726	7.45	1.718	7.88	1.655	11.26	1.590	14.76	1.543	13.21
Super Black G	1.739	0.17	1.664	4.48	1.600	8.15	1.583	9.13	1.510	12.32	1.480	13.56
Navy LS-G	1.789	2.61	1.701	7.40	1.603	12.74	1.607	12.52	1.534	15.23	1.501	16.63
Orange LS-BR	1.742	1.19	1.704	3.35	1.676	4.93	1.620	8.11	1.545	12.32	1.510	14.80
Blue LS-3R	1.724	0.23	1.647	4.69	1.583	8.39	1.576	8.80	1.514	12.42	1.489	12.34
Red LS-B	1.482	0.07	1.402	5.46	1.340	9.64	1.324	10.72	1.275	12.65	1.223	13.9
Br.Blue LS-G	1.048	0.66	0.993	5.88	0.945	10.43	0.940	10.90	0.825	14.45	0.810	13.65
Turquoise H-GN	1.093	1.09	1.034	6.43	0.984	10.95	0.983	11.04	0.914	14.22	0.911	15.25
เฉลี่ยร้อยละ	-	0.87	-	5.55	-	8.81	-	10.12	-	13.45	-	14.09

ตารางผนวกที่ 14 อิทธิพลของระยะเวลาจำกัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง		8 ชั่วโมง		10 ชั่วโมง		12 ชั่วโมง	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ
	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ
	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด
Yellow LS-R	1.529	14.15	1.466	17.69	1.475	17.18	1.360	23.64	1.334	29.57	1.351	28.67
Yellow LS-4G	1.565	16.09	1.500	19.57	1.511	18.98	1.374	26.33	1.334	26.01	1.349	25.18
Super Black G	1.493	14.29	1.414	18.83	1.389	20.26	1.283	26.35	1.112	30.08	1.112	31.08
Navy LS-G	1.513	17.64	1.427	22.32	1.389	24.39	1.283	30.16	1.149	33.95	1.151	33.84
Orange LS-BR	1.527	10.86	1.463	14.59	1.471	14.13	1.313	23.35	1.281	25.44	1.284	25.26
Blue LS-3R	1.474	14.70	1.398	19.10	1.378	20.25	1.262	26.97	1.090	30.18	1.093	32.00
Red LS-B	1.215	18.07	1.150	22.45	1.140	23.13	1.002	32.43	0.883	35.38	0.889	37.96
Br.Blue LS-G	0.873	17.25	0.833	21.04	0.831	21.23	0.692	34.41	0.648	35.69	0.641	37.36
Turquoise H-GN	0.915	17.19	0.870	21.27	0.869	21.36	0.734	33.57	0.695	34.16	0.691	36.52
เฉลี่ยร้อยละ	-	15.58	-	19.65	-	20.10	-	26.58	-	29.27	-	32.10

ตารางผนวกที่ 15 อิทธิพลของระยะเวลากำจัดกับร้อยละการกำจัดสีข้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีข้อม	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง		8 ชั่วโมง		10 ชั่วโมง		12 ชั่วโมง	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ	เข้มข้นที่	ละ
	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ	เหลือ	การ
	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด	(mg/L)	กำจัด
Yellow LS-R	1.623	-2.99	1.745	-4.30	1.721	-2.87	1.584	5.32	1.584	14.40	1.584	20.11
Yellow LS-4G	1.785	0.17	1.776	0.67	1.748	2.24	1.669	6.66	1.669	16.41	1.669	20.56
Super Black G	1.655	-4.61	1.933	-11.41	1.917	-10.49	1.838	-5.94	1.838	13.76	1.838	21.43
Navy LS-G	1.781	-1.33	1.975	-9.42	1.948	-7.92	1.657	8.20	1.657	16.37	1.657	21.67
Orange LS-BR	1.735	0.23	1.513	13.00	1.48	14.89	1.603	7.82	1.603	16.37	1.603	20.19
Blue LS-3R	1.643	3.92	1.773	-3.68	1.761	-2.98	1.599	6.49	1.599	13.77	1.599	20.65
Red LS-B	1.425	-2.93	1.62	-10.35	1.596	-8.72	1.495	-1.84	1.495	16.25	1.495	18.25
Br.Blue LS-G	1.623	5.53	0.978	43.07	0.966	43.77	0.915	46.74	0.915	19.22	0.915	20.23
Turquoise H-GN	1.611	4.73	1.052	37.79	1.032	38.97	0.981	41.99	0.981	18.32	0.981	21.15
เฉลี่ยร้อยละ	-	6.24	-	6.15	-	7.43	-	12.83	-	16.76	-	21.10

ตารางผนวกที่ 16 อิทธิพลของระยะเวลาจำกัดกับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเคเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสีย้อม	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง		8 ชั่วโมง		10 ชั่วโมง		12 ชั่วโมง	
	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R	1.358	15.96	1.349	16.52	1.290	20.17	1.275	22.30	1.231	29.93	1.475	16.05
Yellow LS-4G	1.406	15.90	1.343	19.67	1.351	19.19	1.320	20.10	1.329	28.50	1.582	14.90
Super Black G	1.325	19.05	1.233	24.67	1.222	25.35	1.145	25.11	1.453	23.12	1.697	10.21
Navy LS-G	1.382	20.16	1.276	26.28	1.247	27.96	1.698	26.36	1.445	25.85	1.694	13.08
Orange LS-BR	1.369	16.37	1.285	21.50	1.271	22.35	1.535	23.49	1.283	28.32	1.527	14.69
Blue LS-3R	1.316	18.71	1.212	25.13	1.190	26.49	1.682	25.44	1.422	23.83	1.676	10.23
Red LS-B	1.083	22.19	0.980	29.59	0.963	30.81	1.385	29.78	1.103	30.27	1.359	14.09
Br.Blue LS-G	0.785	22.88	0.719	29.37	0.691	32.12	0.650	31.03	0.621	32.83	0.807	19.21
Turquoise H-GN	0.825	23.13	0.750	30.03	0.718	30.02	0.703	30.12	0.651	32.91	0.853	19.45
เฉลี่ยร้อยละ	-	19.37	-	24.75	-	26.38	-	26.78	-	31.58	-	15.65

ตารางผนวกที่ 17 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	10 มิลลิกรัมต่อลิตร		20 มิลลิกรัมต่อลิตร		30 มิลลิกรัมต่อลิตร		40 มิลลิกรัมต่อลิตร		50 มิลลิกรัมต่อลิตร	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.927	4.33	3.40	2.02	1.748	3.53	3.940	2.72	3.77	5.04
Yellow LS-4G	0.864	4.53	2.95	1.99	1.610	2.78	3.620	0.28	3.49	0.85
Super Black G	0.843	6.33	2.94	0.34	1.612	3.76	3.52	1.95	3.56	1.11
Navy LS-G	0.813	6.34	2.77	6.73	1.574	3.02	3.38	2.31	3.32	1.19
Orange LS-BR	0.908	5.52	3.66	5.43	1.709	3.12	4.09	1.92	4.06	1.69
Blue LS-3R	0.849	1.05	3.21	3.89	1.566	0.19	3.79	0.26	3.64	2.93
Red LS-B	0.689	8.74	2.64	3.30	1.327	5.75	3.16	1.56	3.06	3.47
Br.Blue LS-G	0.447	6.87	1.66	6.21	0.867	7.37	1.93	3.02	1.86	7.00
Turquoise H-GN	0.467	9.85	1.72	6.01	0.925	5.80	2.04	2.86	2.01	2.43
เฉลี่ยร้อยละ	-	5.95	-	3.99	-	3.93	-	1.87	-	2.86

ตารางผนวกที่ 18 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสียอมด้วยเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสียอม	10 มิลลิกรัมต่อลิตร		20 มิลลิกรัมต่อลิตร		30 มิลลิกรัมต่อลิตร		40 มิลลิกรัมต่อลิตร		50 มิลลิกรัมต่อลิตร	
	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
Yellow LS-R-01	0.798	17.65	2.79	19.60	1.602	11.59	3.53	12.84	3.59	9.57
Yellow LS-4G	0.758	16.24	2.56	14.95	1.509	8.88	3.16	12.95	3.34	5.11
Super Black G	0.762	15.33	2.45	16.95	1.510	9.85	3.240	9.75	3.39	5.83
Navy LS-G	0.734	15.44	2.62	11.78	1.486	8.44	3.03	12.43	3.17	5.65
Orange LS-BR	0.820	14.67	2.99	22.74	1.578	10.54	3.680	11.75	3.82	7.51
Blue LS-3R	0.754	12.12	2.91	12.87	1.478	5.80	3.38	11.05	3.48	7.20
Red LS-B	0.616	18.41	2.47	9.52	1.226	12.93	2.790	13.08	2.93	7.57
Br.Blue LS-G	0.398	17.08	1.62	8.47	0.791	15.49	1.72	13.57	1.79	10.50
Turquoise H-GN	0.413	20.27	1.44	21.31	0.842	14.26	1.760	16.19	1.96	4.85
เฉลี่ยร้อยละ	-	15.21	-	10.86	-	10.62	-	7.09	-	16.36

ตารางผนวกที่ 19 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมีย

ชนิดสีย้อม	10 มิลลิกรัมต่อลิตร		20 มิลลิกรัมต่อลิตร		30 มิลลิกรัมต่อลิตร		40 มิลลิกรัมต่อลิตร		50 มิลลิกรัมต่อลิตร	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.926	4.44	2.95	14.99	1.738	4.08	3.57	11.85	3.73	6.05
Yellow LS-4G	0.887	1.99	2.670	11.30	1.610	2.78	3.290	9.37	3.43	2.56
Super Black G	0.840	6.67	2.690	8.81	1.604	4.24	3.390	5.57	3.50	2.78
Navy LS-G	0.817	5.88	2.52	15.15	1.561	3.82	3.18	8.09	3.30	1.79
Orange LS-BR	0.904	5.93	3.27	15.50	1.707	3.23	3.84	7.91	4.10	0.73
Blue LS-3R	0.849	1.05	2.93	12.28	1.565	0.25	3.46	8.95	3.60	4.00
Red LS-B	0.674	10.73	2.480	9.16	1.319	6.32	3.080	4.05	3.01	5.05
Br.Blue LS-G	0.438	8.75	1.52	14.12	0.844	9.83	1.83	8.04	1.82	9.00
Turquoise H-GN	0.46	11.20	1.56	14.75	0.917	6.62	1.92	8.57	1.94	5.83
เฉลี่ยร้อยละ	-	6.29	-	12.90	-	4.58	-	8.04	-	4.14

ตารางผนวกที่ 20 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์กับร้อยละการกำจัดสียอมด้วยถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดสียอม	10 มิลลิกรัมต่อลิตร		20 มิลลิกรัมต่อลิตร		30 มิลลิกรัมต่อลิตร		40 มิลลิกรัมต่อลิตร		50 มิลลิกรัมต่อลิตร	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ	เข้มข้นที่	การ
	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด	เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.739	23.74	2.68	22.77	1.527	15.73	3.58	11.60	3.69	7.05
Yellow LS-4G	0.697	22.98	2.42	19.60	1.449	12.50	3.19	12.12	3.40	3.41
Super Black G	0.749	16.78	2.58	12.54	1.527	8.84	3.38	5.85	3.54	1.67
Navy LS-G	0.725	16.47	2.38	19.87	1.477	9.00	3.1	10.40	3.29	2.08
Orange LS-BR	0.791	17.69	3.08	20.41	1.572	10.88	3.84	7.91	4.00	3.15
Blue LS-3R	0.705	17.83	2.82	15.57	1.414	9.88	3.35	11.84	3.54	5.60
Red LS-B	0.607	19.60	2.31	15.38	1.224	13.07	2.89	9.97	3.09	2.52
Br.Blue LS-G	0.377	21.46	1.40	20.90	0.791	15.49	1.74	12.56	1.91	4.50
Turquoise H-GN	0.404	22.01	1.45	20.77	0.84	14.46	1.82	13.33	1.91	7.28
เฉลี่ยร้อยละ	-	19.84	-	18.65	-	12.20	-	10.62	-	4.20

ตารางผนวกที่ 21 ไอโซเทอร์มของถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	C_0	C	V (lit)	q	1/q	1/c	log q	log c
4	0.80	0.70	0.05	0.00031	3185.48	1.43	-3.503	-0.155
8	1.95	1.42	0.05	0.00165	606.90	0.70	-2.783	0.153
12	2.89	2.54	0.05	0.00110	910.43	0.39	-2.959	0.405
16	3.65	3.23	0.05	0.00131	763.47	0.31	-2.883	0.509

ตารางผนวกที่ 22 ปริมาณดินเหนียวปนทราย (10, 20, 30, 40 และ 50 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อม

ชนิดสีข้อม	10 กรัม		20 กรัม		30 กรัม		40 กรัม		50 กรัม	
	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ	ความ	ร้อยละ
	เข้มข้น	การ	เข้มข้น	การ	เข้มข้น	การ	เข้มข้น	การ	เข้มข้น	การ
	ที่เหลือ	กำจัด	ที่เหลือ	กำจัด	ที่เหลือ	กำจัด	ที่เหลือ	กำจัด	ที่เหลือ	กำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	1.103	33.59	0.975	41.30	0.772	53.52	0.696	58.10	0.636	61.71
Yellow LS-4G	1.144	35.95	0.983	44.96	0.780	56.33	0.698	60.92	0.650	63.61
Super Black G	1.186	35.86	1.039	43.81	0.849	54.08	0.770	58.36	0.721	61.01
Navy LS-G	1.215	36.42	1.034	45.89	0.841	55.99	0.768	59.81	0.719	62.38
Orange LS-BR	1.134	36.51	0.959	46.30	0.756	57.67	0.677	62.09	0.612	65.73
Blue LS-3R	1.172	36.03	1.022	44.21	0.833	54.53	0.764	58.30	0.709	61.30
Red LS-B	0.978	37.71	0.805	48.73	0.649	58.66	0.591	62.36	0.547	65.16
Br.Blue LS-G	0.659	35.52	0.540	47.16	0.431	57.83	0.387	62.13	0.365	64.29
Turquoise H-GN	0.687	36.21	0.575	46.61	0.473	56.08	0.416	61.37	0.376	65.09
เฉลี่ยร้อยละ	-	35.98	-	45.44	-	56.08	-	60.38	-	63.36

ตารางผนวกที่ 23 ปริมาณดินเหนียวปนทราย (60, 70, 80 และ 90 กรัม) กับร้อยละการกำจัดสีข้อม

ชนิดสีข้อม	60 กรัม		70 กรัม		80 กรัม		90 กรัม	
	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้น	ร้อยละ	ความเข้มข้นที่	ร้อยละ
	ที่เหลือ (mg/L)	การกำจัด	ที่เหลือ (mg/L)	การกำจัด	ที่เหลือ (mg/L)	การกำจัด	เหลือ (mg/L)	การกำจัด
Yellow LS-R-01	0.452	72.79	0.249	84.15	0.251	84.02	0.242	84.60
Yellow LS-4G	0.437	75.53	0.295	83.01	0.299	82.78	0.287	83.47
Super Black G	0.506	72.63	0.391	77.71	0.390	77.77	0.367	79.08
Navy LS-G	0.490	74.36	0.375	79.50	0.374	79.55	0.351	80.81
Orange LS-BR	0.413	76.88	0.280	83.44	0.280	83.44	0.270	84.03
Blue LS-3R	0.496	72.93	0.395	77.01	0.392	77.18	0.366	78.70
Red LS-B	0.377	75.99	0.286	80.62	0.287	80.56	0.273	81.50
Br.Blue LS-G	0.234	77.10	0.141	86.36	0.145	85.98	0.133	87.14
Turquoise H-GN	0.244	77.34	0.152	85.86	0.153	85.77	0.145	86.51
เฉลี่ยร้อยละ	-	75.06	-	81.76	-	81.89	-	82.87

ตารางผนวกที่ 24 ประสิทธิภาพของอัตราส่วนถ่านเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผสมกับดินเหนียวปนทราย
กับร้อยละการกำจัดสีย้อม โดยวิธีการทดลองแบบแบดช์

ชนิดสีย้อม	(1:3)		(1:4)		(1:5)		(1:6)	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.203	88.14	0.167	90.24	0.064	96.48	0.177	89.66
Yellow LS-4G	0.156	91.27	0.109	93.90	0.079	95.53	0.123	93.12
Super Black G	0.108	93.53	0.070	95.81	0.061	96.34	0.078	95.33
Navy LS-G	0.106	94.00	0.070	96.04	0.063	96.41	0.077	95.64
Orange LS-BR	0.092	93.15	0.061	95.46	0.089	94.77	0.070	94.79
Blue LS-3R	0.110	92.94	0.073	95.32	0.062	96.19	0.079	94.93
Red LS-B	0.105	92.57	0.073	94.83	0.054	96.18	0.078	94.48
Br.Blue LS-G	0.079	92.48	0.064	93.91	0.055	94.80	0.073	93.05
Turquoise H-GN	0.080	92.79	0.060	94.59	0.056	94.95	0.073	93.42
เฉลี่ยร้อยละ	-	92.32	-	94.46	-	95.75	-	93.82

ตารางผนวกที่ 25 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
(เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 1 – 4) โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

ชนิดสีข้อม	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.279	83.69	0.237	86.15	0.475	72.24	0.773	54.82
Yellow LS-4G	0.246	86.23	0.323	81.93	0.560	68.66	0.737	58.76
Super Black G	0.195	88.32	0.240	85.63	0.472	71.74	0.536	67.90
Navy LS-G	0.198	88.80	0.242	86.31	0.488	72.40	0.619	64.99
Orange LS-BR	0.247	81.61	0.300	77.66	0.383	71.48	0.720	46.39
Blue LS-3R	0.191	87.75	0.249	84.03	0.454	70.88	0.583	62.60
Red LS-B	0.166	88.25	0.199	85.92	0.396	71.97	0.497	64.83
Br.Blue LS-G	0.121	88.49	0.163	84.49	0.320	69.55	0.430	59.09
Turquoise H-GN	0.127	88.55	0.163	85.30	0.304	72.59	0.416	62.49
เฉลี่ยร้อยละ	-	86.86	-	84.16	-	71.28	-	60.21
สีที่เหลือใช้	0.308	-	0.235	-	0.428	-	0.590	-

ตารางผนวกที่ 26 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
(เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 5 – 8) โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

ชนิดสีย้อม	ครั้งที่ 5		ครั้งที่ 6		ครั้งที่ 7		ครั้งที่ 8	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.670	62.72	0.918	42.08	0.807	50.76	1.033	41.13
Yellow LS-4G	0.740	57.95	0.909	48.23	0.902	49.92	1.108	36.69
Super Black G	0.623	62.01	0.722	56.24	0.690	58.73	0.824	49.76
Navy LS-G	0.644	62.73	0.763	56.60	0.729	58.20	0.871	49.80
Orange LS-BR	0.725	57.28	0.886	48.67	0.878	48.89	1.086	35.93
Blue LS-3R	0.604	61.99	0.699	56.39	0.678	57.57	0.807	49.28
Red LS-B	0.491	64.26	0.598	56.98	0.584	57.53	0.697	49.60
Br.Blue LS-G	0.413	59.79	0.497	53.25	0.503	54.44	0.584	46.13
Turquoise H-GN	0.478	55.99	0.516	53.56	0.483	53.69	0.626	39.98
เฉลี่ยร้อยละ	-	60.52	-	52.44	-	54.41	-	44.26
สีที่เหลือใช้	0.600	-	0.723	-	0.820	-	0.848	-

ตารางผนวกที่ 27 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
(เมื่อใช้งานซ้ำครั้งที่ 9 -12) โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

ชนิดสีย้อม	ครั้งที่ 9		ครั้งที่ 10		ครั้งที่ 11		ครั้งที่ 12	
	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด	ความเข้มข้นที่ เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
	(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)		(mg/L)	
Yellow LS-R-01	0.993	35.10	1.074	29.84	1.333	22.18	1.438	16.05
Yellow LS-4G	1.151	32.33	1.055	37.98	1.469	15.23	1.528	11.82
Super Black G	0.859	46.48	0.823	48.72	1.066	33.79	1.087	32.69
Navy LS-G	0.911	46.73	0.880	48.54	1.124	34.65	1.158	32.67
Orange LS-BR	1.131	31.50	1.117	32.34	1.467	12.73	1.469	12.61
Blue LS-3R	0.850	46.30	0.817	48.39	1.065	31.38	1.064	31.44
Red LS-B	0.751	44.78	0.702	48.38	0.966	28.60	0.933	31.04
Br.Blue LS-G	0.622	40.01	0.592	42.91	0.786	23.84	0.763	26.07
Turquoise H-GN	0.647	39.70	0.618	42.40	0.820	24.14	0.797	26.27
เฉลี่ยร้อยละ	-	40.33	-	42.17	-	25.10	-	24.52
สีที่เหลือใช้	0.879	-	0.853	-	1.122	-	1.137	-

ตารางผนวกที่ 28 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

ชนิดสีข้อม	ค่าเริ่มต้น	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
Yellow LS-R-01	1.637	0.0084	99.49
Yellow LS-4G	1.791	0.0948	94.71
Super Black G	1.658	0.0546	96.71
Navy LS-G	1.736	0.0532	96.94
Orange LS-BR	1.734	0.0800	95.39
Blue LS-3R	1.617	0.0470	97.09
Red LS-B	1.400	0.0522	96.27
Br.Blue LS-G	1.061	0.0496	95.33
Turquoise H-GN	1.035	0.0534	94.84
เฉลี่ยร้อยละ	-	-	96.31

ตารางผนวกที่ 29 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงาน
ย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यดุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการทดลองแบบแบดซ์

ชนิดสีข้อม	ค่าเริ่มต้น	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
Yellow LS-R-01	0.463	0.179	62.34
Yellow LS-4G	0.355	0.132	62.82
Super Black G	0.154	0.078	49.35
Navy LS-G	0.154	0.079	48.70
Orange LS-BR	0.327	0.137	58.10
Blue LS-3R	0.158	0.079	50.00
Red LS-B	0.091	0.078	55.93
Br.Blue LS-G	0.078	0.069	51.41
Turquoise H-GN	0.058	0.069	52.41
เฉลี่ยร้อยละ	-	-	54.45

ตารางผนวกที่ 30 ประสิทธิภาพของส่วนผสมตัวดูดซับกับดินเหนียวปนทรายในอัตราส่วน 1: 5 กับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงาน
ย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

ชนิดสีข้อม	ค่าเริ่มต้น	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
Yellow LS-R-01	0.494	0.184	62.79
Yellow LS-4G	0.440	0.132	70.09
Super Black G	0.195	0.052	73.13
Navy LS-G	0.202	0.060	70.20
Orange LS-BR	0.375	0.118	68.59
Blue LS-3R	0.205	0.064	68.78
Red LS-B	0.225	0.065	71.20
Br.Blue LS-G	0.170	0.058	66.00
Turquoise H-GN	0.171	0.059	65.26
เฉลี่ยร้อยละ	-	-	68.45

ตารางผนวกที่ 31 ประสิทธิภาพตัวดูดซับผสมกับดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกของต้นกกกลมกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated lysimeter technique)

ชนิดสีข้อม	ค่าเริ่มต้น	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)		ร้อยละการกำจัด	
		กระเบปปลูกที่ไม่ผสม	กระเบปปลูกที่ผสม	กระเบปปลูกที่ไม่ผสม	กระเบปปลูกที่ผสม
		ตัวดูดซับ (ชุดควบคุม)	ตัวดูดซับ	ตัวดูดซับ (ชุดควบคุม)	ตัวดูดซับ
Yellow LS-R-01	1.740	0.761	0.105	36.13	93.95
Yellow LS-4G	1.856	0.543	0.069	54.66	96.30
Super Black G	1.776	0.726	0.069	36.02	96.13
Navy LS-G	1.899	0.573	0.068	44.61	96.44
Orange LS-BR	1.886	0.794	0.066	8.72	96.52
Blue LS-3R	1.745	0.504	0.072	3.85	95.85
Red LS-B	1.541	0.552	0.055	3.51	96.45
Br.Blue LS-G	1.225	0.472	0.038	14.55	96.93
Turquoise H-GN	1.287	0.770	0.040	25.00	96.89
เฉลี่ยร้อยละ	-	0.633	0.065	25.23	96.16

ตารางผนวกที่ 32 ประสิทธิภาพตัวดูดซับผสมกับดินเหนียวปนทรายเป็นวัสดุเพาะปลูกของต้นรูปถ่ายกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยวิธีการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated lysimeter technique)

ชนิดสีข้อม	ค่าเริ่มต้น	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)		ร้อยละการกำจัด	
		กระเบบปลูกที่ไม่ผสม	กระเบบปลูกที่ผสม	กระเบบปลูกที่ไม่ผสม	กระเบบปลูกที่ผสม
		ตัวดูดซับ (ชุดควบคุม)	ตัวดูดซับ	ตัวดูดซับ (ชุดควบคุม)	ตัวดูดซับ
Yellow LS-R-01	1.740	0.541	0.093	54.62	94.67
Yellow LS-4G	1.856	0.662	0.054	44.07	97.11
Super Black G	1.776	0.770	0.051	35.17	97.11
Navy LS-G	1.899	0.611	0.046	40.69	97.58
Orange LS-BR	1.886	0.516	0.053	41.28	97.17
Blue LS-3R	1.745	0.504	0.050	3.85	97.15
Red LS-B	1.541	0.543	0.039	5.26	97.47
Br.Blue LS-G	1.225	0.512	0.036	7.27	97.03
Turquoise H-GN	1.287	0.751	0.037	26.47	97.10
เฉลี่ยร้อยละ	-	0.61	0.093	28.74	96.63

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวภาวิดา นิยมทอง
เกิดวันที่	วันที่ 25 กันยายน 2529
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่น	นำเสนอผลงานทางวิชาการ การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 มหาวิทยาลัย ศิลปากร (4-5 ตุลาคม 2555) เรื่อง การกำจัดสีข้อมในน้ำ ทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง โดยใช้ เปลือกกะลามะคาเดเมียและดินเป็นวัสดุเพาะปลูกใน ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม แหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2555)