

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์ และสัลดจ์
จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสัลดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว



นางสาวปรางศิริ ศรีสุภพัชร

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF DYE ADSORPTION EFFICIENCIES BY ACTIVATED CARBON AND
DIGESTED SLUDGE FROM ACTIVATED SLUDGE WASTEWATER TREATMENT



Miss Prangsiri Srisuppuch

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

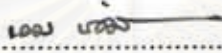
Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม โดยดำนกัมมันต์ และ สไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว
โดย	นางสาวปรางศิริ ศรีสุภพัชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรรมกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิริวงศ์)

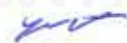
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรรมกุล)




..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชกรกิจ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชุต ปัญญาปิยพงษ์)

ปรางศิริ ศรีสุภพัชร : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมโดยด่างกับมันด์ และ
 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว (COMPARISON OF
 DYE ADSORPTION EFFICIENCIES BY ACTIVATED CARBON AND DIGESTED
 SLUDGE FROM ACTIVATED SLUDGE WASTEWATER TREATMENT). อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.พิสุทธ์ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.ปฎิภาณ
 ปัญญาพลกุล, 168 หน้า.

จุดประสงค์ในวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและปรากฏการณ์การดูดซับสีข้อม (สีข้อม
 รีแอกทีฟ (RBS) และสีข้อมเบสิก (BY1)) โดยใช้สลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ
 แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เปรียบเทียบกับด่างกับมันด์ชนิดผงเกรดการค้า โดยศึกษาผลกระทบของการ
 ปรับปรุงสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยกรด และค่าพีเอช และ อุณหภูมิ ต่อความสามารถใน
 การดูดซับสีข้อม โดยทำการทดลองแบบทีละเท รวมถึงศึกษาคุณสมบัติการคัดเลือกมลสารระหว่าง
 สีข้อมและสารลดแรงดึงผิวประเภทไม่มีประจุ (TX-100) ในสารละลายผสม ผลการวิจัยพบว่า สาร
 ดูดซับประเภทสลัดจ์และ สารดูดซับประเภทด่างกับมันด์สามารถดูดซับสีข้อมทั้ง 2 ชนิดโดยใช้
 เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 และ 360 นาทีตามลำดับ และ สารดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสารลดแรงดึง
 ผิวโดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน สีข้อม BY1 ถูกดูด
 ซับได้ดีที่สุดที่พีเอช 9 และ พีเอช 7 ด้วยด่างกับมันด์กระตุ้นด้วยค่าพีเอชและสลัดจ์กระตุ้นด้วยค่า
 ค่าพีเอช ในขณะที่สีข้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วยด่างกับมันด์กระตุ้นด้วยกรดและสลัดจ์
 กระตุ้นด้วยกรดที่พีเอช 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า pH_{fzc} กระบวนการดูดซับสีข้อมด้วยสารดูดซับ
 ประเภทด่างกับมันด์สอดคล้องกับสมการ ไอโซเทอมของแลงมัวร์ ส่วนสารดูดซับประเภทสลัดจ์
 สอดคล้องทั้งสมการ ไอโซเทอมของแลงมัวร์ และฟรุนดลิช สารดูดซับส่วนใหญ่ดูดซับสีข้อมด้วย
 กระบวนการดูดความร้อน ส่วนผลของการคัดเลือกมลสารระหว่างสีข้อมและสารลดแรงดึงผิวพบว่า
 สารดูดซับประเภทด่างกับมันด์สามารถดูดซับสารลดแรงดึงผิวและสีข้อมได้ลดลงในสารละลาย
 ผสม ยกเว้นด่างกับมันด์ธรรมชาติดูดซับสีข้อม BY1 ลดลงโดยที่การดูดซับสารลดแรงดึงผิวไม่
 เปลี่ยนแปลง ส่วนสารดูดซับประเภทสลัดจ์พบว่าสามารถดูดซับสารลดแรงดึงผิวลดลงแต่ดูดซับสี
 ข้อมทั้ง 2 ชนิดได้ไม่เปลี่ยนแปลงยกเว้นกรณีดูดซับสีข้อม RB5 ผสมด้วย TX-100 ด้วยสลัดจ์
 กระตุ้นด้วยกรดและสลัดจ์กระตุ้นด้วยค่าพีเอช ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีข้อมพบว่าสลัดจ์ที่ไม่ถูกกระตุ้น
 สามารถกำจัดสีข้อม BY1 โดยมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการใช้ด่างกับมันด์ชนิดผง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อนิติศ.....	ปวงษ์	ณัฐว
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่ออ.ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....		
ปีการศึกษา..... 2551.....	ลายมือชื่ออ.ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....		

4970827121: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ADSORPTION/ ACTIVATED CARBON/ REACTIVE DYES/ BASIC DYRS/
SURFACTANT

PRANGSIRI SRISUPPUCH: COMPARISON OF DYE ADSORPTION EFFICIENCIES
BY ACTIVATED CARBON AND DIGESTED SLUDGE FROM ACTIVATED
SLUDGE WASTEWATER TREATMENT. ADVISOR: PISUT PEANMONAKUL,
Ph.D., CO-ADVISOR: PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 168 pp.

The objective of this research is to study adsorption efficiency and phenomenon of ionic dyes (reactive black 5 (RB5) and basic yellow 1 (BY1)) by using digested sludge from wastewater treatment system comparing with commercial-grade powder activated carbon (PAC). Effects of acid or base surface treatment, pH, temperature on ionic dyes adsorption capacities were investigated by batch experiments. Moreover, the selective adsorption between nonionic surfactant (TX-100) and ionic dyes was also studied. The results have showed that the sludge-type and PAC-type adsorbents can adsorb both types of dyes and reach the equilibrium state within 60 and 360 minutes, respectively. While the adsorption of TX-100 corresponds with 60 minutes for reaching the equilibrium state. All adsorbents kinetic data can be described by using pseudo-second order equation. Moreover, RB5 had the highest adsorption capacity at pH 9 and pH 7 for base-treated PAC and sludge, respectively. Whereas, BY1 had highest adsorption capacities by acid-treated PAC and sludge at pH 9. This conforms with the pH_{pzc} values. Adsorption isotherms can be explained by Langmuir isotherm for all PAC group and both Langmuir and Freundlich isotherms for all sludge group. The endothermic system is likely occurred in this study. Due to the selective adsorption experiments in bi-solution, lower adsorption capacities for both ionic dyes and TX-100 by all PAC group can be observed, except in the cases of BY1 adsorption by untreated PAC that there is insignificant variation on TX-100 adsorption. On the other hand, by using sludge group, the adsorption capacity of TX-100 reduced, while ionic dyes are roughly constant. Note that, in case of acid-treated sludge and base-treated sludge, the different phenomena compared previous experimental results with RB5 dye obtained with dried sludge was investigated. For non-treated sludge, the treatment cost for removal BY1 was lower than that for using PAC.

Department: ...Environmental Engineering...

Student's Signature..... Prangsi Srisupuch.....

Field of Study: ...Environmental Engineering.....

Advisor's Signature..... P. P.....

Academic Year:2008.....

Co- Advisor's Signature..... P. P.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆ ฝ่ายด้วยกันจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้ โดยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) อาจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

กราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันได้แก่ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล ที่ได้คำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการน้ำดี ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ รวมทั้งเครื่องมือทางเทคนิคตลอดงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ได้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมที่อำนวยความสะดวกให้ในการจัดเก็บตัวอย่าง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า และ พี่สาวทั้ง 2 ท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนค่าเล่าเรียน คอยช่วยเหลือค่าใช้จ่ายบางส่วนในงานวิจัย และคอยให้กำลังใจอันเป็นแรงผลักดันสำคัญยิ่งให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ	
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ	
สารบัญ.....	ช	
สารบัญตาราง.....	ฎ	
สารบัญภาพ.....	ฏ	
บทที่ 1 บทนำ		
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1	
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2	
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3	
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4	
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....		5
2.1 สารกุกูดซับ (สีย้อม).....	5	
2.1.1 สีของน้ำเสีย.....	5	
2.1.2 การวัดสี.....	5	
2.2 สีย้อม.....	6	
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม.....	6	
2.2.2 เคมีของสีย้อม.....	8	
2.2.3 ประเภทสีย้อม.....	8	
2.2.4 สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัย.....	11	
2.3 สีรีแอกทีฟ.....	11	
2.3.1 ประวัติของสีย้อมรีแอกทีฟ.....	11	
2.3.2 สมบัติของสีรีแอกทีฟ.....	12	
2.3.3 โครงสร้างทางเคมี.....	12	
2.4 สีเบสิก.....	12	
2.4.1 สมบัติของสีเบสิก.....	12	
2.4.2 ประเภทของสีเบสิก.....	13	

2.4.3	การเชื่อมตีเบสิก.....	13
2.5	ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม.....	13
2.6	สารลดแรงตึงผิว.....	14
2.6.1	สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ.....	15
2.6.2	สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก.....	15
2.6.3	สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ.....	15
2.6.4	สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ.....	15
2.7	กระบวนการฟอกย้อมและแหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม.....	17
2.7.1	กระบวนการฟอกย้อม.....	17
2.7.2	แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม.....	18
2.7.3	ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	23
2.7.4	การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกสี.....	24
2.8	กระบวนการดูดซับ.....	26
2.8.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	27
2.8.2	สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	28
2.9	ถ่านกัมมันต์.....	30
2.9.1	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	30
2.9.2	ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	35
2.9.3	การประเมินและการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์.....	35
2.10	สลัดจ์.....	36
2.10.1	สลัดจ์ดิบ.....	36
2.10.2	สลัดจ์ขั้นแรก.....	37
2.10.3	สลัดจ์ขั้นที่สอง.....	37
2.10.4	แหล่งกำเนิดของสลัดจ์.....	38
2.10.5	สลัดจ์จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม.....	39
2.11	การกระตุ้นสารดูดซับ.....	41
2.11.1	วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation).....	41
2.11.2	วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation).....	42
2.12	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	44
2.12.1	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	44
2.12.2	จลนศาสตร์.....	46

2.12.3	การหาพื้นที่ผิว	47
2.12.4	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	50
2.12.5	การวิเคราะห์ค่าพีเอชที่ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Point of Zero Charge : pH_{pzc})	52
2.12.6	HPLC (High Performance Liquid Chromatography)	53
2.12.7	การวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (CHNS/O Analyzer).....	54
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	61
3.1	แผนการศึกษา.....	61
3.2	โมเดลในการทดลอง.....	62
3.3	สารดูดซับ.....	62
3.3.1	สีย้อม.....	62
3.3.2	สารลดแรงตึงผิว.....	63
3.4	การเตรียมสารดูดซับ และน้ำเสียสังเคราะห์.....	64
3.4.1	สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย.....	64
3.4.2	ถ่านกัมมันต์ชนิดผง.....	65
3.4.3	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	65
3.5	สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับ.....	66
3.5.1	การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	66
3.5.2	การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	66
3.5.3	การวิเคราะห์ค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุ บนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Point of Zero Charge (pHPZC)).....	66
3.5.4	การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ.....	67
3.6	การดูดซับสีย้อม.....	67
3.6.1	จลนศาสตร์ของสีย้อมบนพื้นผิวของสารดูดซับสีย้อม.....	67
3.6.2	ประสิทธิภาพ และไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม.....	70
3.6.3	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม.....	72
3.6.4	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม.....	73

3.7	สมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิวและสีย้อม ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	74
3.7.1	จลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของสารดูดซับ.....	74
3.7.2	ประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	76
3.7.3	การศึกษาคุณสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสาร ระหว่างสารลดแรงตึงผิว และ สีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์	77
3.8	การเปรียบเทียบสารดูดซับในเชิงเศรษฐศาสตร์.....	80
3.9	อุปกรณ์และสารเคมี.....	80
3.9.1	เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสารดูดซับ.....	80
3.9.2	อุปกรณ์ในการทดลอง.....	80
3.9.3	สารเคมี.....	81
บทที่ 4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	82
4.1	สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับ.....	82
4.1.1	พื้นที่ผิวของสารดูดซับ	82
4.1.2	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารดูดซับ.....	83
4.1.3	ค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Point of Zero Charge (pH _{pzc})).....	85
4.1.4	ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Elemental Analysis)	87
4.2	การดูดซับสีย้อม.....	87
4.2.1	จลนศาสตร์ของสีย้อมบนพื้นผิวของสารดูดซับ.....	87
4.2.2	ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม.....	93
4.2.3	ผลการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างต่อประสิทธิภาพ ในการดูดซับสีย้อม.....	96
4.2.4	ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	98
4.2.5	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม	105
4.3	การคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิว และสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม.....	111
4.3.1	จลนศาสตร์การดูดซับสารลดแรงตึงผิวของสารดูดซับ.....	111
4.3.2	ความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	113
4.3.3	ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีย้อม.....	115
4.3.4	ผลกระทบของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	120

4.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการกำจัดสีข้อมด้วยสารดูดซับ.....	126
4.4.1 การคำนวณปริมาณสารดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีข้อม.....	126
4.4.2 ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ เตรียมสารดูดซับ และการกำจัดกากตะกอน.....	127
4.4.3 สรุปค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด.....	128
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	130
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	130
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	132
รายการอ้างอิง.....	133
ภาคผนวก	138
ภาคผนวก ก ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับสีข้อม.....	139
ภาคผนวก ข ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสีข้อม.....	146
ภาคผนวก ค ข้อมูลการศึกษาสมการเทอร์โมไดนามิกส์.....	155
ภาคผนวก ง รายละเอียดการวิเคราะห์ด้วย.....	158
High Performance Liquid Chromatography (HPLC)	
ภาคผนวก จ ข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารดูดซับ.....	160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกสีข้อมตามลักษณะการใช้งาน.....	9
2.2 ตัวอย่างน้ำสนู้.....	16
2.3 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบ แยกที่เวเต็คสลัดจ์.....	38
2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	59
3.1 สมบัติของสารดูดซับ	63
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์ของสีข้อมบนพื้นผิวสารดูดซับ.....	69
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอมในการดูดซับสีข้อม.....	71
3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม.....	72
3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม.....	73
3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวสารดูดซับสีข้อม....	75
3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	76
3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม.....	77
3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของสีข้อมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	79
4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ.....	82
4.2 หมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับที่เปลี่ยนแปลง.....	85
4.3 ค่า pH_{pzc} และประจุของสารดูดซับในสารละลายพีเอชต่างๆ	86
4.4 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารดูดซับ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge.....	87
4.5 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ (RB5).....	92
4.6 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับสีข้อมเบสิก (BY1).....	92
4.7 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช.....	95
4.8 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ (RB5)	99
4.9 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมเบสิก (BY1)	100
4.10 แรงที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมของสารดูดซับ.....	104
4.11 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม.....	105
4.12 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาสารลดแรงตึงผิว.....	112
4.13 ผลกระทบของสีข้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว.....	118
4.14 ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีข้อม.....	118

4.15	ผลการคัดเลือกมลสารระหว่างสี้อมและสารลดแรงตึงผิว.....	124
4.16	ความสามารถในการดูดซับสี้อมที่ความเข้มข้นสี้อมคงเหลือต่างๆ.....	126
4.17	ปริมาณสารดูดซับที่ใช้ต่อวัน.....	127
4.18	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ D-Sludge.....	127
4.19	ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอน.....	128
4.20	สรุปค่าใช้จ่ายในการใช้สารดูดซับในการกำจัดสี้อม.....	128
ก-1	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย PAC.....	140
ก-2	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย A-PAC.....	141
ก-3	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย B-PAC.....	142
ก-4	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย D-Sludge.....	143
ก-5	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย A-Sludge.....	144
ก-6	ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี้อมด้วย B-Sludge.....	145
ข-1	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย PAC.....	147
ข-2	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย A-PAC.....	147
ข-3	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย B-PAC.....	148
ข-4	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย D-Sludge.....	148
ข-5	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย A-Sludge.....	149
ข-6	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมเบสิกด้วย B-Sludge.....	149
ข-7	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย PAC.....	150
ข-8	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย A-PAC.....	150
ข-9	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย B-PAC.....	151
ข-10	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย D-Sludge.....	151
ข-11	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย A-Sludge.....	152
ข-12	ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟด้วย B-Sludge.....	152
ค-1	ตัวอย่างการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสี้อมเบสิกด้วย PAC.....	156
ค-2	ข้อมูลจากการคำนวณสมการเทอร์โมไดนามิกส์.....	157

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	20
2.2	21
2.3	22
2.4	29
2.5	32
2.6	33
2.7	34
2.8	45
2.9	46
2.10	48
2.11	50
3.1	61
3.2	62
3.3	62
3.4	63
3.5	63
4.1	84
4.2	86
4.3	88
4.4	89
4.5	90
4.6	97
4.7	101
4.8	102
4.9	106
4.10	108
4.11	112
4.12	114
4.13	115

4.14	ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีของ PAC A-PAC และ B-PAC.....	116
4.15	ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีของ D-Sludge A-Sludge และB-Sludge.....	117
4.16	ผลของสีต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิวของ PAC A-PAC และ B-PAC	121
4.17	ผลของสีต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิวของ D-Sludge A-Sludge และB-Sludge	122
4.18	กลไกการดูดซับสารละลายสีของผสมสารลดแรงตึงผิว.....	125
ข-1	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์	153
ข-2	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	154
ค-1	ตัวอย่างเทอร์โมไดนามิกส์	157
จ-1	FT-IR ของ A-PAC.....	161
จ-2	FT-IR ของ B-PAC.....	162
จ-3	FT-IR ของ D-Sludge.....	162
จ-4	FT-IR ของ A-Sludge.....	163
จ-5	FT-IR ของ B-Sludge.....	163
จ-6	หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ.....	165
จ-7	หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และพื้นที่ผิวภายนอก.....	166
จ-8	รายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน.....	167

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน เป็นผลเนื่องมาจากการเร่งความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเป็นต้นทุนในการพัฒนา ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ปัญหาขยะ ปัญหาอากาศเป็นพิษ ปัญหาน้ำเสีย ฯลฯ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดจากการกระทำของมนุษย์ที่ขาดการพัฒนาอย่างมีจิตสำนึก แต่ในปัจจุบันได้มีการรณรงค์ในการรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น โดยชุมชน เอกชน และหน่วยงานของรัฐ ทำให้อุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการปลดปล่อยมลสารต่างๆ อาทิเช่น สารอินทรีย์ สารพิษ สี และโลหะหนัก ลงสู่แหล่งน้ำ จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีต่างๆ เพื่อกำจัดมลสารดังกล่าวให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือ เกิดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในปริมาณมาก รวมทั้งมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ และยากต่อการกำจัด เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ก็เป็นที่ทราบกันว่าสารวัตถุอินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และเป็นสารก่อมะเร็ง และแม้มีสีย้อมอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งสารลดแรงตึงผิว (สบู่สังเคราะห์) ถูกใช้เป็นสารช่วยย้อมในการล้างทำความสะอาดในขั้นตอนสุดท้ายของการฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียจะมีสารลดแรงตึงผิวหลงเหลือจากกระบวนการฟอกย้อมส่งผลให้มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ทำให้เกิดฟองจำนวนมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลานานที่กระบวนการธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด

โดยทั่วไปการกำจัดสีย้อมทำได้หลายวิธี เช่น การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีววิทยา การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอนด้วยสารเคมี การดูดซับ และการออกซิเดชัน ไร้ดักชั้น เทคโนโลยีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเทคโนโลยีที่มักถูกนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดมลสารต่างๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ถ่านกัมมันต์จึงจัดเป็นวิธีที่สามารถลดระดับสีให้อยู่ในปริมาณต่ำๆ ได้ดี แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ต่างกันมีกระบวนการผลิตและกระบวนการกระตุ้นที่ต่างกันจะส่งผลให้สมบัติ

ของถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างกันด้วย จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการใช้งาน รวมทั้งถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ จำเป็นต้องลงทุนสูงทำให้ไม่คุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่เสียไป

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุเหลือใช้ต่างๆ ที่หาง่ายและราคาถูก มาเป็นสารดูดซับทดแทนถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานจากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของระบบ ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีทั้งของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ รวมทั้งการกระตุ้นสารดูดซับซึ่งการกระตุ้นสารดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวในการดูดซับมากขึ้น และเป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ ซึ่งการกระตุ้นสารดูดซับทางเคมีโดยการกระตุ้นด้วยกรดและด่างจะมีผลทำให้สมบัติของสารดูดซับเปลี่ยนไปเกิดมีประจุบนพื้นผิวที่เปลี่ยนไปซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

โดยงานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาโดยใช้สัลดิจ์ที่ย่อยแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นสารดูดซับ (adsorbent) เนื่องจากสัลดิจ์เป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย และยังต้องนำไปกำจัดซึ่งเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ ดังนั้นการนำสัลดิจ์กลับมาใช้สำหรับเป็นสารดูดซับจึงเป็นการนำกลับมาใช้ประโยชน์ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดการสัลดิจ์อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟ และสีเบสิก โดยใช้สัลดิจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียและถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพ (อุณหภูมิ และค่าพีเอช) และทางเคมี (การกระตุ้นสารดูดซับด้วยกรดและด่าง) ที่มีผลต่อการดูดซับ ศึกษาจลนศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ รวมทั้งศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิว และสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ดูดซับสี้อมด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ สีรีแอกทีฟ และสีเบสิก จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยสัลดิจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

1.2.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผง และสัลดิจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ด้วยกรด และด่าง ที่มีต่อกระบวนการดูดซับ สีรีแอกทีฟ และสีเบสิก

1.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ และพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ สีรีแอกทีฟ และสีเบสิก โดยถ่านกัมมันต์ชนิดผง และสัลดิจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย

1.2.4 ศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกลสารระหว่างสีข้อมและสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สารดูดซับ และสีข้อม

ทำการทดลองแบบทีละเทโดยใช้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง 3 ชนิดและสัจจจากระบบบำบัดน้ำเสีย 3 ชนิด เป็นสารดูดซับ

1.3.1.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) จากบริษัท Enviro Chemicals Ltd. จากประเทศญี่ปุ่น และทำการปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวถ่านกัมมันต์เพิ่มอีก 2 ชนิด รวมเป็น 3 ชนิดดังนี้

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง

1.3.1.2 สัจจจากระบบบำบัดน้ำเสีย นำมาจากลานตากตะกอน ซึ่งเป็นสัจจที่ข่อยแล้วด้วยระบบไร้อากาศจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม อยู่ในสังกัดกลุ่มงานปฏิบัติการ 3 (หนองแขม) สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นโรงควบคุมคุณภาพน้ำที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสัจจ ทำการสังเคราะห์สัจจออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- สัจจไม่ถูกกระตุ้น
- สัจจกระตุ้นด้วยกรด
- สัจจกระตุ้นด้วยด่าง

1.3.1.3 สีข้อม

สีข้อมที่ทำการศึกษามี 2 ชนิด คือ สีข้อมรีแอกทีฟ และสีข้อมเบสิกโดยจำแนกชนิดสีข้อมดังนี้

- สีข้อมรีแอกทีฟ ได้แก่ รีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5)
- สีข้อมเบสิก ได้แก่ เบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1)

1.3.2 ปัจจัยทางเคมีและทางกายภาพที่ทำการศึกษา

1.3.2.1 ค่าพีเอช (พีเอช 5, 9 และ 7)

1.3.2.2 อุณหภูมิ (25 ± 2 , 40 ± 2 และ 55 ± 2 องศาเซลเซียส)

1.3.3 สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ สาร iso-octylphenol polyethoxylate (Triton X-100) เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ

1.3.4 สถานที่ทำการวิจัย คือภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1.4.1 เพื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับสีของสัจจจากระบบบำบัดน้ำเสีย

1.4.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สัจจจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เหลือทิ้ง นำมาทำให้เกิดประโยชน์กับระบบบำบัดน้ำเสีย และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อไปกำจัดมลพิษอื่นๆ

1.4.3 เข้าใจถึงกลไกและผลกระทบจากสารลดแรงตึงผิวต่อกระบวนการดูดซับสีของในน้ำเสียจริง และนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการดูดซับมลสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารตกค้าง (สีข้อม)

2.1.1 สีของน้ำเสีย

สีของน้ำที่ปรากฏให้เห็นโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

2.1.1.1 สีแท้หรือสีจริง (True Color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งสารที่ทำให้เกิดสีแท้ ได้แก่ โปรตีน ไนมัน คาร์โบไฮเดรต และสารประกอบของสารประกอบทั้งสามดังกล่าว เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ

2.1.1.2 สีปรากฏ (Apparent Color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้แก่ พีชเล็กๆ ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) และแพลงก์ตอนสัตว์ (Zooplankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น ซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

สีทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกัน โดยใช้วิธีหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งพวกสีปรากฏจะตกตะกอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544) และเมื่อสามารถกำจัดสีปรากฏออกไปได้จะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้

สำหรับสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าเกิดจากการใช้สีข้อมในกระบวนการย้อม ซึ่งอนุภาคของสีข้อมเหล่านี้จะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย อันเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียเกิดสีขึ้น อนุภาคของสีข้อมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดสีในน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคของสีข้อมจะทำให้เกิดสีแท้ในน้ำเสีย

2.1.2 การวัดสี (วจน์สิริ ประยูรพรหม, 2539)

2.1.2.1 วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum Cobalt Standard)

วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน จะเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานออกสีเหลืองๆ คล้ายน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard Color Comparison Tubes) หรือที่

เรียกว่า หลอดคนสเลอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสีมานานแล้ว ข้อดีคือราคาถูก แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีการเตรียมมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งานทุกครั้ง

2.1.2.2 วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption Maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าสีของน้ำตัวอย่าง ในรูปการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยมีหลักการที่ว่า สีเข้มจะดูดกลืนแสงมาก หรืออัตราการทะลุผ่าน ของแสงน้อย สำหรับการอ่านค่าความเข้มของสีอ่านได้จากกราฟมาตรฐาน ที่ทำขึ้นมา (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2544)

2.2 สีย้อม (Dyes)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม (นริขญา กวินันทวงศ์, 2542 และเสกสรรค์ เขียวขวัญ กิจ, 2546)

สีย้อมทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม โดยคุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าชนิดต่างๆ นั้น ต้องติดคงทน ทนต่อแสงแดด น้ำ สบู่ และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นเมื่อสีย้อมส่วนที่ไม่ติดไปกับเนื้อผ้าก็จะปนไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่ยากแก่การบำบัดเพราะจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2527) กล่าวว่าสีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น เกิดจากอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยคือ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์

2.2.1.1 พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (hydroxy) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นๆ ได้เป็นวาเลนซ์ที่สอง (secondary valency) เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ เส้นใยและตัวสีเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซี

2.2.1.2 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นแรงที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดกันได้เอง โดยเฉพาะระหว่างตัวสีกับเส้นใย จะเกิดแรงนี้ยึดให้ติดกันได้ เมื่อโมเลกุลของทั้งสองมีเอกลักษณ์พิเศษ คือ มีโมเลกุลยาวและแบน ดังเช่นโมเลกุลของเซลลูโลส สีแฉะหรือสีไคเรกท์ หรือระหว่างเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตกับสียีสเพอร์ส

2.2.1.3 พันธะไอออนิก (Ionic Bonding) เกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนออกไป ทำให้ตัวของมันเองมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยลง จึงแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายได้รับอิเล็กตรอนก็จะกลายเป็นประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่แตกต่างกันจึงเรียกว่าไอออนิก พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่แข็งแรง (Strong) แต่เปราะ (Brittle) จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีแบบนี้เกิดขึ้นโดยไฟฟ้าต่างศักย์ เส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนใหญ่สีซึ่งละลายน้ำจะมีไอออนของสีเป็นลบ การดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอร์วาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าใช้ตัวสีที่มีไอออนเป็นบวกก็ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใย ตัวอย่างเช่นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก

2.2.1.4 พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เป็นพันธะทางเคมีที่ซึ่งอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงกว่าแรงที่กล่าวมาแล้วทั้งสิ้น เช่น สีรีแอคทีฟจะยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งสามารถยึดได้หนาแน่น และทำให้แยกตัวออกจากกันได้ยาก

แรงเหล่านี้มักจะทำหน้าที่ร่วมกัน การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีที่ย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ ซึ่งการยึดติดของโมเลกุลสีที่ย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว ยังมีอิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี เช่น ถ้าโมเลกุลของสีที่ย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ก็จะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีที่ย้อมมีลักษณะแบนและมีความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

2.2.2 เคมีของสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

2.2.2.1 พันธะคู่สลับ (conjugated double bonds) ทั้งโครโมฟอร์ และออกโซโครมต่างเชื่อมกับพันธะคู่สลับ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า โครโมเจน (chromogen)

2.2.2.2 โครโมฟอร์ (Chromophores) เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีในกลุ่มไมอิมด้วยวงแหวน $-NR^+$ หน้าที่ของโครโมฟอร์คือเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ให้สีแก่โมเลกุลของสีย้อม

2.2.2.3 ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มข้างเคียงที่เกาะอยู่บนโครโมฟอร์ที่สร้างลักษณะของความเข้มข้นสี (Intensity) และ/หรือปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม

เมื่อมีหมู่อื่นๆ มาเกาะแทนไฮโดรเจนอะตอมบนออกโซโครม เช่น หมู่อัลคิล (alkyl group) หมู่เอไมด์ (amide group) หรือหมู่อัลคอกซี (alkoxy group) เป็นต้น พบว่าจะทำให้สีเข้มขึ้นกว่าเดิม หรือในทางตรงข้ามทำให้สีอ่อนลงกว่าเดิม เพราะฉะนั้นสีที่มีโครงสร้างโครโมฟอร์เหมือนกันสามารถดัดแปรให้มีความหลากหลายของเฉดสีได้ นักเคมีสีย้อมได้อาศัยหลักการนี้ในการสังเคราะห์สีย้อมให้มีเฉดสีต่างๆ โดยดัดแปรหมู่ออกโซโครม

2.2.3 ประเภทสีย้อม

2.2.3.1 จำแนกตามแหล่งกำเนิดแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) สีย้อมธรรมชาติ เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2) สีย้อมสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

2.2.3.2 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

1) สีย้อม (dyes) สามารถละลายน้ำ
2) พิกเมนต์ (pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี

2.2.3.3 จำแนกตามวิธีใช้

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 10 ประเภท โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสี้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสี้อม	สมบัติทางกายภาพเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
1. สี้อมเอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าพีเอช 3-5 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
2. สี้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำน้อย -สีติดแน่นดี	-ไนลอน -ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าพีเอช 5-7 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
3. สี้อมไดเรกต์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายค่างอ่อน -เติมอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสี้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส
4. สี้อมเบสิก	- ประจุบวก - ละลายน้ำได้	- อะครีลิก	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าพีเอช 4-6 -เติมสี้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส
5. สี้อมรีแอกทีฟ	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดแน่น	-ฝ้าย -ขนสัตว์ -วิสคอส	พันธะโควาเลนต์	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย -เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย

ที่มา: อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) การจำแนกสีข้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีข้อม	สมบัติทางกายภาพเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
6.สีข้อมดิสเพอร์ส	-ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก -กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ -สติดแน่นดี	-อะครีริก -โพลีเอสเตอร์ -ไนลอน -เซลลูโลส -อะซิเตต	คอลลอยด์ของสีข้อมดูดซับเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่า พีเอช 4-5 เดิมสีข้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส
7.สีข้อมซัลเฟอร์	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาคกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีข้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีข้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโทรไลต์
8.สีข้อมแเว็ด	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาคกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีข้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีข้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโทรไลต์
9.สีข้อมอะโซอิก	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาคกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีข้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีข้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโทรไลต์ -ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
10.สีข้อมมอร์แดนท์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สติดแน่น	ขนสัตว์	คอลลอยด์ของสีข้อมดูดซับเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโครเมียมไดโครเมียมไดโครเมต และสีข้อม -เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศาเซลเซียส

ที่มา: อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539)

2.2.4 สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัย

สีย้อมที่เลือกสำหรับงานวิจัยครั้งนี้มี 2 ชนิดคือ สีรีแอกทีฟ และสีเบสิก ซึ่งเหตุผลสำหรับการเลือกสีย้อมทั้งสองชนิดมีดังต่อไปนี้

2.2.4.1 เลือกสีย้อมที่มีสมบัติทางเคมี 2 ประเภท คือเป็นสีย้อมที่ให้ประจุบวก ประจุลบ ซึ่งได้แก่ สีเบสิก และสีรีแอกทีฟ ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถของการดูดซับของสารดูดซับ

2.2.4.2 สีย้อมชนิดรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่เมื่อละลายน้ำแสดงประจุเป็นลบ และเป็นสีย้อมที่เมื่อผ่านกระบวนการฟอกย้อมจะมีปริมาณสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งสูงถึง 5-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นสีย้อมที่ปนเปื้อนมากที่สุด (สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2545)

2.2.4.3 สีเบสิกเป็นสีย้อมที่มีประจุบวก เพียงชนิดเดียวในบรรดาสีย้อมทั้ง 10 ชนิดของสีย้อม

สีย้อมที่เป็นตัวแทนสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอกทีฟโทนสีดำ 5 (Reactive Black 5) และสีเบสิกสีโทนเหลือง 1 (Basic Yellow 1) ซึ่งสีย้อมทั้งสองชนิด เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมและในงานวิจัยเป็นอย่างมาก

- สีรีแอกทีฟโทนสีดำ 5 (Reactive Black 5) ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตสีรีแอกทีฟโทนสีอื่นๆ และใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส (ฉัฐพล อิงอรวิจิตตรา, 2551)

- สีเบสิกสีโทนเหลือง 1 (Basic Yellow 1) ใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ และยังใช้ในการย้อมสิ่งทอด้วย

2.3 สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) (เสกสรรค์ เชี่ยวชาญกิจ, 2546)

3.3.1 ประวัติของสีรีแอกทีฟ

ในช่วงปี ค.ศ. 1952 บริษัทอิมพีเรียลเคมีคอลอินคอร์ปอเรชัน (ICI) การคิดค้นกระบวนการย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ ได้เป็นผลสำเร็จใน และได้วางจำหน่ายสีรีแอกทีฟชนิดแรกในปี ค.ศ. 1956 คือสีโพรเซียน ต่อมาก็มีอีกหลายบริษัทที่ผลิตออกจำหน่าย ใช้ชื่อทางการค้าต่างๆ กัน เช่น บริษัทชิบา (Ciba) เรียกว่าชิบาครอน (Cibacron) เป็นต้น

3.3.2 สมบัติของสีรีแอกทีฟ

สีรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีหลายสี มีความติดทนดี ย้อมง่าย ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของเซลลูโลสได้ ในสภาวะความเป็นด่างจะเกิดพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดีมากกว่าสีที่ติดโดยแรงฟิสิกัลเคมี (วรรณฯ ประทุมแก้ว, 2543) เนื่องจากโมเลกุลสีเชื่อมโยงติดกับเซลลูโลสโดยพันธะโควาเลนต์ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้สีมีความคงทนต่อการซักฟอก และการขจัด (โสภา ชินเวชกิจวานิชย์, 2540)

3.3.3 โครงสร้างทางเคมี

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปดังนี้

S-D-T-X

โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค (-SO₂Na) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใย

2.4 สีเบสิก (Basic dye) (ลิลี โกศัยยานนท์, 2541)

สีเบสิกจัดเป็นสีสังเคราะห์สีแรกของโลก โดยเพอร์คิน (W.H perkin) ในปี ค.ศ. 1856 (พ.ศ.2399) สีตัวแรกคือสีม่วงสด (อ่านว่า “โมฝ” (Mauve)) สีเบสิกเมื่อแตกตัวในน้ำย้อมจะมีประจุบวก สีสด แต่มีความคงทนต่อแสงต่ำ สีเบสิกที่มีใช้กันในปัจจุบันนี้ได้รับการปรับปรุงให้มีความคงทนต่อแสงดีขึ้นแล้ว

2.4.1 สมบัติของสีเบสิก

สีเบสิกมีสมบัติเด่น คือ สีสว่างสดใสและมีความเข้มสูง ละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์แต่ละลายในน้ำได้ยาก ในการละลายควรทำด้วยความระมัดระวังเพราะถ้าเกิดเป็นยางเหนียวๆ แล้วจะละลายได้ยากและน้ำที่ใช้ในการละลายสีหรือในการย้อมไม่ควรมีสภาวะเป็นด่าง

เนื่องจากสีเบสิก สลายตัวในสารละลายต่าง ได้สารไม่มีสีที่ละลายในน้ำได้เล็กน้อย เมื่อทิ้งไว้ชั่วคราว จะเกิดการตกตะกอน ดังนั้นถ้ามีสีจะเป็นต่าง ควรทำให้เป็นกลางด้วยกรดอะซิติกก่อน (นริษฎา กวีนั้นทวงศ์, 2542)

นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยอะคริลิก (acrylic fiber) ราคาของสีเบสิกไม่สูงนัก และสีเบสิกบางตัวเป็นสีสะท้อนแสงอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถย้อมเส้นใยไหมและขนสัตว์ได้อีกด้วย เกิดเป็นพันธะ ไอออนิกขึ้นระหว่างประจุลบบนเส้นใย และประจุบวกของสี

2.4.2 ประเภทของสีเบสิก

จำแนกสีเบสิกตามความสามารถเข้ากันได้ของสีเบสิก (Compatibility of Cationic Dyes) หรือเรียกย่อๆ ว่า ค่าเค (K-Value) ซึ่งกำหนดโดยสมาคมนักย้อมสีและนักผลิตสี ประเทศอังกฤษซึ่งกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 โดยค่าเคเท่ากับ 1 (K-1) เป็นสีที่มีความสามารถติดเส้นใยได้อย่างรวดเร็วที่สุด ส่วนค่าเคเท่ากับ 5 (K-5) หมายถึงสีที่มีความสามารถติดเส้นใยได้ช้าที่สุด

2.4.3 การย้อมสีเบสิก

กลไกของการย้อมสีเบสิกบนเส้นใยอะคริลิกมี 3 ขั้นตอนคือ

2.4.3.1 สีประจุบวกถูกดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใย

2.4.3.2 การแทรกซึมของสีเข้าไปในเส้นใย

2.4.3.3 การครอบครองของสีบนเส้นใยที่เป็นประจุลบ

เนื่องจากเส้นใยอะคริลิกไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี เนื่องจากธรรมชาติของเส้นใยไม่ค่อยชอบน้ำ ไม่เหมือนกับเส้นใยสังเคราะห์ตัวอื่นๆ เส้นใยอะคริลิกเป็นเส้นใยเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นเมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสม (อุณหภูมิในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส) เส้นใยจะเริ่มอ่อนตัว (โครงสร้างของเส้นใยเปิดมากขึ้น) และมีความสามารถในการย้อมสีประจุบวกเพิ่มขึ้น และยังมี ความคงทนสูง เนื่องจากเส้นใยไม่ชอบน้ำ ดังนั้นเมื่อสีถูกเก็บไว้ภายในเส้นใย จึงมีความคงทนต่อการซักดี

2.5 ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม (รัชนีษ์ รุกขชาติ, 2546)

ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบรายงานว่ามีอัตราการตาย หรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ ทางจุกโดยการสูดดม

ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหาร แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวที่เป็นสารก่อมะเร็ง

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีและเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้ง สามารถสรุปได้ดังนี้

- ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
- สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
- ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ
- การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากการขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งส่งผลต่อพืชน้ำและสัตว์น้ำ
- ความเป็นพิษของสารที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

ทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

2.6 สารลดแรงตึงผิว (จिरสา กรงกรด, 2548)

สารช่วยย้อมที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดในขั้นตอนสุดท้ายของการฟอกย้อมคือ สบู่สังเคราะห์ ซึ่งในน้ำเสียจะมีสบู่หลงเหลือจากกระบวนการฟอกย้อมส่งผลให้มีปริมาณสารอินทรีย์สูง สบู่เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่ง ซึ่งสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ มีคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และ ส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.6.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูปคาร์บอกซีเลต (carboxylate) ซัลเฟต (sulfate) ซัลฟอนेट (sulfonate) หรือฟอสเฟต (phosphate) สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมประเภทผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างชาม เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49 เปอร์เซ็นต์ ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี

2.6.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำให้ประจุบวก สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภทประจุบวก จะทำให้เกิดการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ นิยมใช้ในพวกน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

2.6.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบและประจุบวกตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวกโพลีเอสเทอร์ หรือ โพลีไฮดรอกซิล เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างถ้วยชาม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

2.6.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactant หรือ Zwitterions)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำ สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่างประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำจะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำจะให้ประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบนส่วนหัวที่ชอบน้ำ สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว หรือ ผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

น้ำสบู่ที่ขายในตลาดอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นน้ำสบู่ที่มีประจุลบและไม่มีประจุ หรือเป็นน้ำสบู่ผสมของ 2 ชนิดนี้ ส่วนน้ำสบู่ที่มีประจุบวกพบอยู่ในจำพวกสารทำนุ ในน้ำ

สนุ่นอกจากเนื้อสนุ่นแล้วยังมีสารเติมแต่งบางอย่างเติมลงไปด้วย เช่น สารกันฟอง สารเพิ่มความหนืด เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อปรับน้ำสนุ่นให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วผู้ขายจะไม่บอกโครงสร้างของน้ำสนุ่นและสารเติมแต่งที่เติมอยู่ในน้ำสนุ่น อาจบอกเพียงว่าเป็นน้ำสนุ่นที่มีประจุลบ ไม่มีประจุ หรือสนุ่นผสม (พิศมัย ลิขิตบรรณกร, 2544)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างน้ำสนุ่น

ชื่อน้ำสนุ่น	คุณสมบัติ
SCOUR DSW	เป็นสนุ่นผสม มีฟอง ใช้กับงานเตรียมสิ่งทอทั่วไปที่ใช้โซดาคาไฟไม่สูงมาก
SCOUR NF-60	เป็นสนุ่นผสม มีฟองน้อย มีสารกันฟองผสมใช้กับงานเตรียมสิ่งทอทั่วไป ที่ใช้โซดาคาไฟไม่สูงมากและต้องการฟองน้อย
SCOUR SPW	เป็นสนุ่นผสม มีฟองน้อย มีสารกันฟองผสม ทนโซดาคาไฟได้สูง ช่วยให้เปียกได้ดีเหมาะกับงานเตรียมสิ่งทอที่ใช้โซดาคาไฟสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการเตรียมสิ่งทอแบบต่อเนื่อง
SCOUR NP	เป็นสนุ่นที่ไม่มีประจุ มีฟองน้อย มีสารกันฟอง เหมาะกับการเตรียมสิ่งทอในเครื่องเจท เครื่อง Repid Winch ที่ใช้โซดาคาไฟไม่สูง
PIERAL EP	เป็นสนุ่นที่ไม่มีประจุ ฟองน้อย ไม่มีสารกันฟอง ทั้งยังสามารถดับฟองของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเครื่องเจท หรือเครื่อง Repid Winch
CHEMISOL AM	เป็นสนุ่นที่มีประจุลบ มีความสามารถช่วยเปียกได้ดีเมื่ออยู่ในโซดาคาไฟที่มีความเข้มข้นสูง จึงเหมาะกับการเป็นสารช่วยเปียกในการทำเมอร์เซอไรซ์

ที่มา: พิศมัย ลิขิตบรรณกร (2544)

จากผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปีพบว่าทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำทิ้งจากครัวเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมล้วนมีสารลดแรงตึงผิวจากผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดด้วยกันทั้งสิ้น ผลกระทบที่เกิดจากการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่มีความเข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดฟองจำนวนมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลาอันที่กระบวนธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด

2.7 กระบวนการฟอกย้อมและแหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดลอมแห่งประเทศไทย, 2544)

2.7.1 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมมีหน้าที่เปลี่ยนแปลงเส้นด้ายหรือผ้าดิบ โดยใช้สารเคมี สี ย้อม และน้ำเป็นตัวกลาง ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ฟอกย้อม โดยกระบวนการฟอกย้อมสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

2.7.1.1 การเตรียมผ้าหรือเส้นด้าย (Pretreatment) เป็นการทำความสะอาดผ้าให้สะอาด ขาว สวยงาม ดูดซึมสีและสารเคมีได้ดี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

2.7.1.1.1 การเผาขน เป็นการกำจัดขนบนผ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งผ้าที่ได้จากเส้นใยสั้น กำจัดให้ผิวเรียบโดยใช้ความร้อน เมื่อนำไปย้อมจะทำให้สีติดผ้าสม่ำเสมอ

2.7.1.1.2 การลอกแป้ง เป็นการกำจัดสารลงแป้งที่มีอยู่ในด้ายยืน เพื่อให้ผ้าดูดซึมสีและสารเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจากกระบวนการทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายยืนก่อน แป้งที่เคลือบจะมีผลกระทบต่อกรดซึมสี และสารเคมีของเส้นใย

2.7.1.1.3 การกำจัดสิ่งสกปรก เป็นการขจัดไขมัน สารปนเปื้อน พวกเกลือ สารอินทรีย์ อนินทรีย์ เพื่อให้ผ้าหรือเส้นด้าย ดูดซึมน้ำ ติดสี สารเคมี อย่างสม่ำเสมอ

2.7.1.1.4 การฟอกขาว เป็นการกำจัดสารมีสีที่ติดมาตามธรรมชาติให้ผ้าขาว โดยใช้สารเคมี สารออกซิไดซ์ ร่วมกับความร้อน

2.7.1.1.5 การชุบมัน เป็นการทำ Alkali Treatment เพื่อให้ผ้าดูดซึมสีเพิ่มความมันเงามีสัมผัสอ่อนนุ่มลื่นทน ซึ่งนิยมใช้สารละลายด่าง (NaOH) เป็นสารชุบมัน

2.7.1.1.6 การปรับแต่งด้วยความร้อน (Heat Setting) เนื่องจากผ้าผ่านกระบวนการต่างๆ จะหดตัว ต้องทำการยืดผ้าด้วยการให้ความร้อนแห้ง 180-210 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15-30 นาที

2.7.1.2 การย้อม (Dyeing) การย้อมมีหลายวิธีดังนี้

2.7.1.2.1 วิธีย้อมแบบแช่หรือดูดซึม (Immersion or Exhaustion dyeing) เป็นการย้อมแบบที่ละห้อม เหมาะกับการผลิตที่ผลิตไม่มาก

2.7.1.2.2 วิธีย้อมแบบต่อเนื่อง (Continuous dyeing) เป็นการย้อมที่ละหลายๆ ผ้าจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องจากจุ่มอัดสี (Padding) ผนึกสี (Heat Fixation) ซักล้าง (Washing) เร็วกว่าวิธีแรก ผลผลิตสูงกว่า แต่ถ้าผลิตน้อยจะไม่คุ้ม และหากเครื่องขัดข้องจะกระทบต่อการผลิตมากกว่า

2.7.1.2.3 วิธีย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง (Cold-pad-batch dyeing) คล้ายกับการย้อมแบบต่อเนื่อง แต่มีการทำการหมัก (Batching) ผ้าที่ผ่านการจุ่มอัด จะนำไปหมუნเหวี่ยงด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เพื่อผนึกสีให้สม่ำเสมอและหมักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2-24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปซักล้างและอบแห้ง เหมาะกับสีที่มีความไวสูง

2.7.1.3 การพิมพ์ (Printing) เป็นการทำให้สีหรือสารเคมีติดบนผ้าหรือเส้นด้าย ทำให้เกิดลวดลายบนผ้าตามแบบแม่พิมพ์ การพิมพ์มี 3 วิธี

2.7.1.3.1 วิธีพิมพ์โดยตรงนิยมใช้กันมากโดยการทำให้แป้งพิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยสารสี หรือฟิกเมนต์ ติดบนพื้นผิวตามลวดลายและนำผ้าไปผนึกสี (Fixation) ผ้าที่จะพิมพ์จะเป็นผ้าขาวหรือผ้าย้อมสีอ่อน

2.7.1.3.2 วิธีพิมพ์แบบรีซิส เป็นการเติมสารป้องกันการติดสีลงไปบนผ้า เมื่อพิมพ์ผ้าแล้วนำไปย้อมทำสีพื้น สีจะไม่ติดบริเวณที่มีการพิมพ์ลวดลาย

2.7.1.3.3 วิธีพิมพ์แบบดิสซาร์จ เป็นการพิมพ์ผ้าที่ผ่านการย้อมสีพื้นแล้ว จะมีการเติมสารดิสซาร์จ เพื่อทำลายโครงสร้างสีพื้น

เมื่อผ้าหรือเส้นด้ายผ่านการพิมพ์สีแล้วยังต้องผ่านขั้นตอนย่อยอีกสองขั้นตอนสุดท้ายคือ

- การอบผนึกสีเป็นการอบผ้าเพื่อผนึกสีโดยใช้การอบไอน้ำ
- การซักล้างเพื่อกำจัดสีและสารเคมีส่วนเกิน

2.7.1.4 การอบแห้ง (Drying) เมื่อผ้าหรือเส้นด้ายผ่านกระบวนการล้างสีแล้ว ก่อนนำไปผ่านขั้นตอนการตกแต่งต่อไป ต้องทำให้แห้ง โดยใช้ลมร้อนหรือใช้ลูกกลิ้งร้อน

2.7.1.5 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing) เป็นกระบวนการที่ทำให้คุณภาพผ้าเส้นด้ายตามต้องการของลูกค้า ถ้าต้องการให้นุ่มก็ใส่ สารปรับความนุ่ม สารตกแต่ง สารหล่อลื่นเพื่อให้เกิดความมันเงา ใช้วิธีกล (ขัดมัน ตัดขน เผาขน) ใช้วิธีเคมีสารเรซิน ทำให้ฝ้านุ่มลื่น ทนยับ ทนไฟ ทนสารเคมี เป็นต้น

2.7.2 แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม

แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อมแสดงในภาพที่ 2.1-2.3 และนอกจากนี้ยังรวมถึงสิ่งอื่นๆ ที่ปะปนกับเส้นใย เช่น น้ำมันและไขมัน เป็นต้น แหล่งต่างๆ ที่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีดังนี้

2.7.2.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใย ก่อนย้อมและขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และน้ำในส่วนนี้อาจมีการระบายไปบ้าง

แต่ส่วนใหญ่มักถูกปล่อยเป็นน้ำเสียออกมาเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

2.7.2.1.1 น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือพิมพ์โดยตรง คือ กระบวนการต้ม แป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการซุ่มมัน กระบวนการย้อมสี การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสารมลพิษสูง และมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อม และกระบวนการย้อมที่ใช้

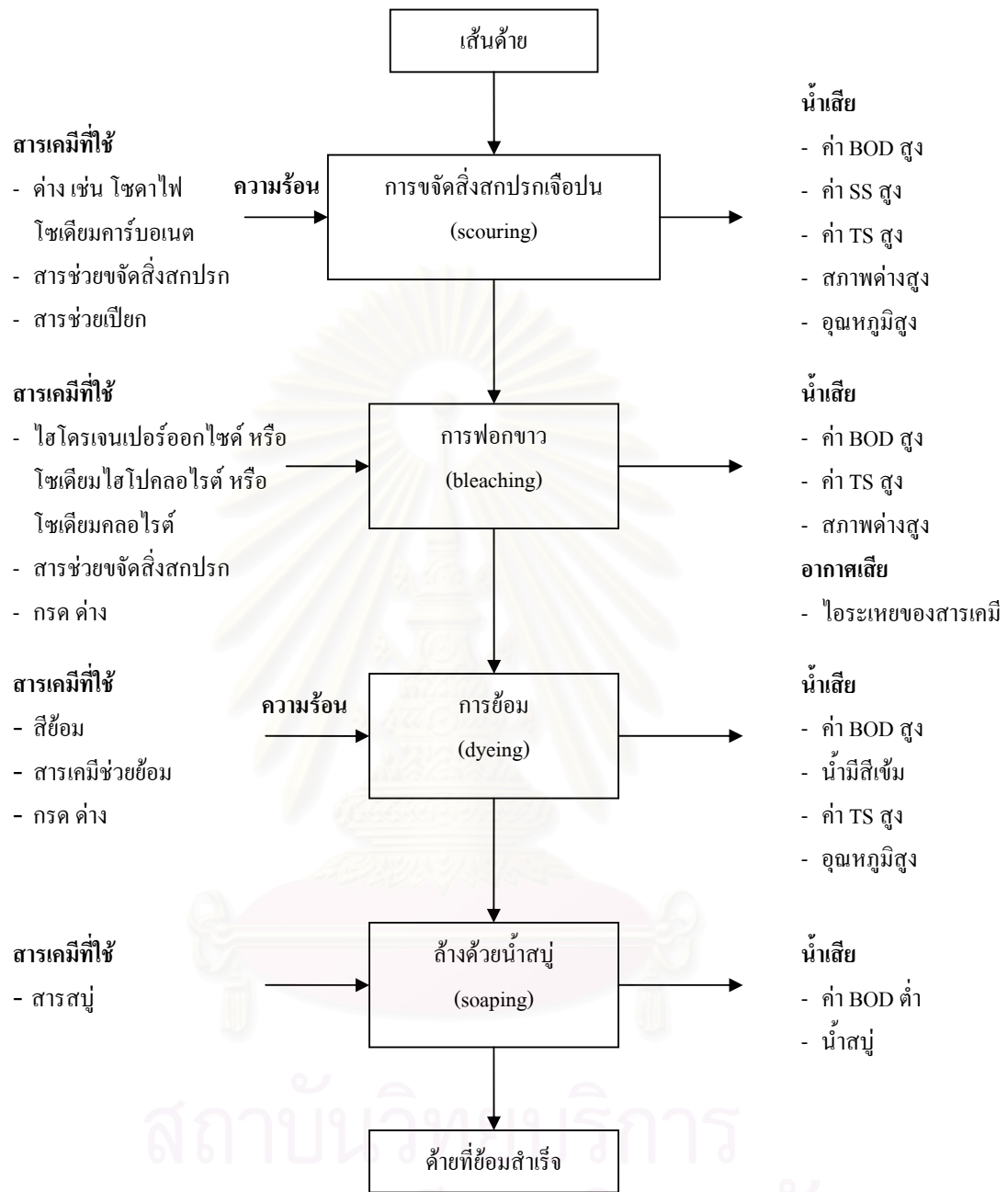
2.7.2.1.2 น้ำที่ใช้การซักล้างหลังจากการฟอกย้อมหรือพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำกว่าน้ำที่ใช้การฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง

2.7.2.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต หรือให้ความร้อนแก่ตู้อบไอน้ำ ไอน้ำที่ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลง และทำให้เกิดการกลั่นตัวในท่อน้ำก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้านำไอน้ำนี้ไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงก็เท่ากับไปเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากขึ้น

2.7.2.3 น้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลงในระยะเวลาอันสั้น โดยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

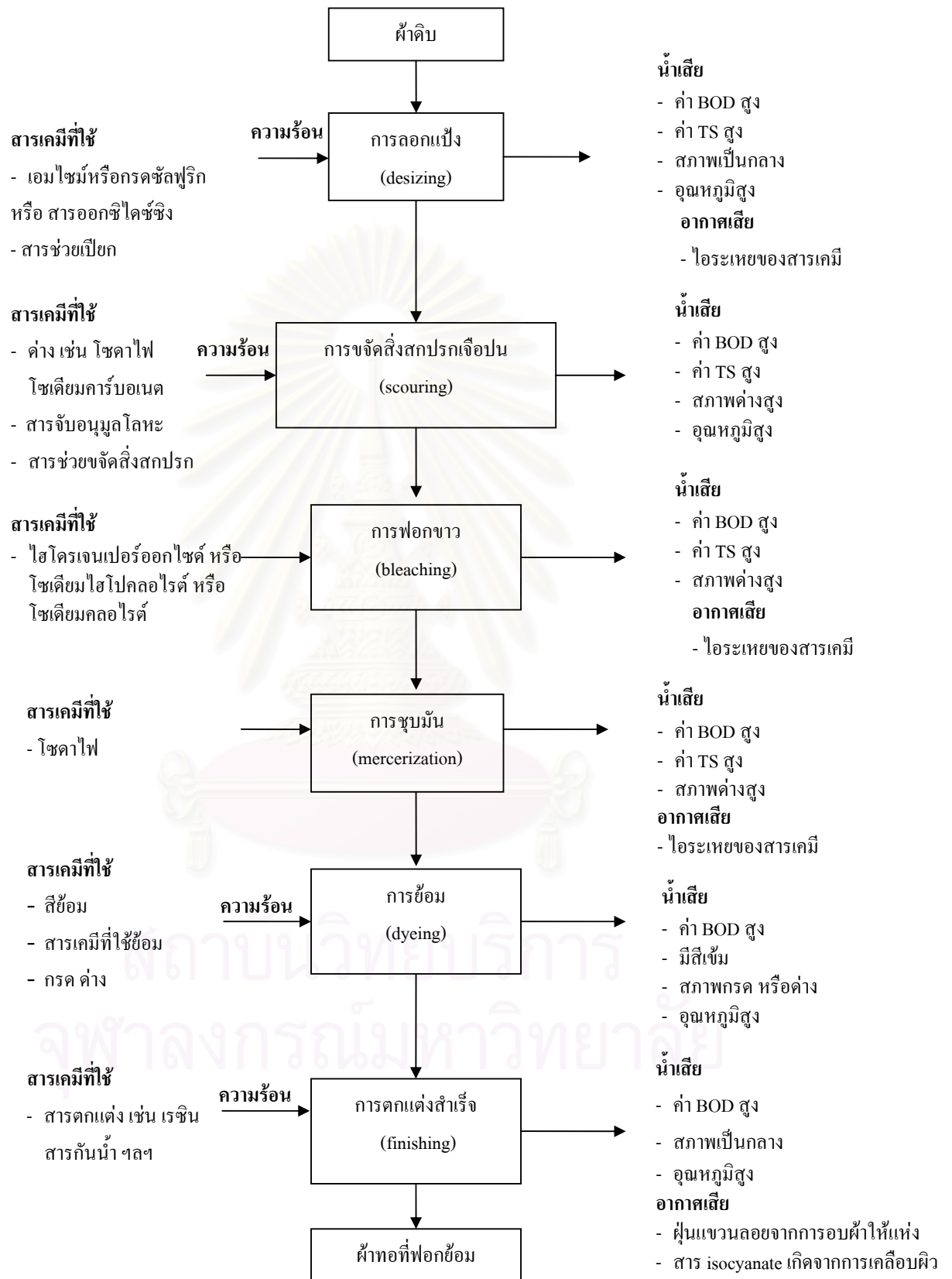
2.7.2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและการทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆ สูง ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้า หรือน้ำจากการล้างถังเตรียมสี เป็นต้น

2.7.2.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำในโรงงาน เป็นต้น



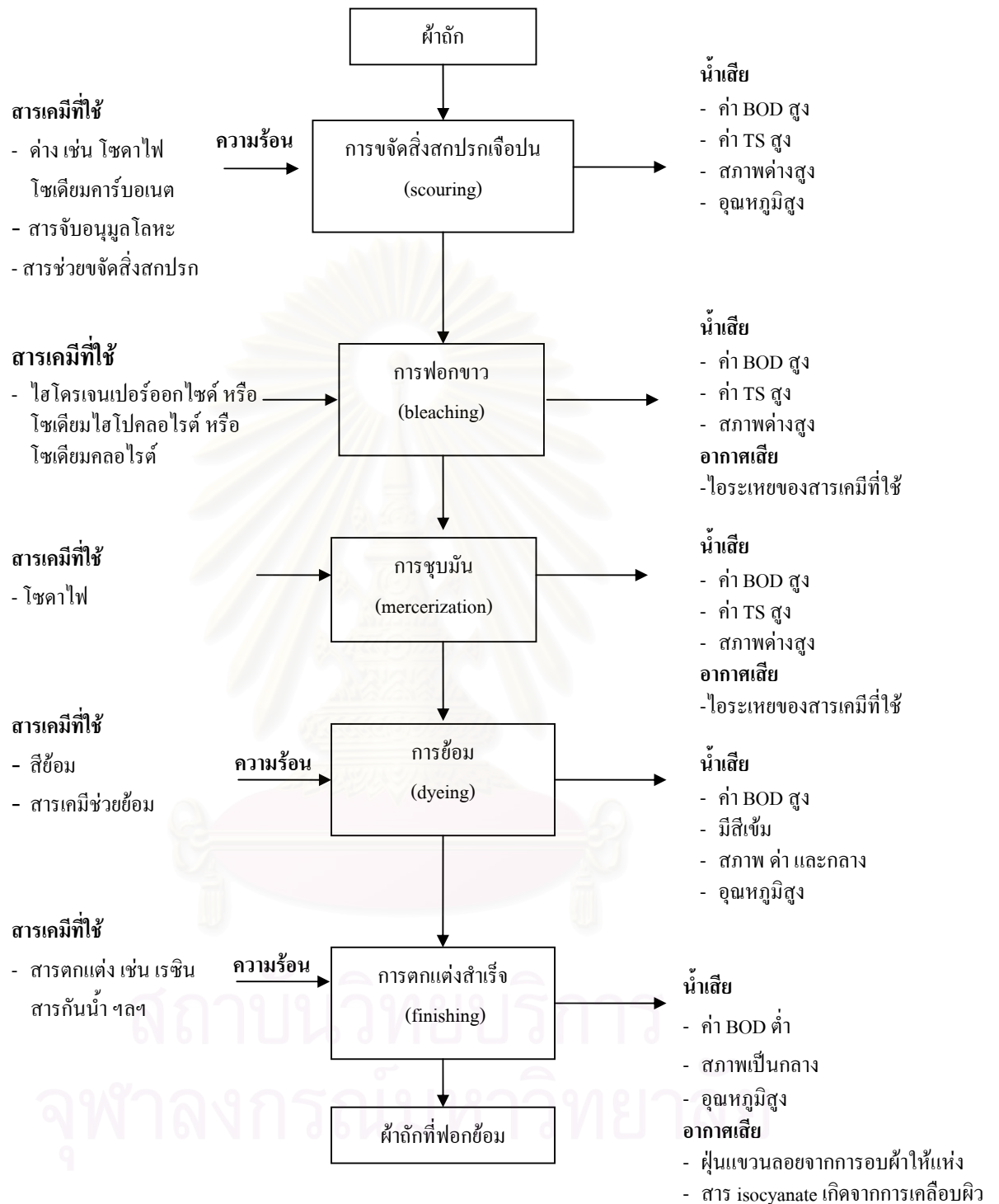
หมายเหตุ	BOD	=	Biochemical Oxygen Demand (บีโอดี)
	SS	=	Suspended Solid (ของแข็งแขวนลอย)
	TS	=	Total Solids (ของแข็งทั้งหมด)

ภาพที่ 2.1 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)



ภาพที่ 2.2 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมฝ้ายดิบ

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)



ภาพที่ 2.3 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมฝ้ายดิบ

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.7.3 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้

- มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและด้ายที่ปนออกมาจากระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้ว สารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (จารุทัศน์ มลิทธะเลข, 2537)

- มีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่าง (alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมักมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และค่าความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอชและสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

- มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส

- มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ

- มีความเข้มข้นสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า

- มีโลหะหนักเจือปนอยู่ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้ว ได้แก่ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

- มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

2.7.4 การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกสี (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2546)

น้ำทิ้งจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง น้ำทิ้งสีย้อมทำให้เกิดทัศนวิสัยทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่ดี ก่อให้เกิดความรู้สึกรำรังเกียจต่อผู้พบเห็น ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

2.7.4.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าพีเอช และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เฟอร์รัสคลอไรด์ หรือเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีข้อม ถ้าสีข้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีเอสติก สีรีแอกทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.7.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

2.7.4.2.1 ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนแปลงของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

2.7.4.2.2 ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.7.4.3 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีข้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชัน (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสี

ข้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.7.4.4 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสีโดยนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการข้อมสี และสีข้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

2.7.4.4.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีข้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อข้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสี ดิสเพอร์สที่ใช้ข้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีข้อมประเภทสีซัลเฟอร์ สีแฉัด และสีอะโซอิกที่ใช้ข้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีข้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.7.4.4.2 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับการใช้กำจัดไอออนสีข้อม และโมเลกุลของสีข้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีข้อมที่ใช้ข้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

2.7.4.4.3 ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีข้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นเหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอนหรือเซรามิก ต่อมาได้พัฒนามาเพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

2.7.4.4.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ใช้กำจัดสีข้อมประเภทสีรีแอกทีฟที่ใช้ข้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการข้อมสีรีแอกทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการข้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

2.7.4.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 กรัมต่อโมล ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 กรัมต่อโมล และสูงกว่า 1200 กรัมต่อโมล ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน

โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้งด้วย การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอชก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย

วิธีการกำจัดสีข้อมในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ การดูดซับซึ่งสามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับยังมีข้อจำกัดทางด้านต้นทุนในการจัดการที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องใช้ต้นทุนสูง และถ่านกัมมันต์จะสูญเสียไปกับการฟื้นฟูสภาพ บางส่วนอีกด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุเหลือใช้ต่างๆ ที่หาง่ายและราคาถูก มาเป็นสารดูดซับทดแทนถ่านกัมมันต์ โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้สนใจที่จะนำสัจจจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์มาเป็นสารดูดซับ เนื่องจากสัจจจาเป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากการบำบัดน้ำเสีย และยังคงนำไปกำจัดซึ่งเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ การนำสัจจจามาใช้เป็นสารดูดซับจึงเป็นการนำกลับมาใช้ประโยชน์ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดการสัจจจา

2.8 กระบวนการดูดซับ (adsorption process) (นริษญา กวินันทวงศ์, 2542)

การดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) การเกิดกระบวนการดูดซับเรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption process) การดูดซับด้วยของแข็ง เช่นถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็งนั้น การดูดซับมี 2 กระบวนการ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ทั้ง 2 กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในของเหลวเข้ามาจับกับผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง เอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) เกิดจากผลต่างของพลังงานและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับชนิดนี้เป็นแบบหลาย

ชั้น คือแต่ละชั้นของ โมเลกุลจะเกิดขึ้นบนชั้นของ โมเลกุลที่เกิดก่อนหน้า โดยที่จำนวนชั้นที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนในของเหลว การผันกลับ (reversibility) ของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลของสารดูดซับ และ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดน้อยจะทำให้เกิดการหลุดออกไปของ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ (desorption)

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับและ สารดูดซับ ทำให้เกิดสารประกอบเคมีขึ้นกระบวนการนี้จะเป็นแบบชั้นเดียว และ ไม่สามารถผันกลับได้เพราะว่าพลังงานจะถูกใช้ไปในการสร้างสารประกอบทางเคมีขึ้นที่พื้นผิวที่ถูกเกาะจับ

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างภายในสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.8.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.8.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

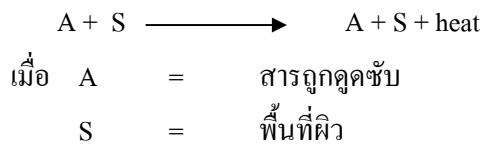
อัตราเร็วในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ชนิดหนึ่งจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ พื้นที่ผิวมากย่อมดูด โมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย ขนาดของถ่านกัมมันต์มีผลต่อพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากโพรงภายในมากกว่าพื้นที่ภายนอก

2.8.1.2 ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดติด

ขนาดของสารหรือ โมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์

2.8.1.3 อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการ



เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

2.8.1.4 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่อยู่รอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกก็เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ

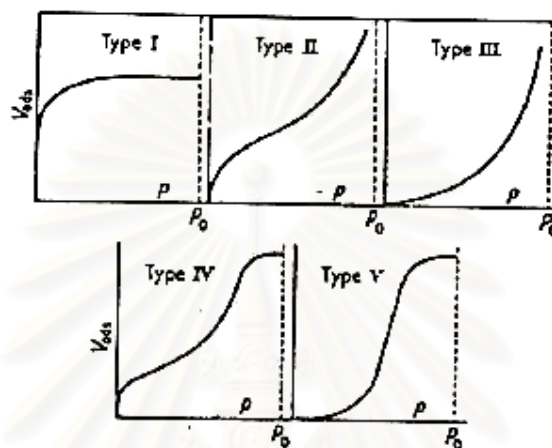
2.8.1.5 พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างแข็งแรง การดูดซับไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบเนื่องจากพีเอชของสารละลาย นอกจากพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนแล้วยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆ ด้วย

2.8.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) จะเกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของระบบทั้งหมดจะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็ สารดูดซับ สารถูกดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่จุดสมดุลเรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับ



ภาพที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน 5 แบบ (Faust และ Aly, 1987)

ไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นการดูดซับซึ่งมีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนผิวของสารดูดซับ แบบที่เหลือเป็นการดูดซับโดยมีโมเลกุลหลายชั้นบนสารดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ เป็นผลมาจากการพัฒนาความรู้และการสังเกต แต่โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดซับ มักจะกล่าวอ้างถึงไอโซเทอม 3 แบบ ดังต่อไปนี้

2.8.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) สมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์คือ โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่สารถูกดูดซับ พื้นที่ของบริเวณสารดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว และพลังงานดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

2.8.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท พัฒนามาจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ที่คิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียว ให้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละ โมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดติดเช่นเดียวกับชั้นอื่นๆ ต่อไป

2.8.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) สมการการดูดซับแบบฟรูนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

2.9 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งซึ่งถูกผลิตขึ้นมาโดยการกระตุ้น (Activated) จึงทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการดูดซับได้จำนวนมาก และขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่มีอยู่ด้วย (วิชชัย สิงหศิริ, 2548)

2.9.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.9.1.1 รูพรุน (pores) (วิชชัย สิงหศิริ, 2548)

ผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้มีอยู่ในลักษณะอย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ โดยจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด ดังนี้ คือ รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่สำคัญในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสารที่ถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก มีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้น สามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม และรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ทั้งหมด ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์ไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอเล็คตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงค่อนข้างอ่อน ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดออกแต่ถ้าเป็นผิวบริเวณของถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิดคือ พวกรวมออกไซด์ของกรด และพวกรวมออกไซด์ของด่าง

2.9.1.2 พื้นที่ผิว (Surface Area)

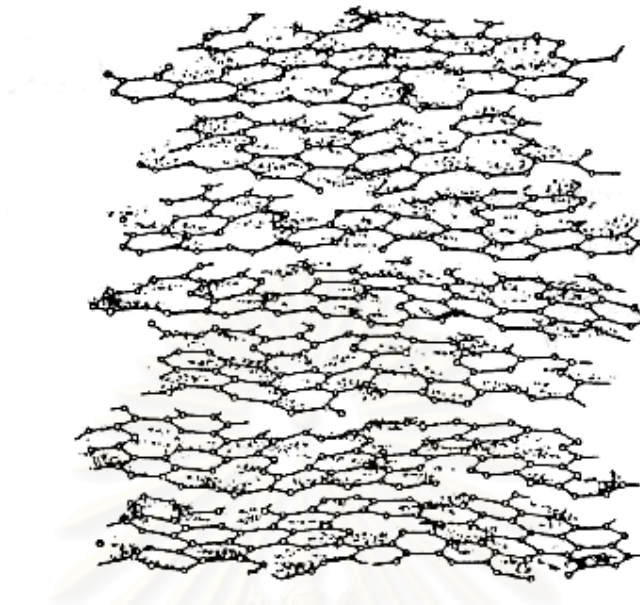
โดยปกติถ่านกัมมันต์ทั่วไปมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 450-1,500 ตารางเมตร ต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจริงที่ใช้ในการดูดซับขึ้นอยู่กับสารที่ถูกดูดซับ

2.9.1.3 โครงสร้างทางเคมี (ธวัชชัย สิงหศิริ, 2548)

ถ่านกัมมันต์เตรียมจากวัสดุที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อนซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในระหว่างการเผาผลาญสารอินทรีย์และอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปของก๊าซ เหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดรูพรุน ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ซึ่งรูพรุนเหล่านี้มีคุณสมบัติให้ความสามารถในการดูดซับ กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนของการล้างทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญให้ออกจากช่องว่าง หรือ โพร่ง และสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (ธวัชชัย สิงหศิริ, 2548)

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกกราไฟท์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟท์เล็กน้อยในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งโครงสร้างนี้เป็นไมโครคริสตัลไลต์ (Microcrystallites) ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งจะวางตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอเล็กตรอนสร้างพันธะเดียวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกตัวหนึ่งเป็นไพอเล็กตรอน ที่ใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัว คือ พันธะคู่ (double bond) ดังภาพที่ 2.5

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

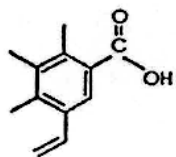


ภาพที่ 2.5 ลักษณะการแบ่งชั้นของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

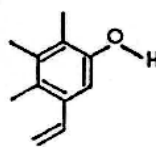
หมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ Carboxylic groups, Phenolic hydroxyl groups, Quinone type carbonyl groups, Normal lactone groups, Fluorescein type groups, Carboxylic acid anhydride groups และ Cyclic peroxide groups ดังแสดงในภาพที่ 2.6

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมถึงกลิ่น รส และสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ปกติมีค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ รวมถึงลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นด่างจะส่งผลต่อการดูดซับสีของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิมตัว กล่าวคือความสามารถในการดูดซับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านและชนิดของสารที่จะถูกดูดซับร่วมกัน ลักษณะโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ แสดงดังภาพขยายภาพตัดตามขวางดังภาพที่

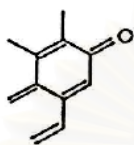
2.7



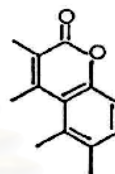
(a) Carboxylic Group



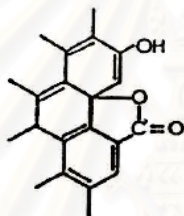
(b) Phenolic Hydroxyl Group



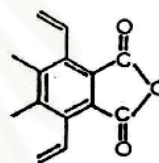
(c) Quinone Type Carbonyl Group



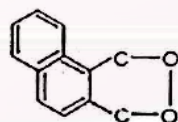
(d) Normal Lactone Group



(e) Fluorescein Type Lactone Group



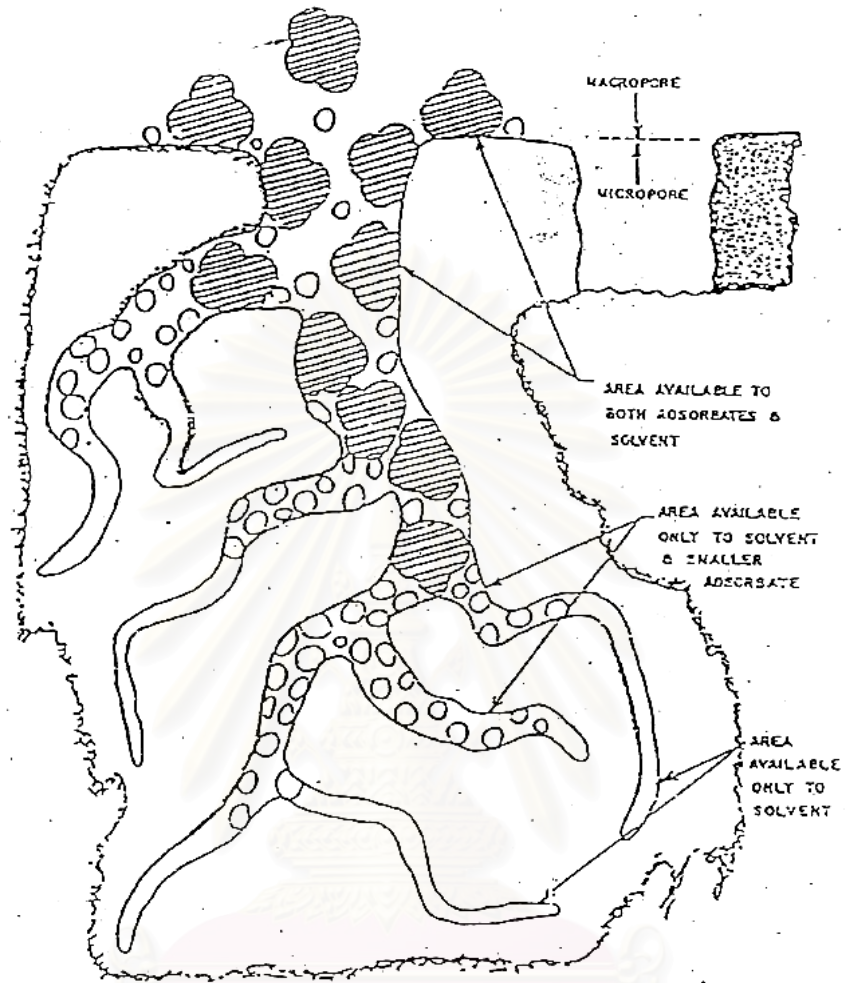
(f) Carboxyl Acid Anhydride Group



(g) Cyclic Peroxide Group

ภาพที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.7 ภาพตัดขวางถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

โมเลกุลของสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์แล้วฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนขนาดใหญ่ จากนั้นจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก หากโมเลกุลของสารละลายนั้นไม่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนขนาดเล็ก อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน โดยอัตราการดูดซับนี้จะแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จะบำบัด (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.9.1.4 เถ้า (ashes)

ถ่านกัมมันต์จะมีเถ้าเป็นส่วนประกอบ โดยมีอยู่ประมาณ 1 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบหลักของเถ้าได้แก่ ซิลิกา อลูมินา เหล็ก โลหะอัลคาไลน์ และ อัลคาไลน์เอิร์ท เถ้าทำหน้าที่เพิ่มค่า ไฮโดรฟิลิกซิตี (hydrophilicity) ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับการบำบัดน้ำเสีย

2.9.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

แบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิดคือ

2.9.2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon :PAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2.9.2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon : GAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร แต่ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ข้อดีของถ่านกัมมันต์แบบผงก็คือมีราคาถูกกว่าแบบเกล็ด ใช้งานและสะดวก การดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียก็คือ ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพ ซึ่งไม่ค่อยประหยัดและไม่คุ้มค่านัก

โดยงานวิจัยครั้งนี้จะใช้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเพื่อดูประสิทธิภาพของการดูดซับ สีย้อมเนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับได้เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

2.9.3 การประเมินและการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ (วัชชัย สิงหศิริ, 2548)

การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดมลพิษในน้ำเสีย ต้องเลือกถ่านกัมมันต์ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ และลักษณะสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความเหมาะสมในการควบคุมระบบ

สมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

2.9.3.1 พื้นที่ผิว (Surface Area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับ โดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับมาก

2.9.3.2 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน

2.9.3.3 ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน

2.9.3.4 ขนาดใช้งาน (Effective Size) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity Coefficient) เป็นตัวกำหนดภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic Condition) ของถังดูดซับ (Adsorption Column)

2.9.3.5 ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) เป็นตัวกำหนดการดูดซับโมเลกุลของน้ำเสีย

2.9.3.6 แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion Number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี

2.9.3.7 ปริมาณร่อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน

2.9.3.8 ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต

2.9.3.9 ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

2.9.3.10 โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

2.9.3.11 ฟีนอลนัมเบอร์ (Phenol number) ใช้กำหนดความจุของการดูดซับ

2.9.3.12 ขนาดของรูพรุน (Pore Size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.10 สลัดจ์ (มันซิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ประเภทของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียมี่ดังนี้

- สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge)
- สลัดจ์ขั้นแรก (Primary Sludge)
- สลัดจ์ขั้นสอง (Secondary Sludge)
- สลัดจ์เคมี (Chemical Sludge)
- สลัดจ์ย่อยแล้ว (Digested Sludge)

2.10.1 สลัดจ์ดิบ

สลัดจ์ดิบ หมายถึงสลัดจ์ขั้นแรก และสลัดจ์ขั้นสองที่ยังไม่คงตัวสามารถนำเหม็นได้ง่าย ไม่ควรนำสลัดจ์ไปตากแห้งหรือบีบน้ำ เนื่องจากมักมีกลิ่นเหม็น ควรย่อยสลัดจ์ดิบให้กลายเป็นสลัดจ์คงตัวที่ย่อยแล้ว (Digested Sludge) ก่อนนำไปตากหรือบีบน้ำ สลัดจ์ดิบจำแนกเป็น 2 ประเภทคือ

2.10.1.1 สลัดจ์ชีวภาพหมายถึง สลัดจ์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบต่างๆ ส่วนประกอบหลักของสลัดจ์ชีวภาพจึงเป็นแบคทีเรียที่ถูกกำจัดทิ้ง รวมทั้งสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนเบื้องต้นของน้ำเสีย

2.10.1.2 สลัดจ์เคมีหมายถึงสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยวิธีเคมี ซึ่งอาจเป็นสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการ โคแอกกูเลชันของสารแขวนลอยต่างๆ รวมทั้งน้ำมันและไขมัน และสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการตกผลึก (Precipitation) ของโลหะหนัก สลัดจ์เคมีอาจเป็นสลัดจ์อินทรีย์หรือสลัดจ์อนินทรีย์ก็ได้

2.10.2 สลัดจ์ขั้นแรก

สลัดจ์ขั้นแรกคือ สลัดจ์ที่ระบายออกมาจากก้นถังตกตะกอนขั้นแรกสลัดจ์ส่วนนี้จะเป็นตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสียที่มีน้ำหนักรวมมากจนสามารถตกตะกอนได้เองในก้นถังตกตะกอนขั้นแรก ถ้าใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอน สลัดจ์ที่เกิดขึ้นก็จะเรียกว่าสลัดจ์เคมี สลัดจ์ขั้นแรกจึงมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์รวมกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย

2.10.3 สลัดจ์ขั้นที่สอง

สลัดจ์ขั้นที่สองคือ สลัดจ์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบต่างๆ สลัดจ์ส่วนนี้จึงมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์ขั้นแรกและขั้นสองจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

รายการ	สลัดจ์ขั้นแรก	สลัดจ์ขั้นสอง
ความถ่วงจำเพาะของสลัดจ์	1.02	1.005
ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง	1.4	1.08-1.25
ของแข็งทั้งหมด, TS (เปอร์เซ็นต์)	2.2-5.5	0.5-1.2
ของแข็งระเหย, (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	60-80	60-80
เซลลูโลส, (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	8-15	7
น้ำมันและไขมัน, (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	6-30	5-12
โปรตีน, (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	20-30	32-41
ไนโตรเจน, (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	1.5-4.0	4.7-6.7
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5), (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	0.8-2.8	2.8-11
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O), (เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS))	0-1	0.4
พีเอช	5-8	6.5-8

ที่มา: มั่นสิน ตันทุลเวสม์ (2542)

2.10.4 แหล่งกำเนิดของสลัดจ์

ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำเสียเป็นแหล่งกำเนิดของสลัดจ์แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ตะกอนแขวนลอย และสารละลาย ตะกอนแขวนลอยที่ถูกตกตะกอนหรือลอยตะกอนจะกลายเป็นสลัดจ์โดยตรง ส่วนสารละลายนั้นเป็นแหล่งกำเนิดสลัดจ์ที่ซับซ้อนกว่าสลัดจ์โดยตรง ส่วนสารละลายอนินทรีย์ เช่น ไอออนของโลหะหนัก จะกลายเป็นตะกอนแขวนลอยสารละลายอนินทรีย์ บางส่วนจะกลายเป็นจุลินทรีย์ซึ่งกลายเป็นสลัดจ์ที่ต้องการบำบัด การเกิดสลัดจ์จากน้ำเสียโดยผ่านแหล่งกำเนิดต่างๆ ดังกล่าวแสดงดังนี้



2.10.5 สลัดจ์จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม (กรุงเทพมหานคร, 2549)

สลัดจ์ที่เลือกใช้สำหรับงานวิจัย คือสลัดจ์จากลานตากตะกอน ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ย่อยแล้วด้วยระบบไร้อากาศ จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ซึ่งโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม อยู่ในสังกัดกลุ่มงานปฏิบัติการ 3 (หนองแขม) สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมเป็นระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งที่สามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ (Activated Sludge with Recycle System) ความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย 157,000 ลบ.ม./วัน

ระบบกำจัดสลัดจ์ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม มีปริมาณสลัดจ์และลักษณะของสลัดจ์ที่นำมาบำบัดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

2.10.5.1 สลัดจ์ส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียหนองแขม ประกอบด้วย

- สลัดจ์ส่วนเกินจากถังเก็บตะกอน (Sludge Holding Tank)
- ตะกอนลอยในถังตกตะกอน (Scum)
- สลัดจ์จากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการเติม FeCl_3
- สลัดจ์จากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical

Precipitation Unit)

2.10.5.2 สลัดจ์ที่มาจากภายนอกโรงบำบัด โดยมาจากโรงบำบัดน้ำเสียต่างๆ ของกรุงเทพมหานคร

ระบบบำบัดสลัดจ์ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.10.5.2.1 Sludge Holding Tank สลัดจ์น้ำเสีย และสลัดจ์เคมีจากกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส จะถูกเก็บไว้ในถัง โดยมีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 1.90 ชั่วโมง ภายในถังจะถูกกวนโดย fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจน จนทำให้เกิดการปลดปล่อยของฟอสฟอรัส

2.10.5.2.2 Gravity Belt thickener สลัดจ์น้ำเสีย จะถูกทำให้มีความเข้มข้นขึ้นโดยผสมกับโพลีเมอร์ ก่อนเข้าสู่การทำให้สลัดจ์ขึ้น สลัดจ์จะถูกเก็บไว้ในถังที่มีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 2.0 ชั่วโมง ภายในถังจะถูกกวนโดย fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจนทำให้เกิดการปลดปล่อยของฟอสฟอรัส

2.10.5.2.3 Sludge Mixing Tank สลัดจ์จาก 2 แหล่งกำเนิด คือ สลัดจ์น้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม และสลัดจ์น้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำอื่นของกรุงเทพมหานคร ถูกนำมาผสมกันสลัดจ์ที่ผสมแล้ว จะมีความเข้มข้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

2.10.5.2.4 Slurry Holding Tank สลัดจ์ที่ถูกผสมแล้ว จะถูกเก็บไว้ในถัง ก่อนถูกส่งเข้าสู่ถัง Digester ภายในถังเก็บสลัดจ์นี้จะมีการกวนด้วย Submersible Mixing เพื่อป้องกันการตกตะกอน

2.10.5.2.5 Heat Exchanger ก่อนที่สลัดจ์ จะถูกส่งเข้าถัง Digester สลัดจ์จะต้องถูกทำให้ร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยการผ่านสลัดจ์เข้าสู่ระบบ Heat Exchanger

2.10.5.2.6 Anaerobic Digester ถังหมักสลัดจ์แบบไร้ออกซิเจนมีจำนวน 2 ถัง ในการเดินระบบในถังหมักสลัดจ์ทั้งสองถังสามารถเดินได้ทั้งแบบอนุกรมหรือคู่ขนานในกรณีที่เดินระบบแบบอนุกรมจะใช้ระยะเวลาในการหมักประมาณ 19 วัน ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในถังหมักเพื่อกวนตะกอน และบางส่วนนำไปใช้เป็นพลังงานในการอุ่นตะกอน ก๊าซส่วนเกินจะถูกเผาทิ้งไป ตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถัง

2.10.5.2.7 Digested Sludge Holding Tank สลัดจ์ที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถัง Digested Sludge Holding Tank ก่อนถูกส่งไปรีดน้ำที่เครื่อง Belt Filter Press

2.10.5.2.8 Belt Filter Press จะทำหน้าที่รีดน้ำออกจากสลัดจ์ โดยสลัดจ์ที่หมักแล้วจะถูกผสมกับโพลีเมอร์ ก่อนเข้ารีดที่เครื่อง Belt Filter Press สลัดจ์ที่ผ่านการรีดจะมีความเข้มข้นมากขึ้นจากนั้นนำสลัดจ์ไปตากในลานตากตะกอน

2.11 การกระตุ้นสารดูดซับ (วิชัชชัย สิงหศิริ, 2548)

การกระตุ้น คือ การทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น ซึ่งวัตถุประสงค์ของการกระตุ้นสารดูดซับมีดังนี้คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของสารดูดซับมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยน โครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

2.11.1 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ มักใช้ ไอน้ำ และก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อากาศ ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันดิบและอะตอมของคาร์บอนบางตัวใน โครงสร้างผลึกในสภาวะที่ควบคุม ทำให้การเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ สมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา การกระตุ้นทางกายภาพมีทั้งข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี เมื่อกระตุ้นเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้งานเลยไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารตกค้างที่อาจเป็นอันตราย

ข้อเสีย ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูง และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเล็กกว่า การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี โดยมีรูพรุนขนาดประมาณ Micropore ซึ่งเหมาะสำหรับดูดกลิ่น หรือ ก๊าซพิษ

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้นคือ

- โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านคาร์บอนที่นำมากระตุ้น
- สารอนินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน

- ชนิดของก๊าซที่ใช้ในการกระตุ้น
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ความดันของก๊าซ
- เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- ขนาดอนุภาคของถ่านคาร์บอน

ในกระบวนการกระตุ้นอะตอมคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ใช้ในการกระตุ้น เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แพร่ออกจากผิวของสารดูดซับ การเกิดแก๊สซิฟิเคชันทำให้พื้นผิวของสารดูดซับเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ซึ่งสารดูดซับที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันจะประกอบไปด้วยรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และเป็นการสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย กระบวนการกระตุ้นในทางกายภาพนั้น อาจมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันไปขึ้นกับลักษณะของวัตถุดิบ ตัวอย่างเช่นการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอัดก้อนหรือกระบวนการปล่อยให้สารระเหยออกจากวัตถุดิบนั้น ในบางกระบวนการอาจมีขั้นตอนการนำวัตถุดิบล้างด้วยกรดก่อนเพื่อที่จะให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าต่ำ

2.11.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้นผสมและคลุกเคล้าเข้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอนของวัตถุดิบ โดยนำวัตถุดิบไปแช่หรือผสมกับสารเคมี หลังจากการแช่สารเคมีกับวัสดุ ต้องล้างสารเคมีออกจากวัตถุดิบก่อนการใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้

วิธีการกระตุ้นด้วยเคมีอาจจะทำได้ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 นำวัตถุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศให้เป็นถ่านก่อน แล้วจึงนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น จากนั้นจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิส อีกครั้ง

แบบที่ 2 นำวัตถุดิบแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้นแล้วจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิส ควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโพแทสเซียม หรือโซเดียม เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟด์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีที่เป็นกรดจะทำให้พื้นผิวของสารดูดซับมีประจุพื้นผิวเป็นบวกมากขึ้น และในทางตรงข้ามการกระตุ้นด้วยสารเคมีที่เป็นด่างจะทำให้เกิดประจุลบบนพื้นผิวสารดูดซับมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การกระตุ้นทางเคมีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียดังนี้คือ

ข้อดี ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและผลผลิตที่ได้มากกว่าทางกายภาพจึงเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่า และสารเคมีสามารถแทรกซึมลงไปยังพื้นผิวของสารดูดซับได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมาก และเป็นการลดขั้นตอนการผลิตได้มาก

ข้อเสีย ต้องล้างสารเคมีออกจากสารดูดซับก่อนใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้ รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องมีความสามารถด้านทานต่อการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นสารกัดกร่อน แต่สำหรับการใช้เกลือแอมมาเป็นสารเคมีในการกระตุ้นจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างหลังการกระตุ้น

ตัวอย่างการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีได้แก่

- การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางอุตสาหกรรมโดยแช่วัตถุดิบในสารละลายซิงค์คลอไรด์ประมาณ 0.5-4 ส่วนต่อน้ำหนักของวัตถุดิบแห้งหนึ่งส่วนอาจเติมกรดเกลือหรือกรดฟอสฟอริกลงไปได้ ก็น้อยแล้วนำไปทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส จากนั้นล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำหรือกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง เพื่อกำจัดซิงค์คลอไรด์ที่เหลือและสารประกอบของซิงค์คลอไรด์ที่เกิดขึ้นออกไปในทางอุตสาหกรรมสารละลายซิงค์คลอไรด์ ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกแต่ด้วยปัญหาการกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ระยะหลังการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นลดลงมาก

- การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นต่ำกว่าการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นคือประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของการผลิตสารดูดซับโดยวิธีนี้ได้แก่ การใช้ดินพรูหรือซีลีอีย โดยการผสมกับสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 25-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผากระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะเกิดจากการดูดน้ำของกรดฟอสฟอริกซึ่งคล้ายกับการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ โดยกรดฟอสฟอริกกลายเป็นฟอสฟอรัสและไฮโดร สารที่ระเหยได้จะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นกรดฟอสฟอริกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- การกระตุ้นด้วยสารประกอบของโปแตสเซียมหรือโซเดียมเป็นการกระตุ้นโดยใช้สารละลายที่มีไอออนของโปแตสเซียมหรือโซเดียม (K^+ หรือ Na^+) กับวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแล้วให้ความร้อนไอออนของโลหะเหล่านี้จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของผลึกของสารดูดซับ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจนจะหลุดออกไปทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

2.12 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (Valencia และ Gloyna, 1972)

ไอโซเทอมการดูดซับที่จะใช้อธิบายกระบวนการดูดซับมี 2 แบบ ดังต่อไปนี้

2.12.1.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์คือ

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
- 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- 3) พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของ

พื้นที่ผิว

- 4) พลังการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับ แสดงดังสมการ

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right) \left(\frac{1}{b q_m}\right)$$

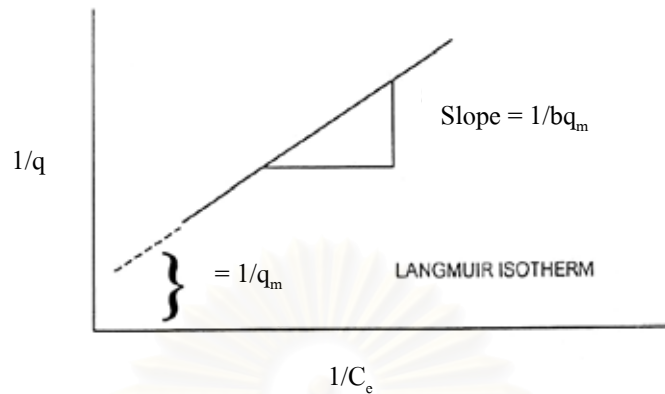
โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)

b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

2.12.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับ ในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

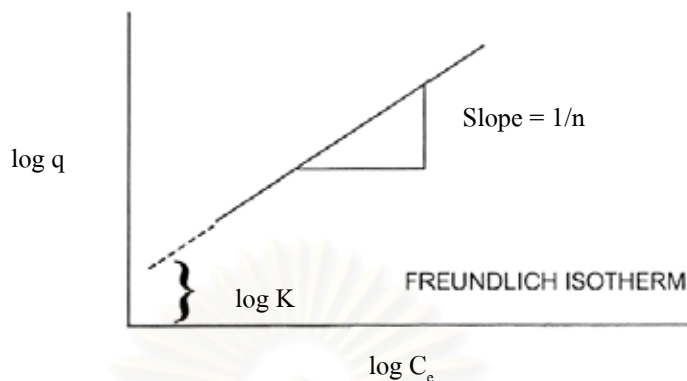
$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$$

โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

$K, 1/n$ คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ของ $\log q$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

2.12.2 จลนศาสตร์

จลนศาสตร์เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) และกลไก (mechanism) ของปฏิกิริยาเคมี จลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับจะใช้โมเดล 3 แบบคือ

2.12.2.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง



เมื่อความเข้มข้นของสาร A มากกว่าสาร B มากๆ เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น ทำให้สาร A ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงขึ้นกับสาร B สมการที่ใช้เป็นดังนี้ (Gulnaz และคณะ, 2006)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

2.12.2.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนจะเป็นการบอก

ถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากประจุของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับจำนวนของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารตัวกลางดูดซับ และจำนวนสารถูกดูดซับที่สถานะสมดุล สมการเป็นดังนี้ (Gulnaz และคณะ, 2006)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{t}{q_c}$$

2.12.2.3 ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) (Gulnaz และคณะ, 2006)

$$q_t = k_p t^{1/2}$$

เมื่อ

q_c คือ ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1

k_2 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2

k_p ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค

2.12.3 การหาพื้นที่ผิว (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543, Punyapalukul, 2004)

- พื้นที่ผิว

การวัดพื้นที่ผิวของสารดูดซับโดยใช้ทฤษฎีของไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm) เป็นการศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลเดี่ยว และในขณะเดียวกันก๊าซไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของเบท (BET)” ได้ดังนี้

$$\frac{C(C_s - C)}{q} = \left(\frac{1}{bq_m} + \frac{(b-1)}{bq_m} \right) \left(\frac{C}{C_s} \right)$$

โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

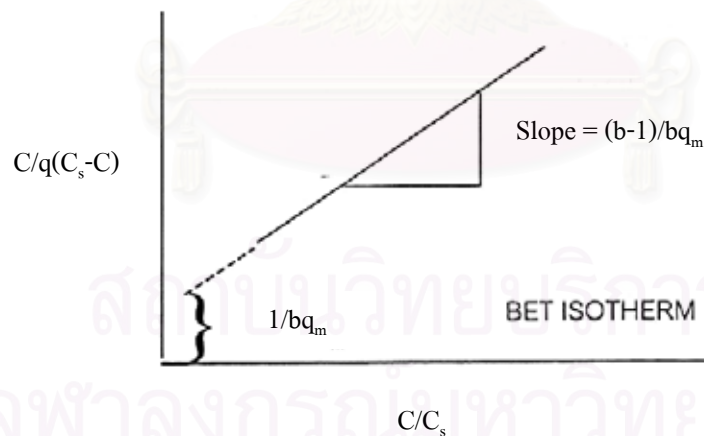
q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆ ชั้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C/q(C_s - C)$ กับ (C/C_s) จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $(b-1)/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bq_m$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (Valencia และ Gloyna, 1972)

หลักการเบื้องต้นคือ การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารจะอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก๊าซในขณะที่ก๊าซมีการเคลื่อนที่ (dynamic analysis) โดยก๊าซที่เป็นตัวดูดซับ (ก๊าซไนโตรเจน) จะถูกผสมกับก๊าซเฉื่อย (ก๊าซฮีเลียม) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และในการวัดปริมาตร

ของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารจะอาศัยความแตกต่างของสมบัติด้านการนำความร้อนของก๊าซแต่ละชนิด ทั้งนี้เพราะปริมาณการนำความร้อนของก๊าซแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

เริ่มทำการวิเคราะห์โดยใช้ภาชนะ บรรจุไนโตรเจนเหลวหล่อหอดใส่ตัวอย่างซึ่งขณะนี้สารตัวอย่างจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิจากไนโตรเจนเหลว (ประมาณ 77 องศาเซลเซียส หรือ -196 องศาเซลเซียส) ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งสามารถวัดและคำนวณค่าพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรม วิธีการคือ ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยในหนึ่งใบบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปใ้ภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติ ที่อุณหภูมิจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมานอมิเตอร์ การหาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวมีวิธีการดังนี้

1) อบอุ่นตัวอย่างสารดูดซับที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 0.02-0.05 กรัมใส่ลงใน Adsorption vessel

2) วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat

3) อบอุ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่มีความดัน 760 มิลลิเมตรปรอทเป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด

4) ใช้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า

5) ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปใ้เซลล์ทั้งสอง ภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิจาก

6) ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ทั้งสองซึ่งวัดโดยใช้ มานอมิเตอร์ (Differential Monometer)

7) อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวต่อไป

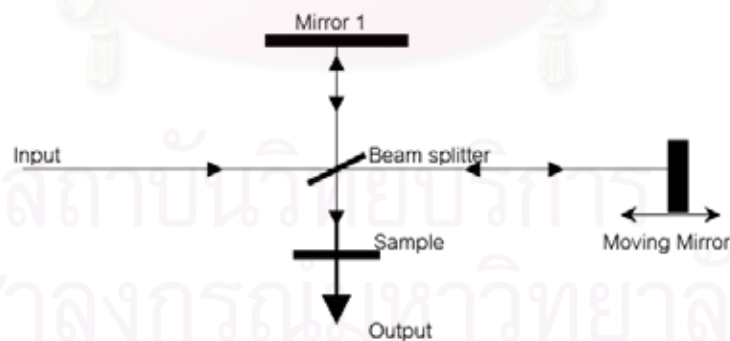
ปริมาตรจำเพาะในการดูดซับแบบชั้นเดียวมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ที่สภาวะมาตรฐาน และจำนวนโมลของสารดูดซับในการดูดซับแบบชั้นเดียวมีค่าเท่ากับ $q_m / 0.0224$ คูณด้วยเลขอวอกาโดร จะทำให้รู้จำนวน โมเลกุลที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวสามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัมได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 S &= (q_m / 0.0224) \times 6.023 \times 10^{23} \times A \\
 &= 2.69 \times 10^{25} q_m A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } S &= \text{พื้นที่ผิวจำเพาะ} \\
 A &= \text{พื้นที่ที่เกิดการดูดซับโดยโมเลกุลสารถูกดูดซับ}
 \end{aligned}$$

2.12.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (อรรถย ลีลาพจนานพร, 2550)

การหาหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR Spectrometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจากเครื่อง ไออาร์สเปกโตรมิเตอร์ (IR Spectrometer) เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ ได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ไมเคิลสันอินเทอร์ฟีโรมิเตอร์ (The Michelson Interferometer) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แผนภูมิระบบไมเคิลสันอินเทอร์ฟีโรมิเตอร์ (The Michelson Interferometer)

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรดแบ่งเป็นช่วงๆ คือ ช่วงเลขคลื่น 12,800-4,000 ต่อเซนติเมตร เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วงเลขคลื่น 4,000-200 ต่อเซนติเมตร เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วงเลขคลื่น 200-10 ต่อเซนติเมตร เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง 4,000-200 ต่อเซนติเมตร ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่น กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum)

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆ ว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่ม แอลกอฮอล์ จะพิกของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,600-3,300 ต่อเซนติเมตร เป็นต้น

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏพบว่าพิกในช่วง 4,000-1,350 ต่อเซนติเมตร จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 1,350-910 ต่อเซนติเมตร จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสง ที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

การใช้เครื่อง FT-IR วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาไม่นานมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตร โครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรด สเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พิกต่อพิก ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่าง โพลีเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น

2.12.5 การวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge : pH_{PZC}) (Soonglendsongpha, 2006)

การหาประจุบนพื้นผิวเพื่อหาค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge (pH_{PZC}) เป็นค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป จนถึงพีเอชระดับหนึ่งซึ่งจำนวนประจุลบและประจวบกับบนพื้นผิวสารดูดซับมีจำนวนเท่ากันนั่นก็คือ จำนวนประจุสุทธิ (net charge) ซึ่งหมายถึงผลต่างของประจุทั้ง 2 ชนิดเท่ากับศูนย์

การหาค่า pH_{PZC} ทำการวัดโดยวิธีไทเทรตด้วย กรด-ด่าง ในรูปของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้สมการดังนี้

$$[OH^-] + [Cl^-] + [\text{negative surface}] = [H^+] + [Na^+] + [\text{positive surface}]$$

หรือ

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= [\text{positive surface}] - [\text{negative surface}] \\ &= [C_A - C_B] - [H^+ - OH^-]\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \text{ประจุบนพื้นผิว} \\ [\text{positive surface}] &= \text{ความเข้มข้นของประจวบกับบนพื้นผิว} \\ [\text{negative surface}] &= \text{ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว} \\ [H^+] &= 10^{-pH} \\ [OH^-] &= 10^{pH-pK_w} \\ [Cl^-] &= [HCl]_{add} + [NaCl]_{add} \\ [Na^+] &= [NaOH]_{add} + [NaCl]_{add} \\ [C_A - C_B] &= [Cl^-] - [Na^+] \\ &= [HCl]_{add} - [NaOH]_{add}\end{aligned}$$

เมื่อประจุบนพื้นผิวเป็นกลาง ประจุลบและประจวบกับบนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากัน หมายความว่า บนพื้นผิวมีประจุเป็นศูนย์ ที่พีเอชที่มีประจุเป็นศูนย์นี้ (pH_{PZC}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$[C_A - C_B] = [H^+ - OH^-]$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายที่ห่อหุ้มหรือล้อมรอบสารดูดซับโดยสารละลายมีค่าพีเอชที่สูงกว่าค่า pH_{PZC} จะเกิดประจุบนพื้นผิวของสารดูดซับ และในทางตรงข้าม ถ้าสารละลายมีค่าพีเอช ที่ต่ำกว่าค่า pH_{PZC} จะเกิดประจวบกับพื้นผิวของสารดูดซับ

2.12.6 HPLC (High Performance Liquid Chromatography) (มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2547)

HPLC คือ เทคนิคหนึ่งของลิควิดโครมาโตกราฟีแบบคอลัมน์ที่สามารถแยกสารได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ

หลักการแยกสารของเหลวความดันสูงจะสร้างแรงกดดันสารต่างๆ ในสารตัวอย่างไปบนตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ หรือเคลื่อนที่ได้เล็กน้อยที่เรียกว่า เฟสนิ่ง (stationary phase) ซึ่งเฟสนิ่งจะสร้างแรงหน่วง (retention force) ต่อสารชนิดต่างๆ ซึ่งจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง ประจุ ความจำเพาะ การดูดซับ การละลาย ดังนั้นความแตกต่างกันของแรงหน่วง จึงทำให้โมเลกุลของสารแต่ละชนิดเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ ซึ่งบรรจุเฟสนิ่งในเวลาหน่วง (retention time) ที่แตกต่างกัน

องค์ประกอบของเครื่อง HPLC

2.12.6.1 ภาชนะบรรจุเฟสเคลื่อนที่ เป็นขวดสำหรับใส่ตัวทำละลายที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่

2.12.6.2 ระบบของปั๊ม (pump system) ใน HPLC มีความสามารถด้านทานการไหลของเฟสเคลื่อนที่ที่จะไหลผ่านคอลัมน์ ซึ่งมีอนุภาคเล็กๆ บรรจุอยู่ ความต้านทานการไหลที่ว่านี้จะมากเมื่อใช้อนุภาคเล็กๆ และคอลัมน์มีขนาดเล็กอีกด้วย จึงจำเป็นต้องใช้ความดันที่สูงดันเฟสเคลื่อนที่ให้ไหลไป

2.12.6.3 หัวตรวจวัด (detector) ส่วนมากเป็นยูวี-วิสิเบิล ดีเทคเตอร์ (UV-VIS Detectors) หลักการทำงานอาศัยการดูดกลืนแสงยูวีของสารตัวอย่าง มีลักษณะพิเศษ คือ ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของการไหล และอุณหภูมิ แต่ค่อนข้างจะมีความไวสูงกับสารประกอบอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ นิยมใช้ความยาวคลื่นในช่วง 257-280 นาโนเมตร

- ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในคอลัมน์ HPLC คือซิลิกา (silica) รองลงมาคืออลูมินา (alumina) และ ซิลิกาเจล (silica gel)
- เฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ ได้แก่ เมทานอล (methanol) น้ำ แอซีโทไนไตรล (acetonitrile) ฯลฯ
- ชนิดเกรดของสารเคมีที่ใช้คือ HPLC grade

ข้อดีของ HPLC

- ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเตรียมที่ยุ่งยากก่อน
- วิธี HPLC สามารถวิเคราะห์สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆได้ ไม่มีข้อจำกัดว่าต้องเป็นสารที่ระเหยได้

- สามารถทำให้การแยกดีขึ้นได้ โดยเปลี่ยนความเข้มข้น หรือชนิดของเฟสที่เคลื่อนที่ได้ตามความเหมาะสม

2.12.7 การวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน (CHNS/O Analyzer) (อัมพร อึ้งปกรณ์แก้ว, 2540)

เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (automatic organic elemental analyzer) ที่เป็นของแข็ง และของเหลว เป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง อาศัยหลักการของ Pregal และ Dumas สารจะเผาไหม้ในบรรยากาศของออกซิเจน แก๊สที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดย Thermal conductivity detector มีหน่วยการวัดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของเครื่องมือนี้สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว จึงเป็นที่นิยมใช้ทดแทนกรรมวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิม เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS/O แบบอัตโนมัติสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกันสำหรับการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ส่วนธาตุออกซิเจนต้องทำการวิเคราะห์แยกเพียงธาตุเดียว

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 Martin และคณะ (2003)

การทำถ่านกัมมันต์จากสลัดจ์ส่วนเกินสำหรับกำจัดสีย้อมในสารละลาย (Activated carbons developed from surplus sewage sludge the removal of dyes from dilute aqueous solutions)

ทำการศึกษาคัดชั้น โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า และสลัดจ์ที่ทำเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับกำจัดสีย้อม 2 ประเภทคือสีย้อมประจุบวก ได้แก่ สีย้อมเบสิกโทนสีแดง (Basic Red 46) และสีย้อมประจุลบ ได้แก่ สีย้อมเอซิดโทนสีน้ำตาล (Acid Brown 283), สีย้อมไดเรกต์โทนสีแดง (Direct Red 89) และ สีย้อมไดเรกต์โทนสีดำ (Direct Black 168) ทำการเตรียมสลัดจ์โดยใช้สลัดจ์ที่รีดน้ำออกแล้วผสมกับกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 17.5 โมลาร์ จากนั้นนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียสจนแห้ง นำสลัดจ์ 300 กรัมใส่ในเตาหลอมที่บรรจุก๊าซไนโตรเจนโดยให้ความร้อนในอัตรา 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 700 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย นำกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3 โมลาร์ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ล้างสลัดจ์แล้วนำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างกรดออกจนได้ค่าพีเอชของน้ำล้างคงที่ นำสลัดจ์ที่ได้คัดขนาดแล้วไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส ทำการศึกษามบัตติ

ของสารดูดซับ และความสามารถในการดูดซับ โดยเตรียมสารละลายสีย้อมที่ทราบความเข้มข้น ปริมาณ 0.1 ลิตร ผสมกับสารดูดซับ 0.4 กรัม ควบคุมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองสารดูดซับและวัดค่าความเข้มข้นของสีย้อมด้วยสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับโดยใช้ กรดไนตริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการ ปรับค่าพีเอช

ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้าสามารถดูดซับสีย้อมประจุลบ ได้ดี ส่วนถ่านกัมมันต์จากสลัดจ์สามารถดูดซับสีย้อมประจุบวกได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์จาก สลัดจ์มีรูพรุนขนาดปานกลาง ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้ามีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งสัมพันธ์กับ ขนาดโมเลกุลของสีย้อม สำหรับผลของค่าพีเอชพบว่า ค่าพีเอชมากขึ้นความสามารถในการดูดซับ น้อยลง

2.13.2 Otero และคณะ (2003)

แบบจำลองทางด้านจลนศาสตร์และสมดุลของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจาก สารละลายโดยกระบวนการดูดซับจากวัสดุที่ผลิตจากสลัดจ์ (Kinetic and equilibrium modelling of the methylene blue removal from solution by adsorbent materials produced from sewage sludges)

สลัดจ์ที่นำมาทำเป็นสารดูดซับแบ่งเป็น 2 ชนิด คือสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ชุมชน และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร โดยเตรียมสลัดจ์ออกเป็น 3 กระบวนการคือ ทำแห้งโดยอบที่ 105 องศาเซลเซียส และคัดขนาดที่ต้องการ กระบวนการที่สอง ทำการเผาเอาสารอินทรีย์ออกจากสลัดจ์โดยนำไปเผาในให้ความร้อนในอัตรา 15 องศาเซลเซียสต่อ นาทีจนครบ 30 นาที และกระบวนการสุดท้ายทำการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดซัลฟูริก ทำการ ทดลองโดยที่ละเท เริ่มจากผสมสารดูดซับ 1 กรัม กับสารละลายสีย้อมที่ทราบความเข้มข้น (100- 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ใส่แม่เหล็ก สำหรับปั่นกวน เก็บน้ำตัวอย่างระหว่างทดลองเพื่อหาค่าจลนศาสตร์และสมดุลของการกำจัดสี

ผลการทดลองพบว่า สลัดจ์ที่ทำให้แห้งให้ค่าการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงกว่าสลัดจ์ที่ เตรียมจากกระบวนการกระตุ้นทางเคมี และการเผาตามลำดับ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยา อันดับ 2 และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็อธิบายได้ตามแบบจำลอง ไอโซเทอมของแลงมัวร์และฟรุนดลิชทั้ง คู่

2.13.3 Kargi และ Ozmihci (2005)

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผง และ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Comparison of adsorption performances of powdered activated sludge and powdered activated carbon for removal of turquoise blue dyestuff)

ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมเทอคอยซ์ โดยใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผงที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก และทำการทดลองในระบบที่ละเท ทำการเตรียมแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผงที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก โดยนำสลัดจ์ล้างด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาณ 200 มิลลิลิตรต่อสลัดจ์ 10 กรัมจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นกรองและนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทำการทดลองการดูดซับโดยใช้สีย้อมความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร และใส่สลัดจ์ชนิดผง และ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในปริมาณที่ต้องการศึกษา (1-6 กรัมต่อลิตร) ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงที่ 8,000 รอบต่อนาที เก็บน้ำส่วนบนมาหาความเข้มข้นของสีย้อมโดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการดูดซับของแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผง และถ่านกัมมันต์ชนิดผง อธิบายได้ตามแบบจำลองไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงสามารถดูดซับสีย้อมเทอคอยซ์ได้ดีกว่าการใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผง โดยแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ดูดซับได้ต่ำที่ความเข้มข้นของแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ต่ำกว่า 4 กรัมต่อลิตร แต่ทั้ง 2 ชนิดสามารถดูดซับได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีความเข้มข้นของสารดูดซับมากกว่า 4 กรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ชนิดผง และแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ชนิดผงมีค่าประมาณ 100 และ 92 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.13.4 Gulnaz และคณะ (2004)

การดูดซับสีย้อมเบสิกโดยสารละลายแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge)

ทำการศึกษาการดูดซับแบบที่ละเท โดยใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้งดูดซับสีย้อมเบสิกโทนสีแดง (Basic Red 18) และ สีย้อมเบสิกโทนสีน้ำเงิน (Basic Blue 9) ทำการเตรียมสลัดจ์โดยล้างสลัดจ์ด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ จากนั้นอบให้แห้งที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่จากนั้นนำมาผสมกับน้ำกลั่น 10 กรัมต่อลิตร กวนผสมที่ 8,000 รอบต่อนาทีจนเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการทดลองโดยใส่สารละลายแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ 10 มิลลิลิตร ในสีย้อมความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม ซึ่งควบคุมที่พีเอช และอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 300 นาที และเก็บ

ตัวอย่างที่เวลาต่างๆ โดยนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 รอบต่อนาที และเก็บน้ำส่วนบนมาหาความเข้มข้นของสีย้อมโดยเครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ผลการทดลองพบว่าสารละลายแอกทิเวเต็ดสลัดจ์สามารถกำจัดสีย้อมเบสิกโดยอธิบายได้ตามแบบจำลองไอโซเทอมของแลงมัวร์และฟรุนดลิชทั้งคู่ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับสอง การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ความสามารถในการดูดซับของ สีย้อมเบสิกโทนสีแดง (Basic Red 18) และ สีย้อมเบสิกโทนสีน้ำเงิน (Basic Blue 9) คือ 285.71 และ 256.41 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

2.13.5 Gulnaz และคณะ (2006)

การนำแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้งกลับมาใช้สำหรับดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ (The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye)

ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5; RB5) โดยใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้งโดยทำการทดลองแบบที่ละเท ทำการเตรียมแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้งโดยล้างสลัดจ์ด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่บดให้ละเอียด และนำมาร่อนผ่านตะแกรงให้ได้อนุภาคนาขนาดน้อยกว่า 0.063 มิลลิเมตร ใช้เป็นสารดูดซับเตรียมสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ 2 ชนิด คือสีย้อมไฮโครไลซิส โดยละลายสีย้อม 5 กรัมในโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ปริมาณ 1 ลิตร จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และเตรียมสีย้อมที่ไม่ไฮโครไลซิส โดยละลายสีย้อมในน้ำกลั่นตามความเข้มข้นที่ต้องการ ทำการศึกษาการดูดซับโดยใช้แอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้ง 0.1 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร และเติมสีย้อมที่ทราบความเข้มข้นปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 180 นาที ในพีเอชและอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาจนแน่ใจว่าถึงสมดุลแล้ว เก็บตัวอย่างในระหว่างการทดลองและกรองสีย้อมออกจากตะกอน นำสีย้อมที่กรองได้หาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการดูดซับอธิบายได้ตามแบบจำลองไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ซึ่งการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟสามารถดูดซับได้ดีที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 2 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลาอิ่มตัวของการดูดซับที่ 30 นาที จากการวิเคราะห์ FT-IR พบว่าแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห้งมีหมู่ฟังก์ชันมากมายซึ่งมีผลกับโมเลกุลของสีย้อม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนและสีย้อมที่ผ่านกระบวนการไฮโครไลเซชันมีผลให้การดูดซับลดลง

2.13.6 Punyapalaku และ Takizawa (2006)

การคัดเลือกมลสารในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุบน hexagonal mesoporous silicates (HMSs) ที่อยู่ในสีย้อมมีประจุ (Selective adsorption of nonionic surfactant on hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes)

ใช้สาร hexagonal mesoporous silicates (HMSs) ในการดูดซับ alkylphenol polyethoxylates (APnEOs) ที่อยู่ในน้ำเสียดีย้อม HMSs สังเคราะห์มาจาก ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ โดยทำการสังเคราะห์ HMSs ให้มีลักษณะหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน เพื่อเป็นสารดูดซับ และใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เป็นตัวแทนของ APnEOs และสีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1) และสีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน (Acid Blue 45) ซึ่งเป็นสีย้อมมีประจุ โดยหาความสามารถในการดูดซับของ Triton X-100, สีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1) และ สีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน (Acid Blue 45) จาก HMSs ที่มีลักษณะหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกันได้แก่ n-Octyldimethyl-(OD-HMS), 3-aminopropyltriethoxy-(AM-HMS), 3-mercaptopropyl-(MP-HMS), Silanol (HMS, Ti-HMS) และทำการดูดซับ Triton X-100 ที่ผสมกับ สีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1) หรือ สีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน (Acid Blue 45) เทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า

พบว่า HMS ทุกชนิดยกเว้น AM-HMS สามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวได้สูงกว่า ถ่านกัมมันต์ จากการวิเคราะห์ FTIR พบว่า HMSs ดูดซับ สีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1) และ สีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน (Acid Blue 45) ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ TX-100 มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เบสิกโทนสีเหลือง เนื่องจากการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ซึ่งต่างจากการดูดซับสีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน

2.13.7 Al-Qodah (2006)

การดูดซับโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้สลัดจ์ (Biosorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated sludge)

ใช้สลัดจ์เป็นสารดูดซับคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) และ นิกเกิลไอออน (Ni^{2+}) โดยทำการปรับปรุงสลัดจ์โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยนำสลัดจ์ 150 กรัม ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่เครื่องกวนแม่เหล็กกวนผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกสลัดจ์ออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชของน้ำล้างมีค่าเท่ากับ 7 แล้วนำไปอบให้แห้ง ส่วนสลัดจ์ที่กระตุ้นด้วยไฮโดรคลอริกก็ทำเช่นเดียวกันแต่ใช้ไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำการทดลองดูดซับโลหะหนักเทียบกับสลัดจ์ที่ไม่ได้กระตุ้น

พบว่าสลัดจ์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนสลัดจ์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไฮโดรคลอริกให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง ส่วนสลัดจ์ที่ไม่ได้ทำการกระตุ้นสามารถดูดซับ คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) และ แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ได้เป็นอย่างดี แต่นิกเกิลไอออน (Ni^{2+}) ต่ำ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสลัดจ์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไฮโดรคลอริกมีค่าเท่ากับ 131.6 และ 93.4 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) และ แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ตามลำดับ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ตามแบบจำลองไอโซเทอมของ แลงมัวร์และฟรุนดลิชทั้งคู่ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 45 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดลดลง 18.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สารดูดซับ	สารถูกดูดซับ	ผลการศึกษา
Martin และคณะ (2003)	สลัดจ์ (กระตุ้นด้วยกรด) และ ถ่านกัมมันต์	ลีสיוםเบสิกโทนสีแดง ลีสיוםเอสิคโทนสีน้ำตาล ลีสיוםไดเรกท์โทนสีแดง ลีสיוםไดเรกท์โทนสีดำ	สลัดจ์ดูดซับลีสיוםประจุบวกได้ดีส่วนถ่านกัมมันต์ดูดซับลีสียมประจุลบได้ดีเนื่องจากขนาดของรูพรุนเหมาะสม
Otero และคณะ (2003)	สลัดจ์ (แห้ง, เผา) และกระตุ้นด้วยกรด)	ลีสียมเมทิลีนบลู	สลัดจ์ที่ทำให้แห้งให้ค่าการดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด และ เผา
Kargi และ คณะ (2004)	สลัดจ์ชนิดผง (กระตุ้นด้วยกรด) และ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง	ลีสียมเทอคอยซ์	ถ่านกัมมันต์ชนิดผงสามารถดูดซับลีสียมได้ดีกว่าสลัดจ์
Gulnaz และคณะ (2004)	สลัดจ์แห้ง	ลีสียมเบสิกโทนสีแดง ลีสียมเบสิกโทนสีน้ำเงิน	สลัดจ์มีความสามารถในการดูดซับคือ 256.41- 285.71 มิลลิกรัมต่อกรัม
Gulnaz และคณะ (2006)	สลัดจ์แห้ง	ลีสียมรีแอกทีฟโทนสีดำ	การดูดซับลีสียมได้ดีที่พีเอชต่ำ อุณหภูมิต่ำ ความสามารถในการดูดซับ 116 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สารดูดซับ	สารถูกดูดซับ	ผลการศึกษา
Punyapalakul และ Takizawa (2006)	Hexagonal mesoporous silicates และ ถ่านกัมมันต์ ชนิดผง	Triton X-100 สีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง สีย้อมเอซิดโทนสีน้ำเงิน	TX-100 มีผลต่อการดูดซับ Basic Yellow 1 เนื่องจากเป็น การดูดซับด้วยแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ซึ่งต่างจาก การดูดซับ Acid Blue 45
Al-Qodah (2006)	สไลด์จ์ (กระตุ้น ด้วยกรด ต่าง และ ไม่ถูก กระตุ้น)	คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) และ นิกเกิลไอออน (Ni^{2+})	สไลด์จ์กระตุ้นด้วยต่างสามารถ ดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่า สไลด์จ์กระตุ้นด้วยกรด ส่วน สไลด์จ์ที่ไม่ได้ทำกระตุ้น สามารถดูดซับ Cu^{2+} , Cd^{2+} ได้ดี แต่ Ni^{2+} ต่ำ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้สนใจที่จะทำการสังเคราะห์สไลด์จ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้เป็นสารดูดซับ โดยสังเคราะห์ออกมาเป็น 3 ประเภท ได้แก่สไลด์จ์ที่ทำการกระตุ้นพื้นผิวด้วยกรด ด้วยต่าง และ ไม่ถูกกระตุ้น เพื่อเปรียบเทียบการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง 3 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด และ กระตุ้นด้วยต่าง โดยศึกษาการดูดซับสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่สีย้อมแอททิฟโทนสีดำ (Reactive Black 5) และสีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1) ซึ่งเป็นสีย้อมประจุลบ และประจุบวก ตามลำดับ รวมทั้งศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิว (Triton X-100) และสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย

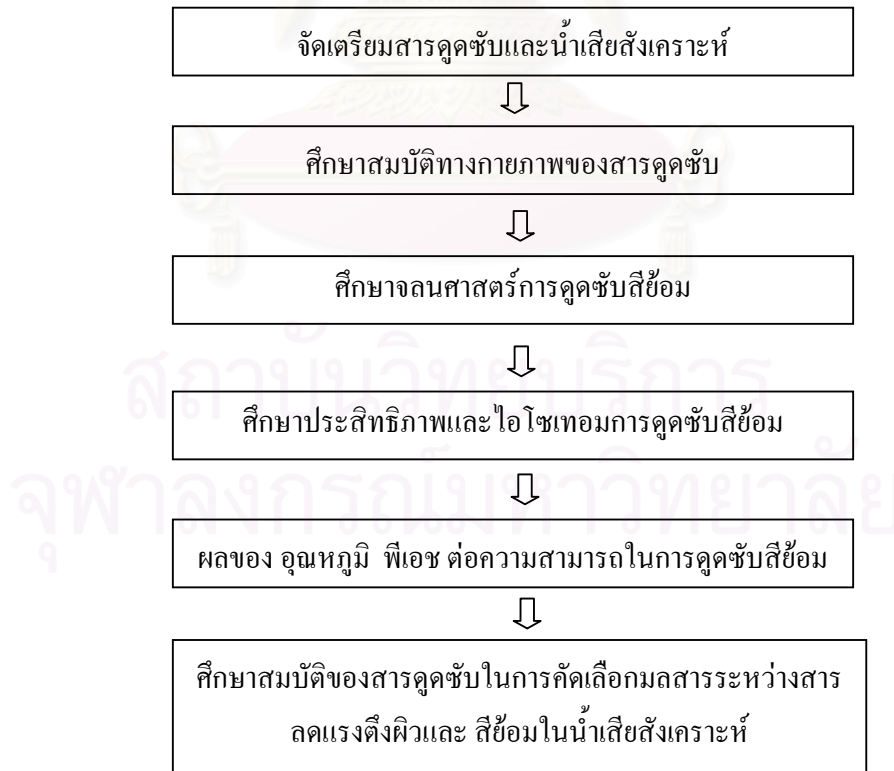
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการศึกษา

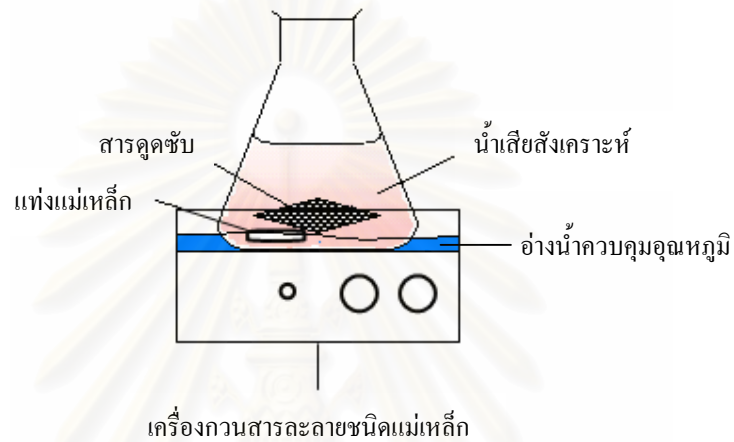
ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีย้อมรีแอกทีฟ และ สีย้อมเบสิก โดยใช้สารดูดซับทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด สลัดจ์กระตุ้นด้วยด่าง และสลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น และศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับทุกชนิด ทำการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ประสิทธิภาพและไอโซเทอมการดูดซับ ปฏิกิริยาทางเคมี (การปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่าง) และทางกายภาพ (อุณหภูมิ และพีเอช) ที่เหมาะสมในการดูดซับ รวมทั้งศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิวและสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 โมเดลในการทดลอง

โมเดลในการทดลองเป็นดังแสดงในภาพที่ 3.2 โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่น้ำเสียสังเคราะห์และสารดูดซับ แล้วนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ และทำการปั่นกวนโดยเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็ก



ภาพที่ 3.2 โมเดลถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

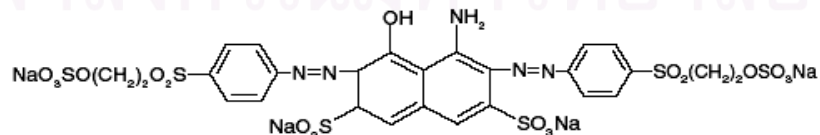
3.3 สารดูดซับ

3.3.1 สีข้อม

สีข้อมที่ใช้สำหรับการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สีข้อมประจุลบ และประจุบวก ได้แก่ สีข้อมรีแอกทีฟ และสีข้อมเบสิก ตามลำดับ

3.3.4 สีข้อมรีแอกทีฟ

สีข้อมรีแอกทีฟที่เลือกใช้ได้แก่ สีข้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5; RB5)

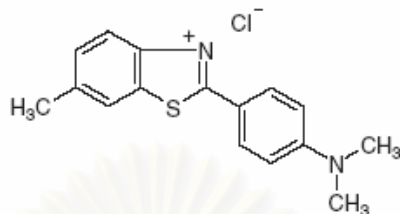


ภาพที่ 3.3 สีข้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5)

(Brosillon และคณะ, 2008)

3.3.5 สีข้อมเบสิก

สีข้อมเบสิกที่เลือกใช้ได้แก่ สีข้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1; BY1)

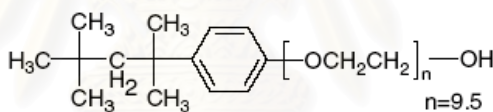


ภาพที่ 3.4 สีข้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic Yellow 1)

(Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

3.3.2 สารลดแรงตึงผิว (Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ได้แก่ iso-octylphenol ethoxylate (Triton X-100) เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ ความยาวเฉลี่ยของสาย เท่ากับ 9.5 โมโนเมอร์ แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างโมเลกุลของ Triton X-100

(Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารถูกดูดซับ

สารถูกดูดซับ	ประจุ	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	ขนาด (nm.x nm.)	ความยาวคลื่นที่ใช้ ตรวจวัด (นาโนเมตร)
Reactive Black 5	ลบ	991.82	3.61 x 1.23*	597
Basic Yellow 1	บวก	318.86	1.44 x 0.64*	412
Triton X-100	ไม่มีประจุ	647	3.43 x 0.49*	275

หมายเหตุ * คำนวณจากโปรแกรม ADC Labs chemsketch program

3.4 การเตรียมสารดูดซับ และน้ำเสียสังเคราะห์

วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นสารดูดซับคือสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย และถ่านกัมมันต์ชนิดผง

3.4.1 สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ย่อยแล้วด้วยระบบไร้อากาศ โดยนำมาจากลานตากตะกอนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ซึ่งเป็นโรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ทำการสังเคราะห์สลัดจ์ออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

- สลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น (D-Sludge)
- สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด (A-Sludge)
- สลัดจ์กระตุ้นด้วยด่าง (B-Sludge)

3.4.1.1 สลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น (Gulnaz และคณะ, 2006) (Kargi และ Ozmihci, 2005)

- 1) นำก้อนสลัดจ์จากลานตากตะกอนมาบดจนเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ
- 3) นำไปอบให้แห้งในตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่
- 4) นำสลัดจ์แห้งมาร้อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร

3.4.1.2 สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด และด่าง

- 1) นำสลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้นผสมกับกรดไนตริกความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระตุ้นด้วยกรด และผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 นอร์มอล สำหรับกระตุ้นด้วยด่าง ผสมเป็นเวลา 5 ชั่วโมง (Thuy, 2006)
- 2) แยกสลัดจ์ด้วยกระดาษกรองแล้วนำมาล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์จนค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำดีไอออไนซ์
- 3) นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่
- 4) ทำการบดสลัดจ์ และนำมาร้อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร

3.4.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (PAC) Shirasagi S-10 จาก บริษัท EnviroChemicals Ltd. และทำการปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวถ่านกัมมันต์เพิ่มอีก 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด (A-PAC) และถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง (B-PAC) ซึ่งทำการปรับปรุงพื้นผิวเช่นเดียวกับการสังเคราะห์สัจจกระตุ้นด้วยกรด และสัจจกระตุ้นด้วยด่างตามลำดับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้ามาทำการกระตุ้น

สมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (PAC) Shirasagi S-10 มีดังนี้ (Punyapalukul, 2004)

ขนาดรูพรุนเฉลี่ย	=	1.9 นาโนเมตร
พื้นที่ผิวเบท (BET)	=	980 ตารางเมตรต่อกรัม
พื้นที่ผิวภายนอก	=	59 ตารางเมตรต่อกรัม
ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง	=	276 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม
ค่า pH_{pzc}	=	9.8
ขนาดอนุภาค	=	36.54 ไมโครเมตร
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	=	คาร์บอกซิลฟีนิล และอื่นๆ
สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ	=	ไม่ชอบน้ำ

3.4.3 การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

น้ำเสียดังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ประเภท ดังนี้

3.4.3.1 สารละลายสีย้อมเตรียมโดยละลายสีย้อมตามความเข้มข้นที่ต้องการ โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับพีเอชและความแรงไอออนด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

3.4.3.2 สารละลายสารลดแรงตึงผิวโดยละลายสารลดแรงตึงผิวตามความเข้มข้นที่ต้องการ โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับพีเอชและความแรงไอออนด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

3.4.3.3 สารละลายผสมระหว่างสีย้อมและสารลดแรงตึงผิว โดยละลายสารลดแรงตึงผิวผสมสีย้อมตามความเข้มข้นที่ต้องการ โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับพีเอชและความแรงไอออนด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

3.5 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับ

ทำการศึกษสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับที่ทำการเตรียมเรียบร้อยแล้ว โดยตรวจวัดค่าดังต่อไปนี้

3.5.1 การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

การหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับไนโตรเจนจากสมการของเบท (BET) โดยส่งวิเคราะห์ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

3.5.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การหาหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องมือฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR Spectrometer) โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3 การวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Point of Zero Charge (pH_{pzc})) (Al-Ghouti และคณะ, 2003)

วิธีการหาประจุบนพื้นผิวโดยทำการตรวจวัดโดยวิธีไทเทรตด้วย กรด-ด่าง มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำสารดูดซับผสมกับน้ำดีไอออนจำนวน 10 มิลลิลิตร หรือ 1 กรัมต่อน้ำดีไอออน 1 ลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่
- 2) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร เพื่อปรับ พีเอชให้เท่ากับ 3 5 7 9 และ 11
- 3) เจือจางส่วนผสมให้ได้ปริมาตร 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอออน
- 4) ปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
- 5) นำตัวอย่างไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส)
- 6) ทำการวัดค่าพีเอช ซึ่งจะบอกความเข้มข้นของ โปรตอน (H⁺) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻)
- 7) กำหนดหาประจุบนพื้นผิวได้จากสมการดังนี้

ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว (C/g) = $\{[HCl]_{add} - [NaOH]_{add} - [H^+] + [OH^-]\} \times 96500/W$

โดย	$[HCl]_{add}$	ความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)
	$[NaOH]_{add}$	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)
	$[H^+]$	ความเข้มข้นของโปรตอน (โมลต่อลิตร) คำนวณจาก $pH = -\log [H^+]$
	$[OH^-]$	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (โมลต่อลิตร) คำนวณจาก $pOH = -\log [OH^-]$ และ $pOH = 14 - pH$
	96500	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมบ์ต่อโมล)
	W	น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัมต่อลิตร)

นำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างค่าพีเอชและความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว เพื่อหาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (ค่า pH_{pzc})

3.5.4 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Elemental Analysis)

ทำการวิเคราะห์ในสารดูดซับประเภทสไลด์เจ้านั้น โดยตรวจวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ CHN Elemental analyzer โดยส่งวิเคราะห์ที่ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 การดูดซับสีย้อม

3.6.1 จลนศาสตร์ของสีย้อมบนพื้นผิวของสารดูดซับ

1) เตรียมสารละลายสีย้อมด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 50 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทสไลด์ และ ถ่านกัมมันต์ตามลำดับ ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 13 ขวด ปริมาณขวดละ 100 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 และปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์

2) เติมปริมาณสารดูดซับ 0.2 และ 0.035 มิลลิกรัม สำหรับสารดูดซับประเภทสไลด์ และ ถ่านกัมมันต์ตามลำดับ ใส่ในสารละลายสีย้อม

3) นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กโดยควบคุมที่ 350 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

4) เก็บตัวอย่างสารละลายทั้ง 13 ขวดโดยเก็บขวดที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 และ 13 ที่เวลาผ่านไป 0 0.5 1 5 10 30 60 120 180 240 300 360 และ 420 นาที ตามลำดับ สำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีข้อมที่คงเหลือ

5) นำตัวอย่างสารละลายที่ได้กรองเพื่อแยกสารดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C

6) นำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีข้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

7) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่าง เป็นสารละลายสีข้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีข้อมรีแอกทีฟ (RB5) และสีข้อมเบสิก (BY1)

8) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนสารดูดซับ 6 ชนิด ได้แก่ D-Sludge A-Sludge B-Sludge PAC A-PAC และ B-PAC

9) นำข้อมูลมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสีข้อมที่เหลืออยู่ เพื่อให้ได้เวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

10) นำข้อมูลมาวาดกราฟเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับโดยใช้สมการดังต่อไปนี้ (Gulnaz และคณะ, 2006)

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

- ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

- ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion)

$$q_t = k_p t^{1/2}$$

เมื่อ

q_e ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับที่จุดสมดุล หรือ ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (นาที⁻¹)

k_2 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

k_p ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (มิลลิกรัมต่อกรัม นาที^{0.5})

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{m}$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{m}$$

- C_0 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_e ความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_t ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 V ปริมาณสารละลาย (ลิตร)
 m ปริมาณสารดูดซับ (กรัม)

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์ของสีย้อมบนพื้นผิวสารดูดซับ

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสัคตจ์ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ปริมาณสารละลายสีย้อม	100 มิลลิลิตร
	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทสัคตจ์ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทถ่านกัมมันต์
	จำนวนตัวอย่าง	13 ตัวอย่าง (13 ขวด)
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	เวลา	0 0.5 1 5 10 30 60 120 180 240 300 360 และ 420 นาที

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์ของสีย้อมบนพื้นผิวสารดูดซับ

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ (ต่อ)	ชนิดของสารดูดซับ	สัลดิจ์ที่ไม่ถูกกระตุ้น สัลดิจ์กระตุ้นด้วยกรด สัลดิจ์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	ชนิดของสีย้อม	สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมเบสิก
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่	-

3.6.2 ประสิทธิภาพ และไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม

1) เตรียมสารละลายสีย้อม 7 ความเข้มข้นตามตารางที่ 3.3 ปริมาณละ 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 และปรับค่าความแรงไอออน เท่ากับ 0.01 โมลาร์

2) ทำตามการทดลองที่ 3.6.1 (ข้อ 2-8) โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อถึงเวลาเข้าสู่สมดุลโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนศาสตร์ของสีย้อม (จากการทดลองที่ 3.6.1)

3) นำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับสีย้อม เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิด เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นที่ผิวของสารดูดซับด้วยกรด และ ด่าง ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม

4) นำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับ ไอโซเทอมที่ใช้มีดังนี้

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right) \left(\frac{1}{bq_m}\right)$$

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$$

โดย

q	ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_m	ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C_e	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
K	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (ลิตรต่อกรัม)
1/n	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช
b	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงมัวร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ และไอโซเทอมในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสไลด์จ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ปริมาณสารละลายสีข้อม	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.6.1)
	จำนวนรอบในการปั่นกววน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารละลายสีข้อม	10 30 50 80 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทสไลด์จ 80 110 130 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทถ่านกัมมันต์
	ชนิดของสารดูดซับ	สไลด์จไม่ถูกกระตุ้น สไลด์จกระตุ้นด้วยกรด สไลด์จกระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ (ต่อ)	ชนิดของสีข้อม	สีข้อมรีแอกทีฟ สีข้อมเบสิก
	ความเข้มข้นของสีข้อมที่ เหลืออยู่	-

3.6.3 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

- 1) ทำตามการทดลองตามที่ 3.6.2 (ข้อ 1-2) โดยควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 5 7 และ 9 และปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์
- 2) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นสีข้อมที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ
- 3) นำค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสารดูดซับแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในแต่ละพีเอช

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปร ควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสตั๊ดจ์ 0.2 กรัม
		ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ปริมาณสารละลายสีข้อม	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.6.1)
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
จำนวนรอบในการปั่นกววน	350 รอบต่อนาที	
ตัวแปร อิสระ	ความเข้มข้นของสารละลาย สีข้อม	10 30 50 80 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทสตั๊ดจ์
		80 110 130 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อ ลิตรสำหรับดูดซับด้วยสารประเภทถ่านกัมมันต์
	พีเอช	พีเอช 5 7 และ 9 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ (ต่อ)	ชนิดของสารดูดซับ	สัลดจ์ไม่ถูกกระตุ้น สัลดจ์กระตุ้นด้วยกรด สัลดจ์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	ชนิดของสีข้อม	สีข้อมรีแอกทีฟ สีข้อมเบสิก
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีข้อมที่เหลืออยู่	-

3.6.4 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

- 1) ทำการทดลองตามข้อ 3.6.2 ข้อ 1-2 โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 40 ± 2 และ 55 ± 2 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- 2) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับสีข้อม เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ
- 3) นำค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสารดูดซับแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสัลดจ์ 0.2 กรัม
		ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
ปริมาณสารละลายสีข้อม	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร	

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม (ต่อ)	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 4.6.1)
	จำนวนรอบในการปั่น กวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของ สารละลายสีข้อม	10 30 50 80 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดูดซับด้วยสารประเภทสัจค์ 80 110 130 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อ ลิตรสำหรับดูดซับด้วยสารประเภทถ่านกัมมันต์
	อุณหภูมิ	25±2 40±2 และ 55±2 องศาเซลเซียส
	ชนิดของสารดูดซับ	สัจค์ที่ไม่ถูกกระตุ้น สัจค์กระตุ้นด้วยกรด สัจค์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	ชนิดของสีข้อม	สีข้อมรีแอกทีฟ สีข้อมเบสิก
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีข้อมที่ เหลืออยู่	-

3.7 สมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิวและสีข้อมในน้ำเสีย สังเคราะห์

3.7.1 จลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของสารดูดซับ

1) เตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 9 ขวด ปริมาณขวดละ 100 มิลลิลิตร ความคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 และปรับค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์

2) ทำตามการทดลองที่ 3.6.1 (ข้อ 2-8) โดยเก็บตัวอย่างสารละลายทั้ง 9 ขวด โดยเก็บขวดที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ที่เวลาผ่านไป 0 5 10 20 30 60 120 180 และ 240 นาที ตามลำดับ สำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

3) นำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างเวลาและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหลือ เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลและอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวสารดูดซับสีเขียว

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสไลด์จ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ปริมาณและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
	จำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง (9 ขวด)
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	เวลา	0 5 10 20 30 60 120 180 และ 240 นาที
	ชนิดของสารดูดซับ (ต่อ)	สไลด์จที่ไม่ถูกกระตุ้น สไลด์จกระตุ้นด้วยกรด สไลด์จกระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	สารลดแรงตึงผิว	Triton X-100
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่	-

3.7.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว (Triton X-100)

1) เตรียมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ความเข้มข้น 50 75 100 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร

2) ทำตามการทดลองที่ 3.7.1 (ข้อ 2) โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อเวลาเข้าสู่สมดุลโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิว (จากการทดลองที่ 3.7.1)

3) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของ Triton X-100 ที่สถานะสมดุล และความสามารถในการดูดซับ Triton X-100 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Triton X-100

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสตัคค์ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว	ปริมาณ 100 มิลลิตร
	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.7.1)
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	50 75 100 200 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ชนิดของสารดูดซับ	สตัคค์ที่ไม่ถูกกระตุ้น สตัคค์กระตุ้นด้วยกรด สตัคค์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวที่เหลือ	-

3.7.3 การศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิวและ สีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองขั้นที่ 1 ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

- 1) เตรียมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ความเข้มข้นต่างๆ ผสมกับสีย้อมตามความเข้มข้นคงที่ตามตารางที่ 3.8 ปริมาณ 100 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) ทำตามการทดลองที่ 3.7.2 (ข้อ 2) โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อเวลาเข้าสู่สมดุล โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิว (จากการทดลองที่ 3.7.1)
- 3) นำสารละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อแยก Triton X-100 และหาปริมาณ Triton X-100 ที่เหลืออยู่ และตรวจวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 4) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้น Triton X-100 ที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับสีย้อม และความสามารถในการดูดซับ Triton X-100

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสัลดจ์ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	75 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสารดูดซับประเภทสัลดจ์และถ่านกัมมันต์ตามลำดับ
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณของสารละลายผสม	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.7.1)
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของ Triton X-100	25 35 50 100 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3.8 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ (ต่อ)	ชนิดของสารดูดซับ	สไลด์ที่ไม่ถูกกระตุ้น สไลด์กระตุ้นด้วยกรด สไลด์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	ชนิดของสีย้อม	สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมเบสิก
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่	-

การทดลองขั้นที่ 2 ศึกษาผลของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

- 1) เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้นต่างๆ ตามตารางที่ 3.9 ผสมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) ทำตามการทดลองที่ 3.7.2 (ข้อ 2) โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อเวลาเข้าสู่สมดุล โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนศาสตร์ของสีย้อม (จากการทดลองที่ 3.6.1)
- 3) นำสารละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อแยก Triton X-100 และหาปริมาณ Triton X-100 ที่เหลืออยู่ และตรวจวัดความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 4) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับสีย้อม และความสามารถในการดูดซับ Triton X-100

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณสารดูดซับ	ประเภทสไลด์จ์ 0.2 กรัม ประเภทถ่านกัมมันต์ 0.035 กรัม
	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว	ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณของสารละลาย	ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
	เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.6.1)
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	350 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	50 75 100 150 170 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ชนิดของสารดูดซับ	สไลด์จ์ที่ไม่ถูกกระตุ้น สไลด์จ์กระตุ้นด้วยกรด สไลด์จ์กระตุ้นด้วยด่าง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง
	ชนิดของสีย้อม	สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมเบสิก
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่	-

เมื่อได้ผลการทดลองทั้ง 2 ชั้นนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาสมบัติของสารดูดซับแต่ละชนิดในการคัดเลือกมลสารระหว่างสีย้อมและสารลดแรงตึงผิว

3.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการใช้สารดูดซับในการกำจัดสีย้อม

เมื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดแล้ว จะนำผลการศึกษาดังกล่าวมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเพื่อดูถึงความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจริงในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งจะทำการคำนวณถึงค่าใช้จ่ายตั้งแต่การจัดซื้อสารดูดซับ การเตรียมสารดูดซับ จนถึงการจัดกากตะกอนของสารดูดซับ

3.9 อุปกรณ์และสารเคมี

3.9.1 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดสารดูดซับ

- ตรวจวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบ (คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน) ด้วยเครื่อง CHN Elemental analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ Lego
- ตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับ ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ยี่ห้อ PerkinElmer (Spectrum One)
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว (BET) รุ่น Autosorb 1C ยี่ห้อ Quantachrome Instrument, U.S.A.

3.9.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

- เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก Astone magnetic stirrer รุ่น RS-6D ยี่ห้อ Rexim
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV/Visible spectrophotometer รุ่น Helios Alpha ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation, U.S.A
- High Performance Liquid Chromatography (HPLC) รุ่น 1100 ยี่ห้อ Agilent, Germany
- เครื่องวัดพีเอช รุ่น Desktop pH Meter PHL-20 ยี่ห้อ DDK
- กระดาษกรอง GFC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
- หลอดชนิดยา ขนาด 10 มิลลิตร ยี่ห้อ Nipro
- หัวกรองพลาสติก (filter holder) ขนาด 25 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Swinnex
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น HM-300 ยี่ห้อ AND
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ น้ำ ยี่ห้อ Julabo
- ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTB Blinder
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 200
- ชุดเครื่องแก้วอื่นๆ

3.9.3 สารเคมี

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า Shirasagi S-10 จากบริษัท EnviroChemicals Ltd.
- สีข้อมรีแอกทีฟ (RB5) Remazol Black B grand 133% ยี่ห้อ DyStar
- สีข้อมเบสิก (BY1) Thioflavin T ยี่ห้อ Aldrich , U.S.A.
- Iso-octylphenol ethoxylate (Triton X-100) ยี่ห้อ Panreac, PRS
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ Fisher Scientific
- กรดไนตริก (HNO₃) ยี่ห้อ Fisher Scientific
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ J.T. Baker
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ J.T. Baker
- โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH₂PO₄) ยี่ห้อ Univar
- ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na₂HPO₄) ยี่ห้อ VolChem
- 2-โพรพานอล (2 -Propanal) เกรด HPLC ยี่ห้อ Chromanorm
- เฮกเซน (n-Hexane) เกรด HPLC ยี่ห้อ Fisher Scientific



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับ

4.1.1 พื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวของสารดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าสารดูดซับประเภทสัลดจ์มาก ถึง 40-120 เท่า ดังนั้นสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสารดูดซับประเภทสัลดจ์มาก และเนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะเพียงเล็กน้อยจึงคาดว่าพื้นที่ผิวสารดูดซับประเภทสัลดจ์ไม่มีรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งการปรับปรุงพื้นที่ผิวของสารดูดซับด้วยการกระตุ้นด้วยกรด และล้างส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับประเภทสัลดจ์อย่างชัดเจน โดย A-Sludge และ B-Sludge มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก D-Sludge ถึง 3 และ 1.5 เท่าตามลำดับ แต่สำหรับสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) พบการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thuy (2006) ที่ระบุว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 980 ตารางเมตรต่อกรัม และการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยกรดและล้างไม่มีผลกระทบต่อพื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากงานวิจัยของ Wang และคณะ (1998) ระบุว่าสัลดจ์ชั้นที่สองมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 83-152 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งแตกต่างจากผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับประเภทสัลดจ์ที่นำมาวิจัย

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ

สารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	พื้นที่ผิวภายนอก (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)
D-Sludge	8.62	-	-
A-Sludge	26.46	-	-
B-Sludge	12.94	-	-
PAC	980*	-	1.9*
A-PAC	1,025.50	416.6	-
B-PAC	1,051.53	463.3	-

หมายเหตุ * Punyapalakul (2004)

4.1.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารดูดซับ

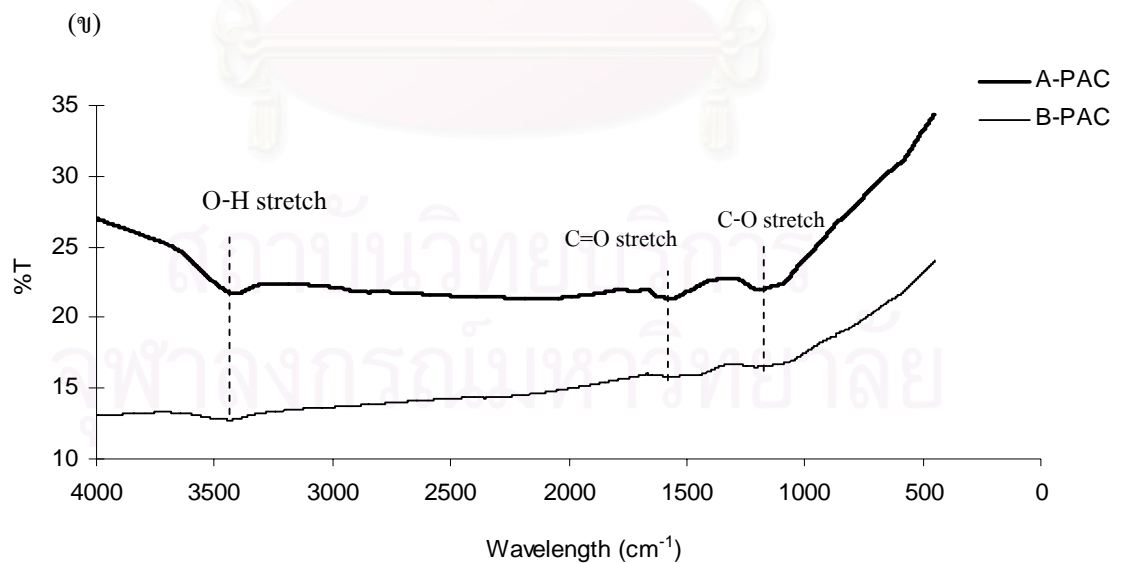
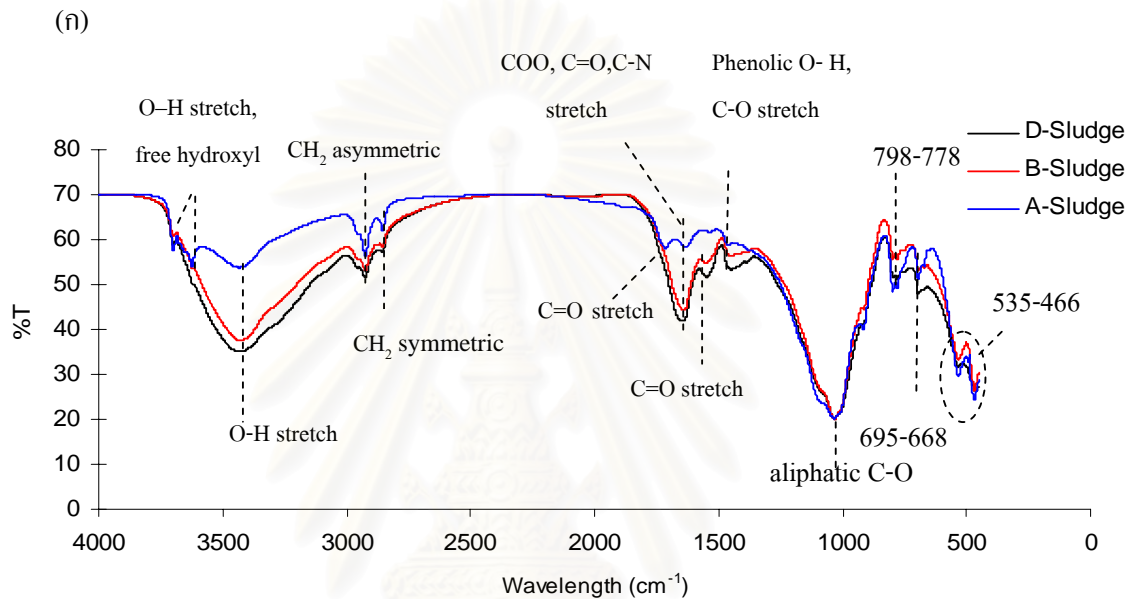
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับแสดงดังภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พบว่า D-Sludge และ B-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน โดย B-Sludge มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันลดลงจาก D-Sludge เล็กน้อย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏจากการวิเคราะห์มีดังนี้ ที่คลื่นอินฟราเรดที่ 3400 ซม.⁻¹ แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) (Gulnaz และคณะ, 2006) ที่ช่วงคลื่น 2924 และ 2852 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่แอลคิล (CH₂) (Gulnaz และคณะ, 2006) ที่ช่วงคลื่น 1700-1680 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลพันธะคู่ (C=O) (Thuy, 2006) ที่ช่วงคลื่น 1647-1631 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิลิก ออกซิเจนพันธะคู่ และ อะมิโน (COO, C=O และ C-N) (Gulnaz และคณะ, 2006) ที่ช่วงคลื่น 1548-1547 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลพันธะคู่ (C=O) และ 1458-1450 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และ ออกซิเจนพันธะเดี่ยว (C-O) ที่คลื่น 1033 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่เอลิฟาทิกของออกซิเจนพันธะเดี่ยว (C-O) ส่วนช่วงคลื่นที่ต่ำกว่า 1000 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่ของฟอสเฟต และซัลเฟต (Gulnaz และคณะ, 2006)

ในกรณีของ A-Sludge พบว่ามีช่วงคลื่นที่ 3700-3600 ซม.⁻¹ และ 1713 ซม.⁻¹ เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงถึงหมู่ OH และ C=O ตามลำดับ (ปรานอม ขาวเมฆ, 2539) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของกรด และพบว่าช่วงคลื่น 3400 ซม.⁻¹ และ 1647-1631 ซม.⁻¹ มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันลดลงซึ่งแสดงถึงหมู่ของ O-H (stretching) COO, C=O และ C-N ที่คลื่น 1034 ซม.⁻¹ หมู่เอลิฟาทิก C-O ลดลงเล็กน้อย ส่วนคลื่นที่ต่ำกว่า 1000 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่ของฟอสเฟต และซัลเฟต (Gulnaz และคณะ, 2006) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR กล่าวว่าสารดูดซับประเภทสัจจมีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย มีปริมาณสารอินทรีย์จำนวนมาก และมีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบด้วย โดยสารอินทรีย์ประกอบไปด้วย โปรตีน ไขมัน สารประกอบโพลีเมอร์ และหมู่คาร์บอกซิลิก (Gulnaz และคณะ, 2006) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏมีหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำ (hydrophilic) มากกว่าหมู่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

สำหรับผลการศึกษามูล์ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้าที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและเบส (A-PAC และ B-PAC) พบว่า A-PAC และ B-PAC มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน โดยมีช่วงคลื่น 3600-3200 ซม.⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ช่วงคลื่น 1750-1550 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลพันธะคู่ (C=O) และช่วงคลื่น 1210-1100 ซม.⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลพันธะเดี่ยว (C-O) จากภาพที่ 4.1 (ข) ไม่สามารถระบุได้ว่าหมู่ฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง แต่จากงานวิจัยของ Thuy (2006) พบว่าการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยกรด (HNO₃) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) คาร์บอนิล (C=O) และ ฟีนอลิก (C-O) ซึ่งเป็นพวกหมู่กรด และการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยด่าง (NaOH) ทำให้เกิดการลดลงของหมู่ คาร์บอกซิลิก (COO)

คาร์บอนิลด์ (C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) แต่พบหมู่แอลไคนิก (C-O) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ กล่าวโดยสรุปได้ว่าหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไม่หลายหลากนัก และมีสมบัติของความชอบไม่ชอบน้ำ (Punyapalaku, 2004) ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาที่ได้จากสารดูดซับประเภทสไลด์จ์ที่กล่าวถึงข้างต้น



ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับด้วย FT-IR
(ก) สารดูดซับประเภทสไลด์จ์ (ข) สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับที่เปลี่ยนแปลง

สารดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน	
	เพิ่มขึ้น	ลดลง
สลัดจ์ที่ไม่ถูกกระตุ้น (D-Sludge)	ตัวควบคุม	
สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด (A-Sludge)	OH และ C=O	OH stretching
สลัดจ์กระตุ้นด้วยด่าง (B-Sludge)	-	OH stretching
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (PAC)	ตัวควบคุม	
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด (A-PAC)	OH stretching C=O และ C-O*	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง (B-PAC)	C-O*	OH stretching C=O และ COO*

หมายเหตุ * Thuy (2006)

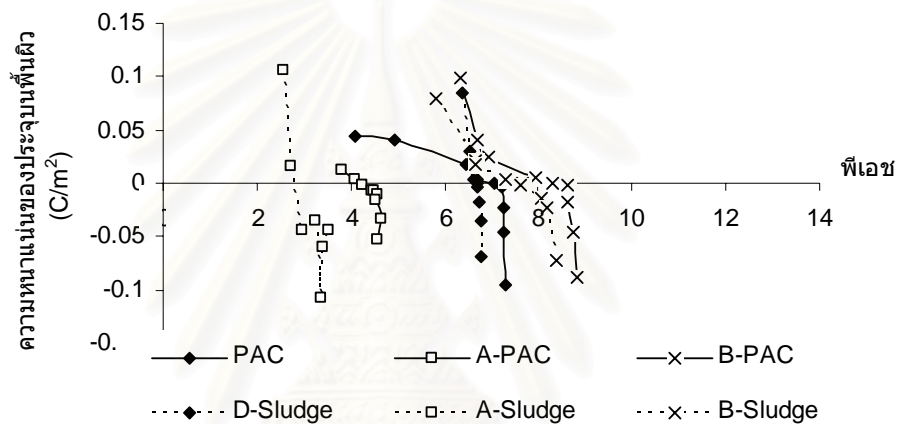
4.1.3 ค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Point of Zero Charge (pH_{pzc}))

ทำการวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวสารดูดซับด้วยวิธีไทเทรตด้วย กรด-ด่าง โดยให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จากผลของค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge (pH_{pzc}) ที่ได้จากการทดลองพบว่า D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.70 2.73 และ 7.68 ตามลำดับ และค่า pH_{pzc} ของ PAC A-PAC และ B-PAC มีค่าเท่ากับ 7.08 4.26 และ 8.29 ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยควบคุมสารละลายให้มีค่าพีเอชที่ 5 7 และ 9 ซึ่งจะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวของสารดูดซับแต่ละชนิดดังนี้ A-Sludge และ A-PAC มีค่า pH_{pzc} 2.73 และ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าพีเอชในสารละลายจึงส่งผลให้เกิดประจุลบที่พื้นผิวสารดูดซับมากขึ้น ในส่วนของ D-Sludge มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.70 ซึ่งในสารละลายพีเอช 5 จะมีประจุบวกบนพื้นผิว แต่ในสารละลายพีเอช 7 และ 9 ส่งผลให้มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบมากขึ้น สำหรับสารดูดซับ B-Sludge PAC และ B-PAC ในสารละลายพีเอช 9 ส่งผลให้เกิดประจุลบบนพื้นผิวสารดูดซับ แต่ในสารละลายพีเอช 5 และ 7 จะมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกมากขึ้น ซึ่ง D-Sludge และ PAC ที่สารละลายพีเอช 7 จะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวสารดูดซับเล็กน้อยเนื่องจากมีค่า pH_{pzc} ใกล้เคียงพีเอช 7

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารดูดซับพบว่า B-Sludge มีหมู่กรดลดลงซึ่งเป็นไปตามค่า pH_{pzc} ของสารดูดซับ ส่วน A-Sludge พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเพิ่มขึ้น

(หมูกรด) ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH_{PZC} ของ A-Sludge ที่มีค่าเป็นกรด และจากงานวิจัยของ Thuy (2006) ระบุว่า การปรับปรุงถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) ด้วยกรด (HNO_3) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพวกหมูกรด และการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยด่าง ($NaOH$) ทำให้เกิดการลดลงของหมูไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิก คาร์บอนิวต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH_{PZC} ของสารดูดซับ ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างส่งผลต่อค่า pH_{PZC} ของสารดูดซับทั้งในประเภทสัจและถ่านกัมมันต์ในเชิงเดียวกัน



ภาพที่ 4.2 ความหนาแน่นของประจุที่ค่าพีเอชต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่า pH_{PZC} และประจุของสารดูดซับในสารละลายพีเอชต่างๆ

สารดูดซับ	pH_{PZC}	ประจุบนพื้นผิว		
		พีเอช 5	พีเอช 7	พีเอช 9
สัจที่ไม่ถูกกระตุ้น (D-Sludge)	6.70	+	กลาง,-	-
สัจที่กระตุ้นด้วยกรด (A-Sludge)	2.72	-	-	-
สัจที่กระตุ้นด้วยด่าง (B-Sludge)	7.68	+	กลาง,+	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (PAC)	7.08	+	กลาง	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด (A-PAC)	4.26	-	-	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง (B-PAC)	8.29	+	+	-

4.1.4 ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Elemental Analysis)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารดูดซับ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge

สารดูดซับ	ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารดูดซับ		
	คาร์บอน (%)	ไฮโดรเจน (%)	ไนโตรเจน (%)
D-Sludge	17.85	3.163	2.149
A-Sludge	10.07	1.718	0.576
B-Sludge	16.49	3.163	2.660

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.4 กล่าวได้ว่าองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน มีปริมาณน้อยลงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดแต่ในการกระตุ้นด้วยด่างไม่พบการลดลงของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งองค์ประกอบของธาตุทั้ง 3 ชนิดที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันและขนาดพื้นที่ผิวรูพรุนของสารดูดซับ โดย A-Sludge มีปริมาณธาตุที่ลดลงมากสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่ลดลงจาก D-Sludge มาก และมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ส่วน B-Sludge มีปริมาณธาตุที่ลดลงเล็กน้อยสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ D-Sludge

4.2 การดูดซับสีย้อม

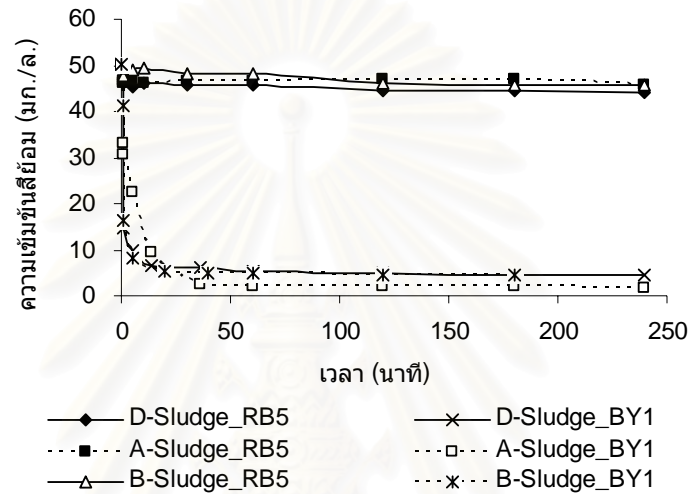
ในส่วนนี้จะนำสารดูดซับที่เตรียมไว้ทั้ง 6 ชนิด (ดังที่กล่าวถึงข้างต้น) มาศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5) และสีย้อมเบสิก (BY1) โดยทำการศึกษาจลนศาสตร์ และไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม ศึกษาปัจจัยทางเคมี (การกระตุ้นสารดูดซับด้วยกรดและด่าง) และทางกายภาพ (อุณหภูมิและค่าพีเอช) ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยการทำการศึกษาแบบทีละเท (Batch test)

4.2.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมบนพื้นผิวของสารดูดซับ

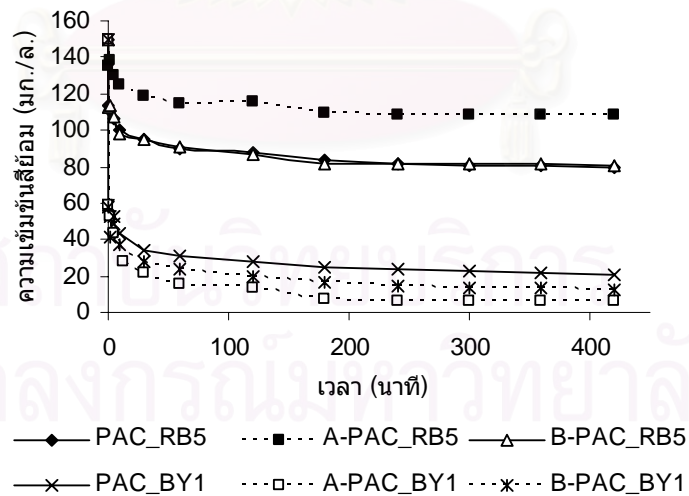
ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสีย้อม RB5 และสีย้อม BY1 บนพื้นผิวสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด เพื่อทราบเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล และนำเวลาที่ได้ใช้ในการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับต่อไป โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาดังนี้คือ พีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 7 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผล

การศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม RB5 และสีย้อม BY1 ของสารดูดซับประเภทสลิคเจ้เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที และสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 360 นาที แสดงดังภาพที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ทั้งนี้ ความแตกต่างระหว่างเวลาในการเข้าสู่สมดุลอาจสอดคล้องกับค่าคงที่ (k) ที่ได้จากการหาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวต่อไป

(ก)



(ข)

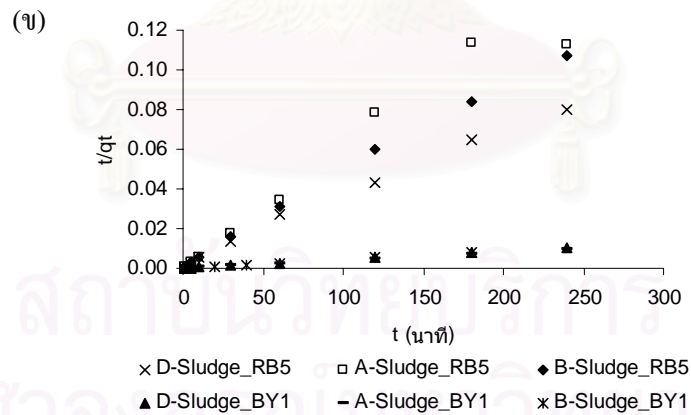
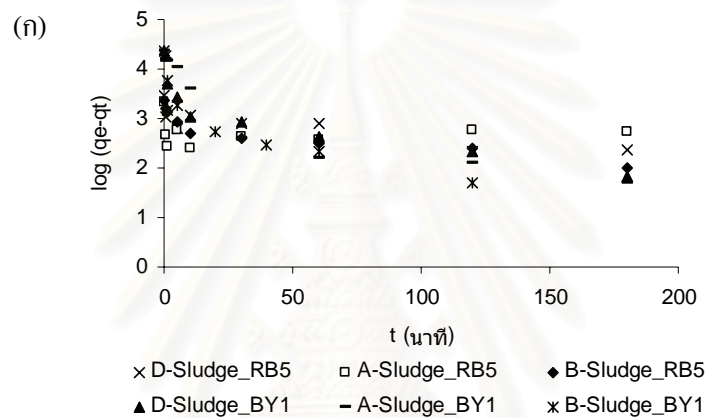


ภาพที่ 4.3 จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม RB5 และ BY1 บนพื้นผิวสารดูดซับ

ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

(ก) สารดูดซับประเภทสลิคเจ้, (ข) สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

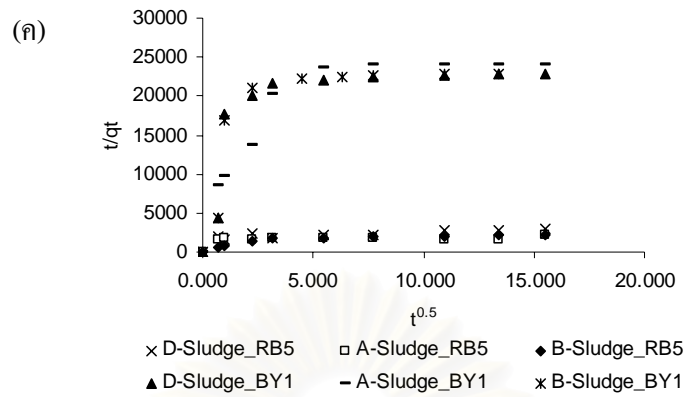
จากข้อมูลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับ โดยทำการเปรียบเทียบจากสมการอันดับปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) และปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) โดยค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.6 และกราฟของปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด แสดงดังภาพที่ 4.4 โดยข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับสี่ข้อม แสดงดังภาคผนวก ก.



ภาพที่ 4.4 อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับสี่ข้อมด้วยสารดูดซับประเภทสไลด์จ์

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

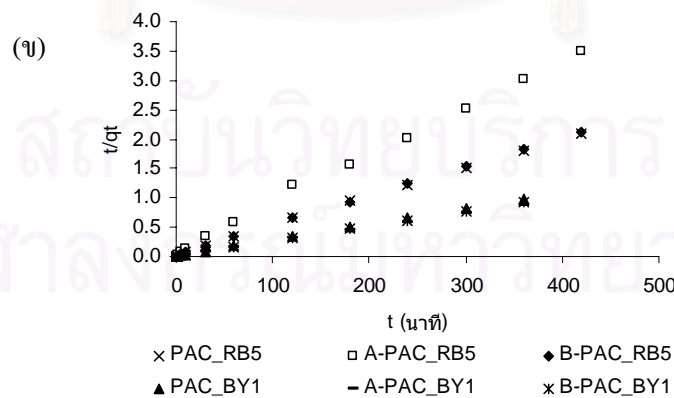
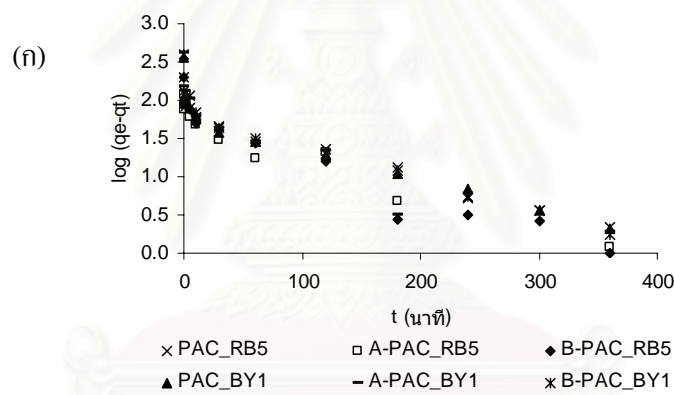
(ค) ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค



ภาพที่ 4.4 (ต่อ) อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับสี่ข้อมด้วยสารดูดซับประเภทสลัดจ์

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

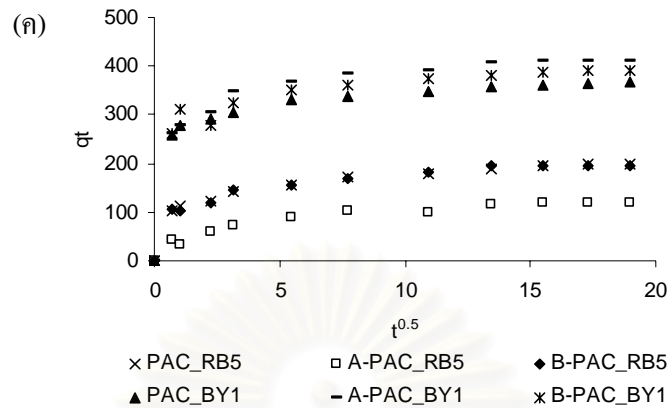
(ค) ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค



ภาพที่ 4.5 อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับสี่ข้อมด้วยสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

(ค) ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค



ภาพที่ 4.5 (ต่อ) อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

(ค) ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า R^2 จากทั้ง 3 สมการ พบว่าค่า R^2 ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีค่าอยู่ในช่วง 0.9623-1.0000 เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด ซึ่งแสดงว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม RB5 และสีย้อม BY1 โดยสารดูดซับทั้ง 6 ชนิดนั้นมีลักษณะเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ที่เกิดจากประจุของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ (Gulnaz และคณะ, 2006) โดยที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับจำนวนของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารตัวกลางดูดซับ และจำนวนสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยมีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (k_2) ของการดูดซับน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสีย้อมทั้ง 2 ชนิดด้วย D-sludge A-sludge และ B-sludge มีค่าอยู่ในช่วง 0.00002-0.00010 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ค่า k_2 ของการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดด้วยสารดูดซับ PAC A-PAC และ B-PAC มีค่าอยู่ในช่วง 0.00085-0.00109 กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที โดยที่ $k_2 q_c^2$ ของสารดูดซับประเภทสัจจะจะมีค่าอยู่ในช่วง 416.67-26295.03 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที ซึ่งสูงกว่าสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ที่มีค่า $k_2 q_c^2$ อยู่ในช่วง 15.23-162.60 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที ซึ่งค่า $k_2 q_c^2$ สูงแสดงถึงปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับในสารดูดซับ 1 กรัมในเวลา 1 นาที ซึ่งค่า $k_2 q_c^2$ ที่ได้ในกรณีของสารดูดซับประเภทสัจจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ แสดงว่าผลลัพธ์ดังกล่าวว่าสอดคล้องกับระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของกระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทสัจจะที่สั้นกว่าที่ได้จากการใช้สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)

สารดูดซับ	สี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)						
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน		ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค	
	R^2	k_1 (นาที ⁻¹)	R^2	k_2 (ก./มก. นาที)	$k_2 q_c^2$ (มก./ก. นาที)	R^2	k_p (มก./ก. นาที ^{0.5})
D-Sludge	0.7296	0.0111	0.9932	0.00005	475.8642	0.5008	344.90
A-Sludge	0.0003	-0.0002	0.9623	0.00010	416.6667	-2.3077	164.88
B-Sludge	0.8302	0.0235	0.9971	0.00010	480.7692	0.1026	186.07
PAC	0.9461	0.0108	0.9988	0.00089	35.84229	0.5106	19.76
A-PAC	0.9147	0.0140	0.9973	0.00104	15.23229	0.3563	8.03
B-PAC	0.9253	0.0129	0.9993	0.00109	42.7899	-0.4609	13.65

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับสี่ข้อมเบสิก (BY1)

สารดูดซับ	สี่ข้อมเบสิก (BY1)						
	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน		ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			ปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค	
	R^2	k_1 (นาที ⁻¹)	R^2	k_2 (ก./มก. นาที)	$k_2 q_c^2$ (มก./ก. นาที)	R^2	k_p (มก./ก. นาที ^{0.5})
D-Sludge	0.7496	0.0265	1.0000	0.00004	21218.09	0.5456	2997.50
A-Sludge	0.7671	0.0334	0.9999	0.00002	14363.69	0.0112	2143.30
B-Sludge	0.7571	0.0458	0.9999	0.00005	26295.03	-0.2297	2436.10
PAC	0.9746	0.0101	0.9998	0.00095	129.1322	-0.1872	38.11
A-PAC	0.9472	0.0214	0.9998	0.00095	162.5963	-1.3886	27.04
B-PAC	0.9102	0.0120	0.9998	0.00085	131.5789	-1.6277	25.66

4.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อม

ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมโดยเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับที่ได้จากการทดลองกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับสี่ข้อมที่เกิดขึ้น โดยนำผลการดูดซับสี่ข้อมของสารดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่าง มาวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับ ในส่วนนี้ ค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของไอโซเทอมการดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.7

ผลการศึกษาพบว่าไอโซเทอมการดูดซับของ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge ในการดูดซับสี่ข้อม RB5 และ BY1 สามารถอธิบายได้ทั้งไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากทั้ง 2 ไอโซเทอมให้ค่า R^2 สูงและใกล้เคียงกัน โดยสำหรับการดูดซับสี่ข้อม RB5 พบว่า D-Sludge และ B-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9938 และ 0.9961 ตามลำดับ และในส่วนของ A-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9811 สำหรับไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อม BY1 ปรากฏว่า D-Sludge และ A-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9640 และ 0.9574 ตามลำดับ ส่วน B-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8982 ในส่วนไอโซเทอมการดูดซับของ PAC A-PAC และ B-PAC ในการดูดซับสี่ข้อม RB5 ให้ค่า R^2 ต่ำทั้ง 2 ไอโซเทอม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1926-0.5523 และสำหรับไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อม BY1 พบว่า PAC และ A-PAC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9856 และ 0.9119 ตามลำดับ ส่วน B-PAC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9204

สำหรับการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$$

ทั้งนี้ ค่า K เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมทั้ง 2 ชนิด โดย B-PAC มีค่าความสามารถในการดูดซับสี่ข้อม RB5 สูงสุด มีค่า K สูงสุดเช่นกัน คือ 240.27 ลิตรต่อกรัม เช่นเดียวกับ A-Sludge ที่ดูดซับสี่ข้อม BY1 แต่สำหรับการดูดซับสี่ข้อม BY1 ด้วย B-PAC มีค่า K สูงสุดคือ 281.25 ลิตรต่อกรัม ซึ่งความเป็นจริงแล้ว A-PAC มีความสามารถในการดูดซับสี่ข้อม BY1 สูงสุด แต่มีค่า K น้อยกว่า เช่นเดียวกับการดูดซับสี่ข้อม RB5 ด้วย D-Sludge สำหรับค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการพบว่าสารดูดซับทั้ง 6 ชนิดให้ค่า $1/n$ ต่ำกว่า 1 โดยการดูดซับสี่ข้อม RB5 ด้วย B-PAC มีค่า $1/n$ ต่ำที่สุด เช่นเดียวกับการดูดซับสี่ข้อม BY1 ด้วย PAC มีค่า $1/n$ ต่ำที่สุด โดยถ้ามีค่าความชันมากจะเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดการดูดซับได้น้อยที่

ความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไป เมื่อเส้นไอโซเทอมมีความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (Continuous Treatment) ส่วนเส้นไอโซเทอมความชันน้อยจะเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดแบบทีละเท (Batch Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

สำหรับการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์คำนวณได้จากสมการนี้

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right)\left(\frac{1}{bq_m}\right)$$

โดยมีค่า q_m ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อค่า q_m มีค่ามาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูง และค่า b เป็นค่าคงที่ของไอโซเทอม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า b ของสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าสารดูดซับประเภทสไลด์จ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า q_m แต่เมื่อพิจารณาสารดูดซับแต่ละชนิดพบว่าค่า b ไม่สัมพันธ์กับค่า q_m เสมอไปโดยไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์บอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว และเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ส่วนไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนคลิชเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น และเป็นทางกายภาพ (Gulnaz และคณะ, 2006) ข้อมูลไอโซเทอมทั้ง 2 ชนิดแสดงดังภาคผนวก ข.

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม BY1 ด้วย PAC และ A-PAC เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี ส่วน B-PAC ดูดซับสีย้อม BY1 แบบหลายชั้น และเป็นทางกายภาพ สำหรับ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge อธิบายได้ทั้ง 2 ไอโซเทอมโดย D-Sludge ดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ ส่วน A-Sludge ดูดซับสีย้อม RB5 ทางกายภาพมากกว่าทางเคมี แต่ดูดซับสีย้อม BY1 ทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ เนื่องจากสีย้อม BY1 มีประจุเป็นบวกจึงถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวที่เป็นลบของ A-Sludge ได้ดี ซึ่งในขณะที่สีย้อม RB5 มีประจุลบจึงถูกดูดซับด้วยแรงทางกายภาพเป็นหลัก ส่วน B-Sludge พบว่าดูดซับสีย้อม RB5 ทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ เนื่องจากสีย้อม RB5 มีประจุเป็นลบจึงถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวที่เป็นบวกของ B-Sludge ได้ดี แต่ดูดซับสีย้อม BY1 ทางกายภาพมากกว่าทางเคมี เนื่องจากสีย้อม BY1 มีประจุบวกจึงถูกดูดซับด้วยแรงทางกายภาพเป็นหลัก โดยผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

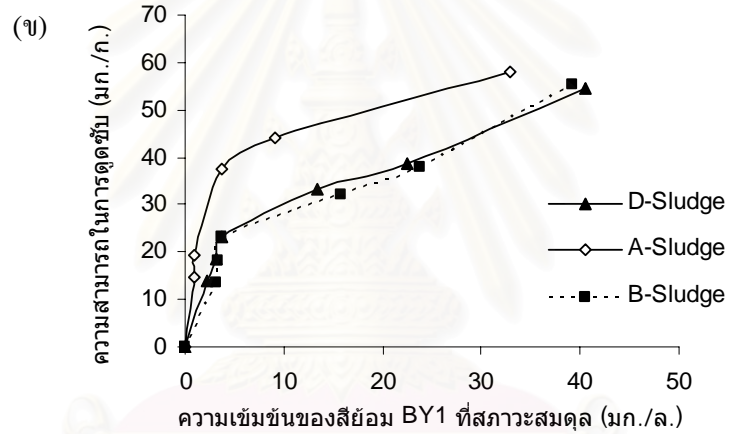
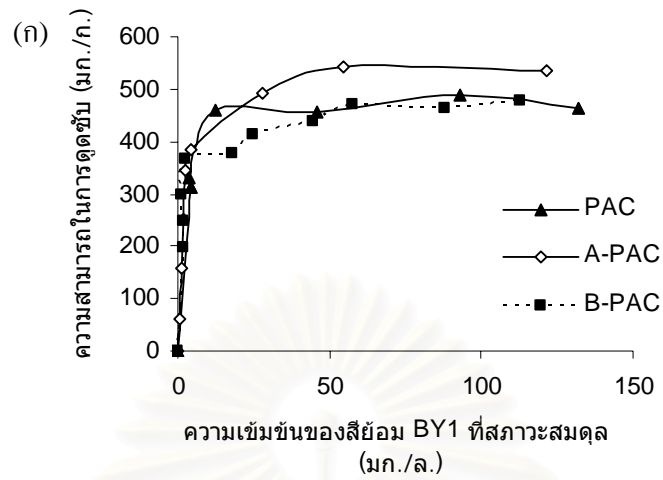
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และฟรุนคลิช

สารดูดซับ	สี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)					
	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนคลิช		
	R^2	b (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n
D-Sludge	0.9938	0.0351	4.59	0.9885	0.7403	0.3410
A-Sludge	0.9719	0.0241	4.31	0.9811	0.4055	0.4369
B-Sludge	0.9961	0.0209	6.35	0.9538	0.5632	0.4379
PAC	0.4930	0.2708	256.41	0.5523	187.3268	0.0616
A-PAC	0.3638	0.1424	243.90	0.2458	165.6151	0.0660
B-PAC	0.4510	0.5000	270.27	0.1926	240.2702	0.0206
สารดูดซับ	สี่ข้อมเบสิก (BY1)					
	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนคลิช		
	R^2	b (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n
D-Sludge	0.9640	0.1627	54.30	0.9582	11.34	0.4164
A-Sludge	0.9574	0.4074	60.61	0.9173	18.81	0.3591
B-Sludge	0.8210	0.1363	54.31	0.8982	10.31	0.4348
PAC	0.9119	0.4637	490.68	0.7867	281.25	0.1196
A-PAC	0.9856	1.000	552.79	0.8725	273.78	0.1608
B-PAC	0.9158	1.6923	454.55	0.9204	316.37	0.1396

4.2.3 ผลการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม

ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อมของสารดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่าง โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาดังนี้คือ พีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 7 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพิจารณาจากค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ได้จากค่า q_m จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ จากผลการศึกษาพบว่าสีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-PAC ตามด้วย B-PAC และ PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 552.8 490.7 และ 454.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ก) ส่วนของสารดูดซับประเภทสไลด์จ์พบว่าสีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-Sludge ตามมาด้วย B-Sludge และ D-Sludge โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 60.6 54.3 และ 54.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.6 (ข) สำหรับสีย้อม RB5 พบว่าดูดซับได้ดีด้วย B-PAC ตามด้วย PAC และ A-PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 270.3 256.4 และ 243.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.6 (ค) ส่วนของสไลด์จ์พบว่าสีย้อม RB5 ถูกดูดซับได้ดีด้วย B-Sludge ตามด้วย D-Sludge และ A-Sludge โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 6.4 4.6 และ 4.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.6 (ง) ซึ่งแตกต่างงานวิจัยของ Gulaz (2006) ที่ระบุว่าสไลด์จ์แห่งมีความสามารถดูดซับสีย้อม RB5 ประมาณ 75 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งอาจเกิดจากสไลด์จ์ที่ใช้เป็นสารดูดซับมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

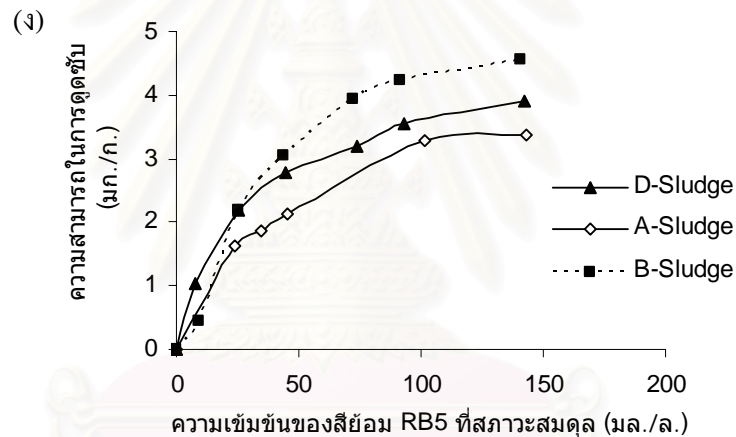
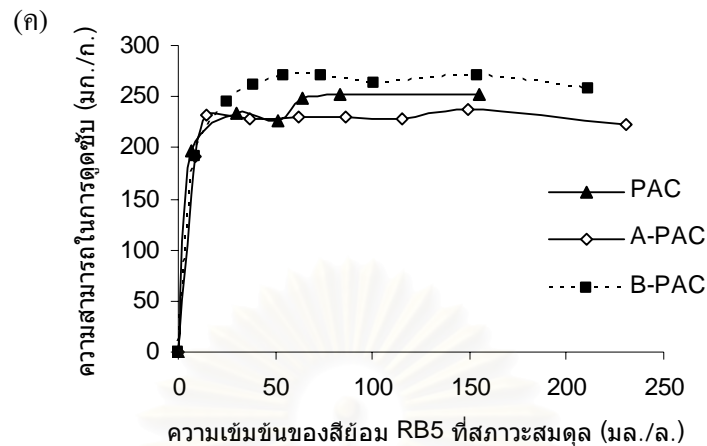
ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว กล่าวได้ว่าสอดคล้องกับผลของค่า pH_{PZC} คือ A-Sludge และ A-PAC มีค่า pH_{PZC} น้อยกว่า พีเอช 7 ซึ่งส่งผลให้มีประจุลบที่พื้นผิวสารดูดซับ (Thuy; 2006) จึงสามารถดูดซับสีย้อม BY1 ที่มีประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้าม B-Sludge และ B-PAC มี pH_{PZC} มากกว่าพีเอช 7 ซึ่งมีความสามารถดูดซับสีย้อม RB5 ที่มีประจุเป็นลบได้ดี แต่สังเกตได้ว่าในกรณีการดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทสไลด์จ์พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากพื้นที่ผิวจำเพาะของสไลด์จ์ที่มีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 4.6 ผลการดูดซับสีย้อมของสารดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่าง

(ก) และ (ข) คือสีย้อมเบสิก (BY1) (ค) และ (ง) คือสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.6 (ต่อ) ผลการดูดซับสีย้อมของสารดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่าง

(ก) และ (ข) คือสีย้อมเบสิก (BY1), (ค) และ (ง) คือสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)

4.2.4 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลกระทบของค่าพีเอชต่อการดูดซับสีย้อมของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด ดำเนินการโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมที่ 5 7 และ 9 และควบคุมปัจจัยในการศึกษาค้างนี้คือค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9

จากผลการทดลองพบว่า PAC และ B-PAC ดูดซับสีย้อม RB5 ได้ดีที่สุดที่พีเอช 9 ตามด้วยพีเอช 7 และ 5 ตามลำดับ ส่วน D-Sludge A-Sludge B-Sludge และ A-PAC สามารถดูดซับสีย้อม RB5 ได้ดีที่สุดที่พีเอช 7 ตามด้วยพีเอช 9 และ 5 ตามลำดับ โดยสารดูดซับ D-Sludge A-Sludge

และB-Sludge มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสีย้อม RB5 ทั้ง 3 พีเอชที่ต่ำมากและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแตกต่างงานวิจัยของ Gulaz (2006) ที่ระบุว่าสัณดุคั้แห่งดูดซับสีย้อม RB5 ได้ดีที่พีเอชต่ำๆ สำหรับการดูดซับสีย้อม BY1 พบว่าสารดูดซับทุกชนิดดูดซับได้ดีที่พีเอช 9 รองลงมาคือ พีเอช 7 และ 5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับประเภทสัณดุคั้มีค่าน้อยกว่าสารดูดซับประเภทถ่านกั้มันต์อยู่มากเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีความแตกต่างกันถึง 40-120 เท่า

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)

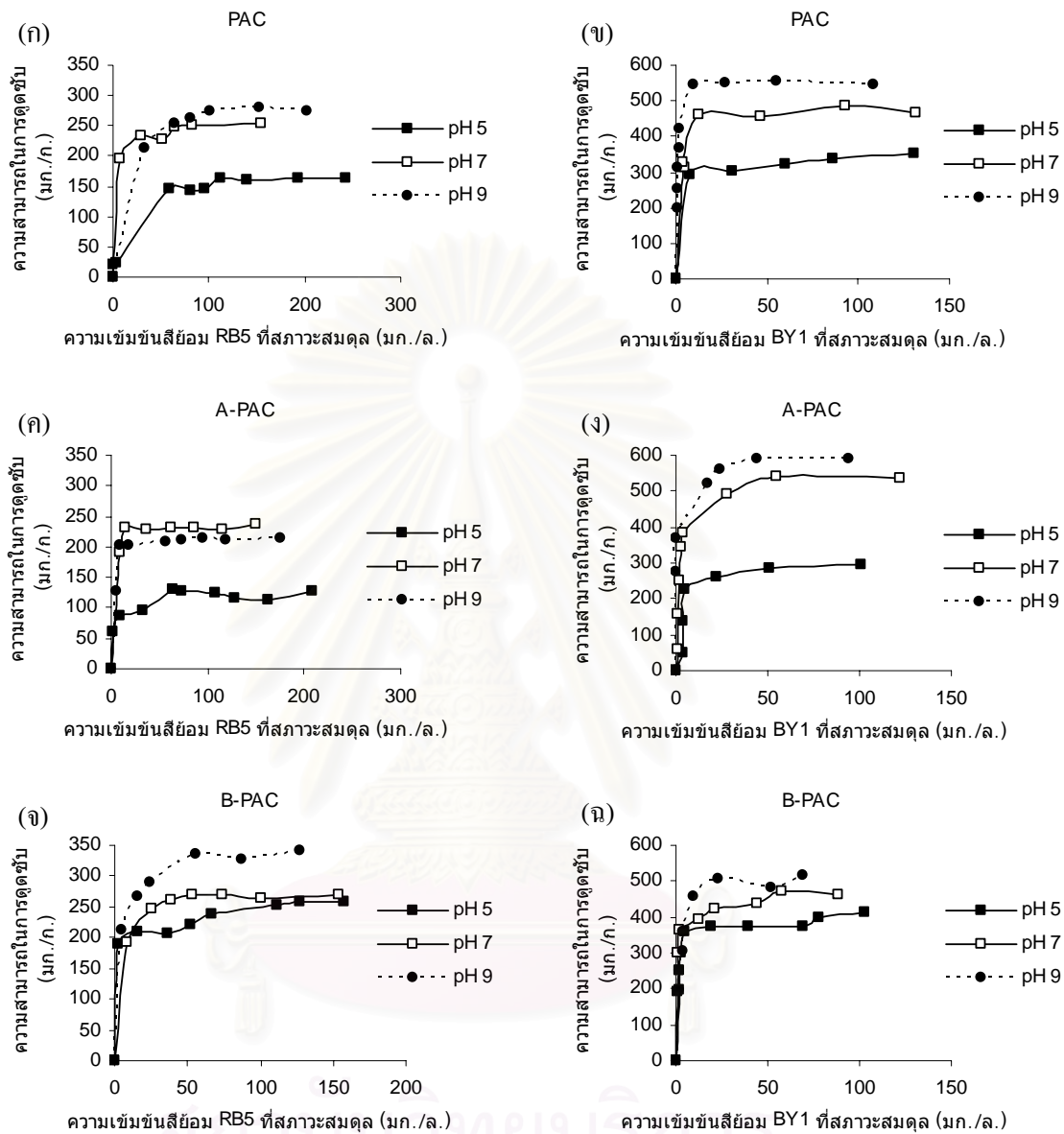
สารดูดซับ	พีเอช	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มก./ก.)*
D-Sludge	5.00	0.8
	7.00	4.6
	9.00	3.8
A-Sludge	5.00	1.3
	7.00	4.3
	9.00	3.9
B-Sludge	5.00	1.7
	7.00	6.3
	9.00	5.5
PAC	5.00	172.4
	7.00	256.4
	9.00	294.1
A-PAC	5.00	123.5
	7.00	243.9
	9.00	227.3
B-PAC	5.00	256.4
	7.00	270.3
	9.00	333.3

หมายเหตุ * ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดจากค่า q_m ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

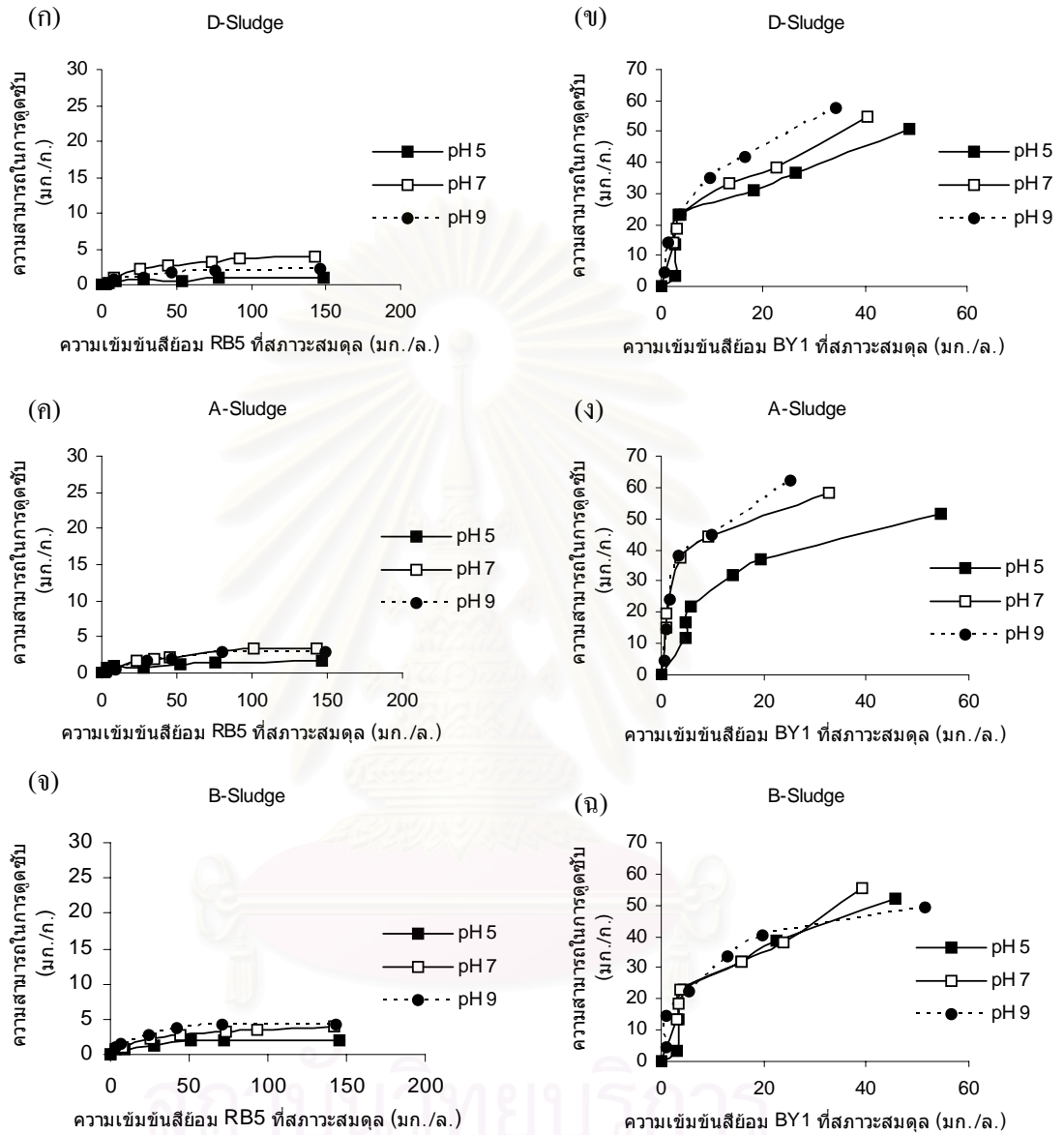
ตารางที่ 4.9 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมเบสิก (BY1)

สารดูดซับ	พีเอช	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มก./ก.)*
D-Sludge	5.00	47.6
	7.00	54.3
	9.00	61.4
A-Sludge	5.00	55.9
	7.00	60.6
	9.00	63.3
B-Sludge	5.00	49.0
	7.00	54.3
	9.00	57.1
PAC	5.00	333.3
	7.00	490.7
	9.00	571.4
A-PAC	5.00	322.6
	7.00	552.8
	9.00	618.4
B-PAC	5.00	400.0
	7.00	454.5
	9.00	522.2

หมายเหตุ * ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดจากค่า q_m ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์



ภาพที่ 4.7 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของ PAC A-PAC และ B-PAC ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์



ภาพที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

กระบวนการดูดซับสี่ข้อมทั้ง 2 ชนิดของสารดูดซับสามารถสรุปได้ดังนี้

- PAC ดูดซับสี่ข้อม RB5 และ สี่ข้อม BY1 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลัก แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแรงที่ทำให้โมเลกุลของสี่ข้อมเข้าไปยึดกับ PAC เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ สี่ข้อม RB5 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าสี่ข้อม BY1 เพราะฉะนั้นโมเลกุลของสี่ข้อม RB5 จึงถูกดูดซับได้บนบริเวณพื้นผิวภายนอกของ PAC ซึ่งสี่ข้อม BY1 มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กจึงถูกดูดซับในรูพรุนของ PAC ได้มากกว่า ในการดูดซับสี่ข้อม RB5 นอกจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลักยังมีแรงจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้ที่พีเอช 5 7 และ 9 มีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ก) โดยที่พีเอช 9 PAC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามด้วย พีเอช 7 และ 5 ตามลำดับ เนื่องจากที่พีเอช 5 เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายจึงส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยากับสี่ข้อม RB5 ที่มีประจุเป็นลบได้ง่าย สี่ข้อม RB5 จึงถูกดูดซับบนพื้นผิวของ PAC ได้น้อยลง รวมทั้งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว PAC เกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ง่าย ซึ่งขัดขวางการเกิดปฏิกิริยากับสี่ข้อม RB5 และในสารละลายที่พีเอช 9 สภาพความเป็นด่างจะเกิดพันธะโควาเลนต์ โดยสี่ข้อม RB5 สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของ PAC (วราญา ประทุมแก้ว, 2543) สี่ข้อม RB5 จึงถูกดูดซับได้สูง ส่วนการดูดซับสี่ข้อม BY1 ในสารละลายทั้ง 3 พีเอชมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับแรงดึงดูดระหว่างประจุของสี่ข้อม BY1 และ PAC คือที่สารละลายพีเอชสูงจะมีประจุบนพื้นผิวเป็นลบมากขึ้นจึงดูดซับสี่ข้อม BY1 ที่มีประจุเป็นบวกดี

- A-PAC ดูดซับสี่ข้อม BY1 และ สี่ข้อม RB5 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลัก โดยการดูดซับสี่ข้อม BY1 มีแรงดึงดูดระหว่างประจุของสี่ข้อมและพื้นผิวสารดูดซับเป็นแรงรอง เนื่องจาก A-PAC ดูดซับสี่ข้อม BY1 ได้ดีที่สุดในสารละลายพีเอช 9 A-PAC เมื่ออยู่ในสารละลายที่พีเอช 9 ประจุบนพื้นผิวเป็นลบมากขึ้นจึงดึงดูดสี่ข้อม BY1 ที่มีประจุเป็นบวกได้ ส่วนการดูดซับสี่ข้อม RB5 พบว่าเกิดขึ้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก และเกิดด้วยแรงจากพันธะไฮโดรเจนเป็นแรงรอง เช่นเดียวกับ PAC แต่พบว่าที่สารละลายพีเอช 7 มีความสามารถในการดูดซับสี่ข้อม RB5 ได้มากกว่าที่สารละลายพีเอช 9 ซึ่งอาจจะเกิดจากแรงระหว่างประจุด้วยเนื่องจากที่พีเอช 9 ส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวของ A-PAC มีประจุเป็นลบมากขึ้นกว่าที่พีเอช 7 จึงเกิดการผลักกันกับสี่ข้อม RB5 ที่มีประจุเป็นลบเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ค) และ (ง)

- B-PAC ดูดซับสี่ข้อม BY1 และ สี่ข้อม RB5 ด้วยแรงดูดซับเช่นเดียวกับ PAC เนื่องจากมีแนวโน้มในการดูดซับไปในทางเดียวกันโดยผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 4.6 (จ) และ (ฉ)

- D-Sludge ดูดซับสี่ข้อม RB5 ได้ต่ำมากดังแสดงในตารางที่ 4.8 และที่สารละลายพีเอชต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก) ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับเป็นผลจากหลายๆ แรงรวมกันได้แก่แรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะ

ไฮโดรเจน และแรงดึงดูระหว่างประจุ ในส่วนการดูดซับสีข้อม BY1 พบว่าในสารละลายทั้ง 3 พิเอชให้ค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก และด้วยความแตกต่างของค่าพีเอชจึงเกิดแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างประจุของสีข้อมและพื้นผิวสารดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการดูดซับที่ได้รับจากการทดลอง

- A-Sludge และ B-Sludge ดูดซับสีข้อม RB5 และ BY1 ด้วยแรงดูดซับเช่นเดียวกับ D-sludge เนื่องจากมีแนวโน้มในการดูดซับไปในทางเดียวกัน

ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาในกรณีของสีข้อม RB5 พบว่าถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วย B-PAC ที่พีเอช 9 และในส่วนสลัดจ์ พบว่า B-Sludge ดูดซับได้ดีที่พีเอช 7 โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 333.3 และ 6.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.7 (จ) และภาพที่ 4.8 (จ) ส่วนสีข้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-PAC ที่พีเอช 9 และในส่วนสลัดจ์พบว่า A-Sludge ดูดซับได้ดีที่พีเอช 9 โดยที่พีเอช 9 สีข้อมเบสิกสลายตัวในสารละลายต่างได้สารไม่มีสีที่ละลายในน้ำได้เล็กน้อย เมื่อทิ้งไว้สักพักจะเกิดการตกตะกอน (นริยญา กวินันท์วงศ์, 2542) จึงส่งผลให้สีข้อม BY1 มีแนวโน้มที่จะแยกออกจากน้ำสูง ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับจึงมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่พีเอช 9 โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ A-PAC และ A-Sludge เท่ากับ 618.4 และ 63.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.7 (ง) และภาพที่ 4.8 (ง)

ตารางที่ 4.10 แรงที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมของสารดูดซับ

สารดูดซับ	สีข้อมเบสิก (BY1)		สีข้อมรีแอกทีฟ (RB5)	
	แรงหลัก	แรงเสริม	แรงหลัก	แรงเสริม
D-Sludge	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ	
A-Sludge	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ	
B-Sludge	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ	
PAC	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์	พันธะไฮโดรเจน พันธะโควาเลนต์
A-PAC	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์	พันธะไฮโดรเจน
B-PAC	แวนเดอร์วาลส์	แรงระหว่างประจุ	แวนเดอร์วาลส์	พันธะไฮโดรเจน พันธะโควาเลนต์

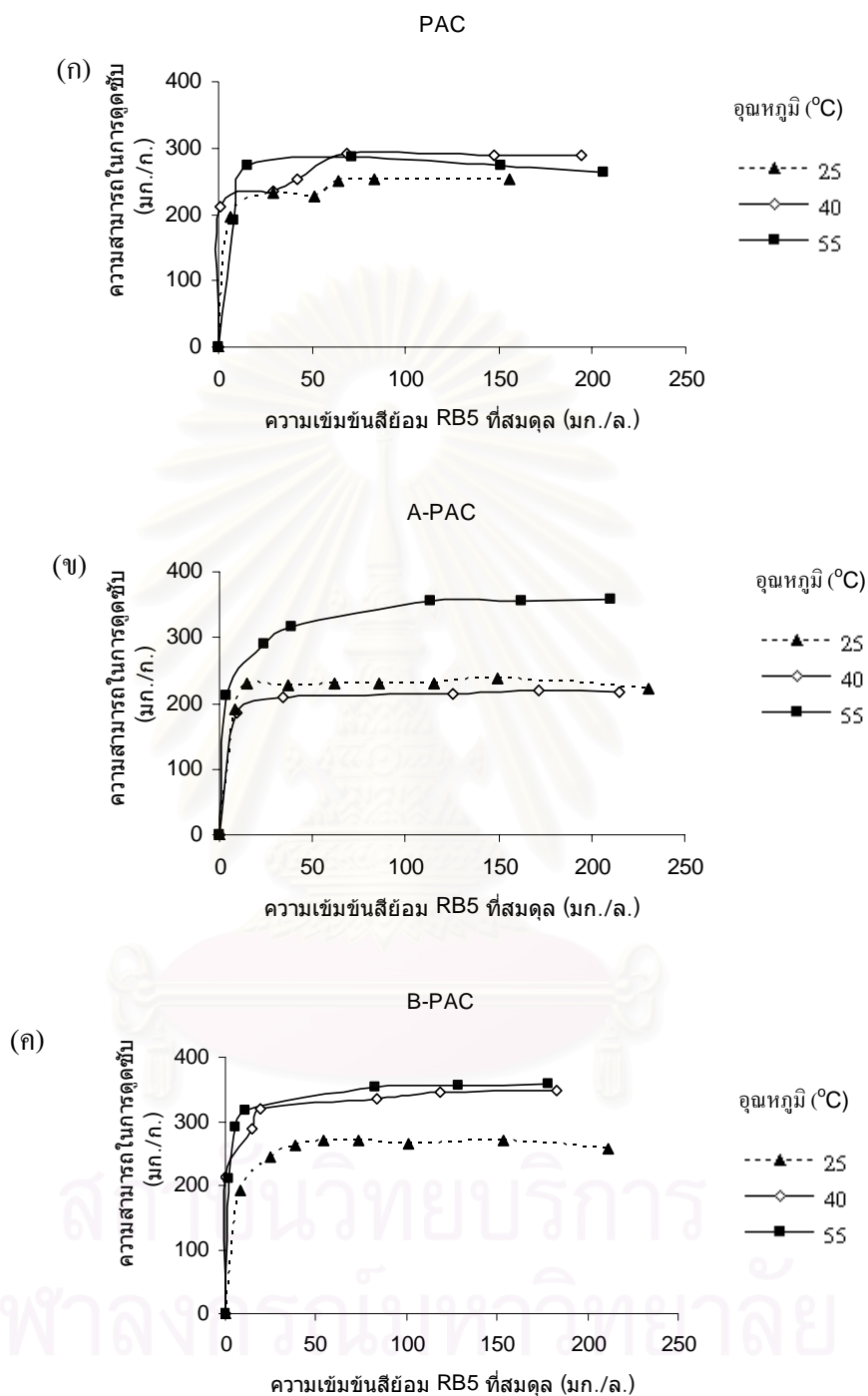
4.2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำตัวอย่างปนเปื้อนสีย้อม RB5 และ BY1 โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาดังนี้คือ พีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 7 และค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยปรับเปลี่ยนการควบคุมอุณหภูมิ 3 ค่า คือ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.9 และ 4.10

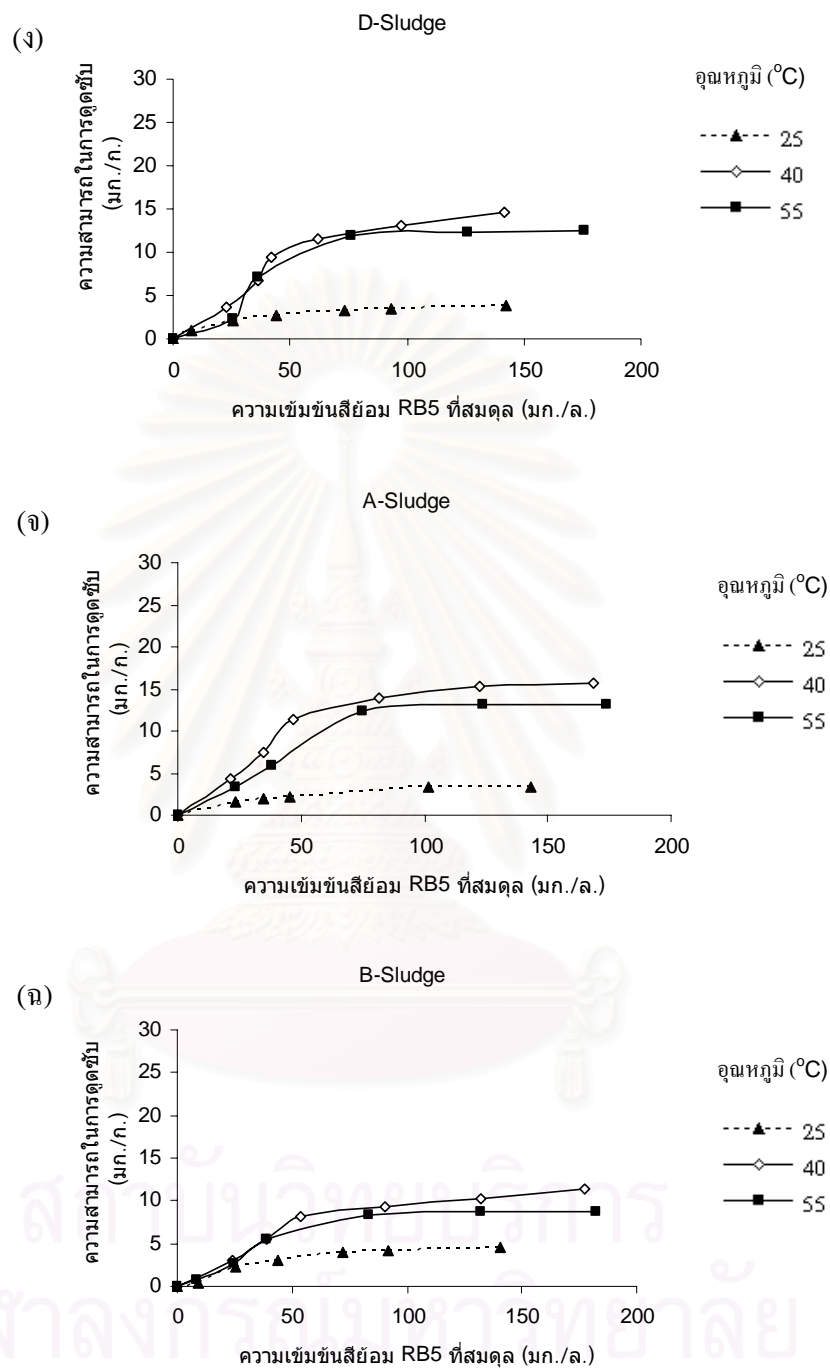
ตารางที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม

สารดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด* (มก./ก.)					
	สีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)			สีย้อมเบสิก (BY1)		
	25°ซ	40°ซ	55°ซ	25°ซ	40°ซ	55°ซ
D-Sludge	4.6	18.6	13.0	54.3	73.5	74.1
A-Sludge	4.3	18.8	13.8	60.6	84.7	96.5
B-Sludge	6.3	12.9	9.3	54.3	86.2	64.5
PAC	256.4	312.5	294.1	490.7	476.2	597.0
A-PAC	243.9	217.4	256.4	552.8	500.0	572.7
B-PAC	270.3	353.4	359.4	454.5	526.3	607.9

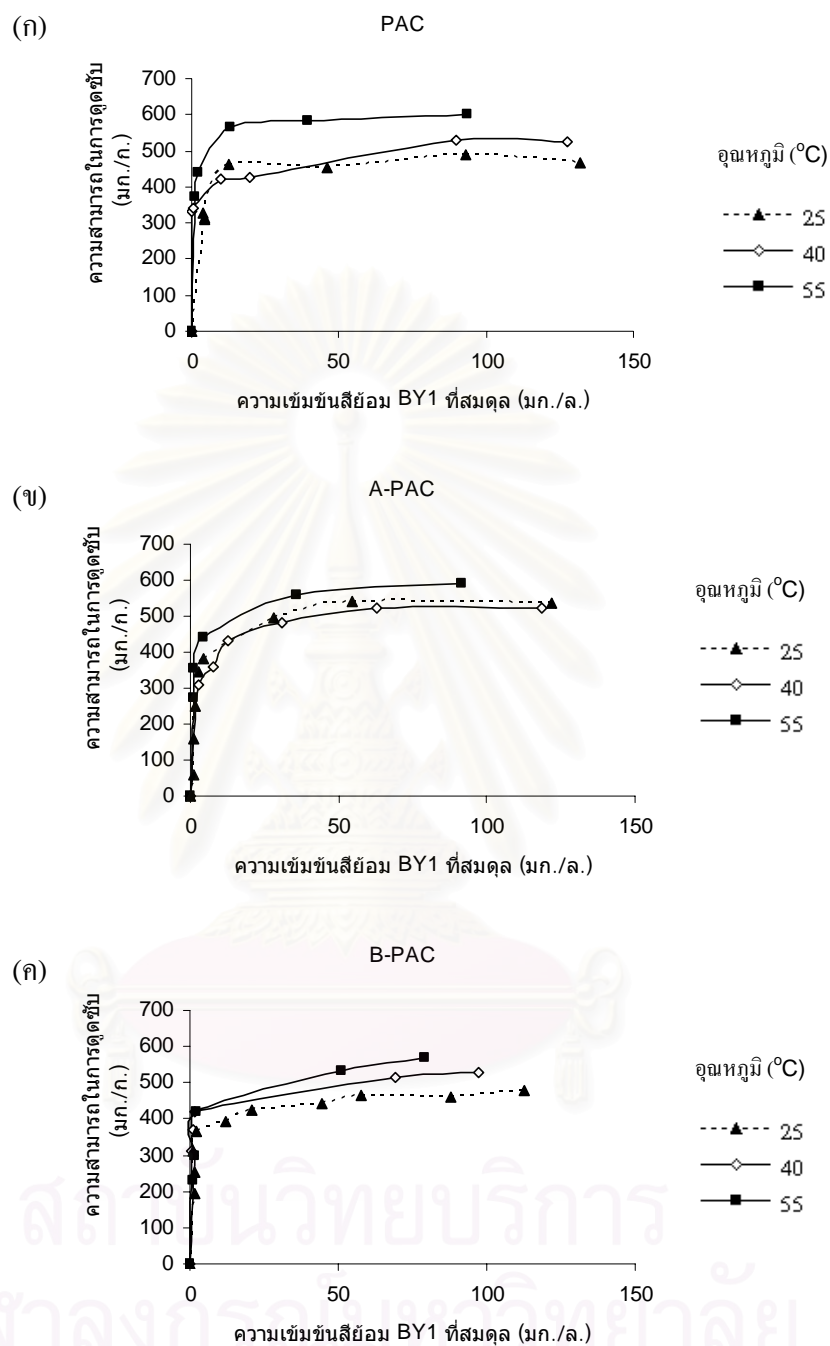
หมายเหตุ * ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดจากค่า q_m ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์



ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีเอกทีฟ (RB5) ที่พีเอช 7 และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

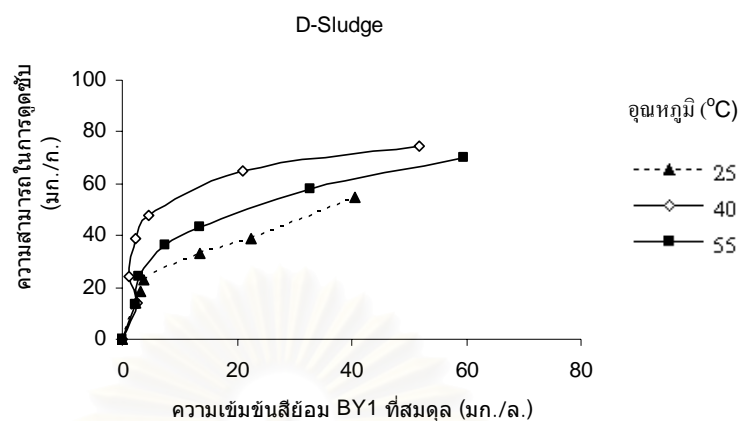


ภาพที่ 4.9 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5) ที่พีเอช 7 และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

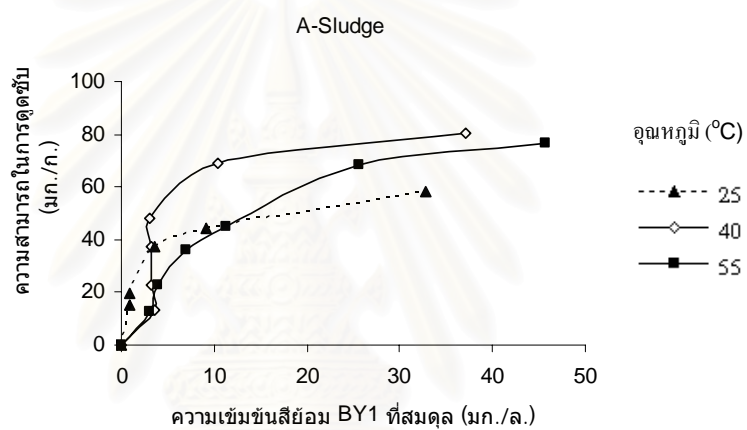


ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบสิก (BY1) ที่พีเอช 7 และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

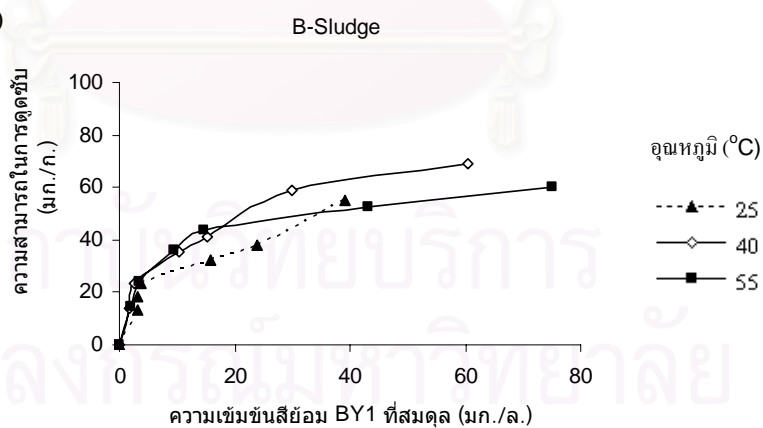
(ง)



(จ)



(ฉ)



ภาพที่ 4.10 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบติก (BY1) ที่พีเอช 7 และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.9 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 โดยสารดูดซับทั้ง 6 ชนิดที่แสดงในภาพที่ 4.9 กล่าวได้ว่า สารดูดซับ D-Sludge A-Sludge B-Sludge และ PAC สามารถดูดซับสีย้อม RB5 ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 18.6 18.8 12.9 และ 312.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วน A-PAC และ B-PAC ดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 256.4 และ 359.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม BY1 พบว่า B-Sludge ดูดซับสีย้อม BY1 ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 86.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และสำหรับ D-Sludge A-Sludge PAC A-PAC และ B-PAC ดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 74.1 96.5 597.0 572.7 และ 607.9 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการคำนวณสมการเทอร์โมไดนามิกส์ดังสมการต่อไปนี้

$$K_c = \frac{q_c}{C_c}$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}$$

T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน, K)
ΔS°	=	ค่าความต่างของเอนโทรปี (Entropy)
ΔH°	=	ค่าความต่างของเอนทาลปี (Enthalpy)
ΔG°	=	ค่าความต่างของพลังงานอิสระ (Free Energy)
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส 8.31 J/K.mol

จากผลการศึกษาพบว่าค่า ΔH° ส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นระบบดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตามตารางที่ 4.11 ซึ่งเห็นได้ว่า อุณหภูมิมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับ โดยสารดูดซับทุกชนิดดูดซับสีย้อมได้ดีที่อุณหภูมิสูง (ที่ 40 และ 50 องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ว่าเป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic) คือกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีอุณหภูมิในระบบสูงขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการแพร่ (diffusion rate) ของโมเลกุลสีย้อมมีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงของสารดูดซับได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และมีการปั่นเหวี่ยงที่เวลาผ่านไป ทำให้สารดูดซับมีการแตกและหลุดออก

จากกันส่งผลให้ขนาดของสารดูดซับเล็กลงเป็นผลให้พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าในกรณีของสารดูดซับ PAC ในการดูดซับสีย้อม RB5 รวมไปถึงกรณีของสารดูดซับ D-Sludge และ A-Sludge ดูดซับสีย้อม BY1 นั้นให้ค่า ΔH° เป็นค่าลบ ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิอาจส่งผลเสียหรือมีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งแตกต่างงานวิจัยของ Gulaz (2006) ที่ระบุว่าสัณฐานแห่งดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยกระบวนการคายความร้อน

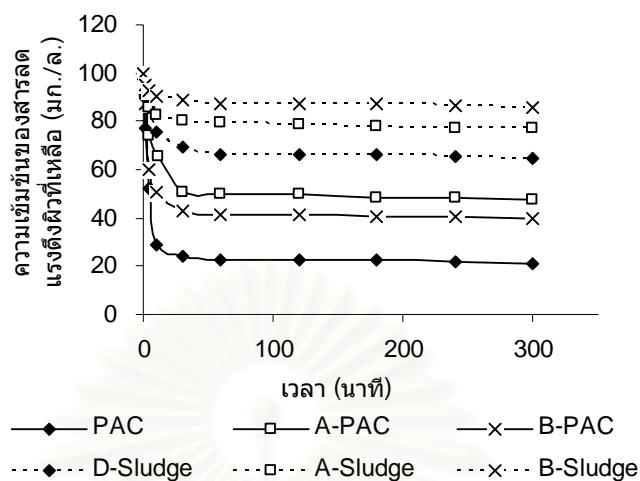
ส่วนค่า ΔG° ส่วนใหญ่มีค่าเป็นลบ แสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นได้เอง แต่พบว่าสารดูดซับประเภทสัณฐานแห่งดูดซับสีย้อม RB5 ทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่า ΔG° เป็นบวกแสดงว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นไม่เกิดขึ้นได้เอง เนื่องจากผลของความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยสารดูดซับประเภทสัณฐานในทั้ง 3 อุณหภูมิ มีค่าต่ำมากและแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยข้อมูลจากการคำนวณสมการเทอร์โมไดนามิกส์แสดงดังภาคผนวก ก.

4.3 การคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิว และสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

4.3.1 จลนศาสตร์การดูดซับสารลดแรงตึงผิวของสารดูดซับ

ผลการศึกษาจลนศาสตร์สารลดแรงตึงผิว (TX-100) ของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด แสดงดังภาพที่ 4.11 โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาค้างนี้คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด จนเข้าสู่สมดุลใช้เวลาประมาณ 60 นาที โดยจะนำเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลนี้ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว ต่อไป

จากข้อมูลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ TX-100 นำมาศึกษาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับ โดยทำการเปรียบเทียบจากสมการอันดับปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) และปฏิกิริยาการกระจายตัวภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion) โดยที่ค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ผลการศึกษาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9981-0.9999 ซึ่งแสดงว่ากระบวนการดูดซับ TX-100 โดยสารดูดซับทั้ง 6 ชนิดนั้น มีลักษณะเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) (Gulnaz และคณะ, 2006) โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_2) มีค่าเท่ากับ 1.362×10^{-6} - 1.83×10^{-5} กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที



ภาพที่ 4.11 จลนศาสตร์การดูดซับสารลดแรงดึงผิว (TX-100) บนพื้นผิวสารดูดซับ
ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาสารลดแรงดึงผิว

สารดูดซับ	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เสมือน		ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน		ปฏิกิริยาการกระจายตัว ภายในอนุภาค	
	R^2	k_1 (นาที ⁻¹)	R^2	k_2 (ก./มก. นาที)	R^2	k_p (มก/ก. นาที ^{0.5})
D-Sludge	0.7592	-0.01612	0.9997	1.21E-05	0.7742	2190.20
A-Sludge	0.8466	-0.01388	0.9992	1.81E-05	0.0063	866.85
B-Sludge	0.8121	-0.01105	0.9981	1.83E-05	0.1034	514.84
PAC	0.7291	-0.02695	0.9999	2.02E-06	0.5812	29472.00
A-PAC	0.7485	-0.01632	0.9998	1.36E-06	0.3312	11447.00
B-PAC	0.7367	-0.01267	0.9998	2.03E-06	-0.0162	13407.00

4.3.2 ความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

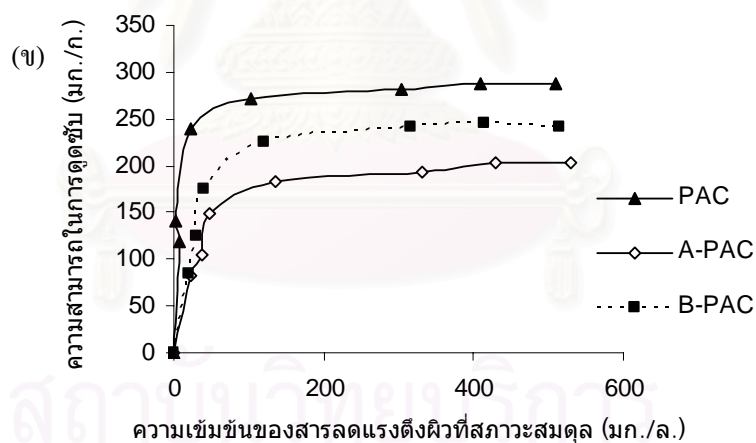
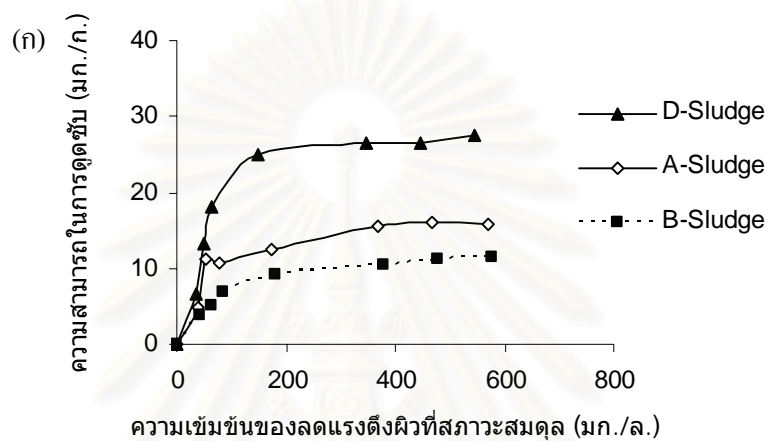
ความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว (TX-100) ของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด แสดงในภาพที่ 4.12 โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาค้างนี้คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า D-Sludge A-Sludge B-sludge PAC A-PAC และ B-PAC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 27.9 18.9 12.7 291.6 208.3 และ 250.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ จะนำค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ไปใช้เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ที่ผสมกับสีย้อมต่อไป

ผลลัพธ์ที่ได้ข้างต้นเป็นไปตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับแต่ละชนิด และ หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของสารดูดซับ ซึ่งสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า สารดูดซับประเภทสแลคจ์ถึง 40-120 เท่า จึงให้ผลการดูดซับที่สูงกว่าสารดูดซับประเภทสแลคจ์

กรณีสารดูดซับประเภทสแลคจ์พบว่า D-Sludge สามารถดูดซับ TX-100 มากที่สุด ตามด้วย B-Sludge และ A-Sludge ตามลำดับ โดย D-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะดูดซับโครงสร้างของ TX-100 ในส่วนชอบน้ำได้ดี และเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้น จะเกิด Critical micelle concentration (c.m.c) ซึ่ง c.m.c ของ TX-100 จะเกิดที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 147 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นไป (Punyapalakul, 2004) โดยที่จุด c.m.c ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของ โครงสร้างที่ไม่ชอบน้ำเมื่อถูกดูดซับจากพื้นผิวที่ชอบน้ำของสารดูดซับ จึงสามารถดูดซับ ได้ หลายๆ โมเลกุลพร้อมกัน ดังภาพที่ 4.13 โดยการดูดซับเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสารดูดซับ และส่วนชอบน้ำของ TX-100 (Punyapalakul, 2004) ส่วนใน B-Sludge พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันลดลง ส่งผลให้ดูดซับ TX-100 ได้ลดลง ซึ่งในกรณีของ A-Sludge มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดแต่มีหมู่ ฟังก์ชันของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ลดลงทำให้ความสามารถในการดูดซับจึงน้อยกว่า D-sludge แต่ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่า B-Sludge

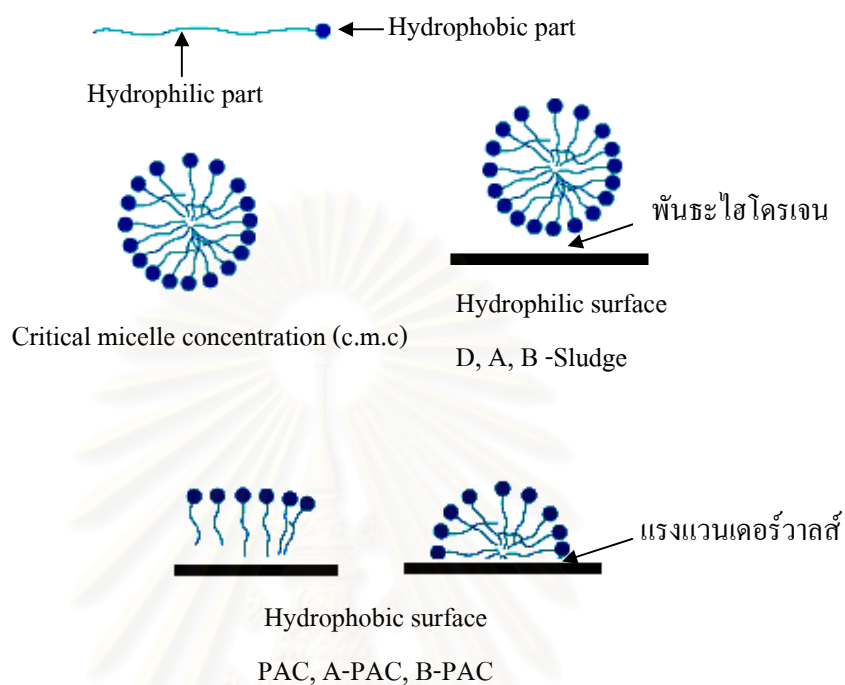
ในส่วนสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ พบว่า PAC สามารถดูดซับ TX-100 มาก ที่สุดตามด้วย B-PAC และ A-PAC ตามลำดับ การดูดซับเช่นนี้เกิดขึ้นจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก และเกิดจากพันธะไฮโดรเจนบางส่วนบนพื้นผิวสารดูดซับและ TX-100 ด้วย เนื่องจาก PAC มี คุณสมบัติคือไม่ชอบน้ำ เพราะฉะนั้นพื้นผิวของ PAC จะดูดซับส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) ของ TX-100 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งการดูดซับด้วย B-PAC มีค่า ความสามารถในการดูดซับ TX-100 น้อยกว่า PAC เนื่องจาก B-PAC มีค่า pH_{pzc} 8.29 ซึ่งทำให้เกิด ประจุบวกบนพื้นผิวมากขึ้น หมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) บนพื้นผิวลดลง เนื่องจากการกระตุ้นด้วยค่า จึงส่งผลให้การดูดซับด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างพื้นผิวของ B-PAC กับ TX-100 บางส่วนลดลงไปด้วย ส่วน A-PAC pH_{pzc} ต่ำทำให้ที่สารละลายพีเอช 7 เกิดประจุลบ บนพื้นผิวมาก มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) เพิ่มขึ้นจึงเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ

TX-100 บนพื้นผิวสารดูดซับมากขึ้น แต่การเกิดพันธะไฮโดรเจนก็เกิดกับน้ำที่เป็นตัวทำละลายด้วย จึงเกิดการแย่งชิงกันเกิดพันธะไฮโดรเจน และยังขัดขวางการดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เป็นแรงหลัก ด้วยเหตุนี้ A-PAC จึงดูดซับ TX-100 ได้น้อยที่สุด รวมทั้งพื้นที่ผิวของ A-PAC มีค่าน้อยกว่า B-PAC จึงถูกดูดซับได้น้อยกว่าอีกด้วย



ภาพที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับสารลดแรงดึงผิว (TX-100)

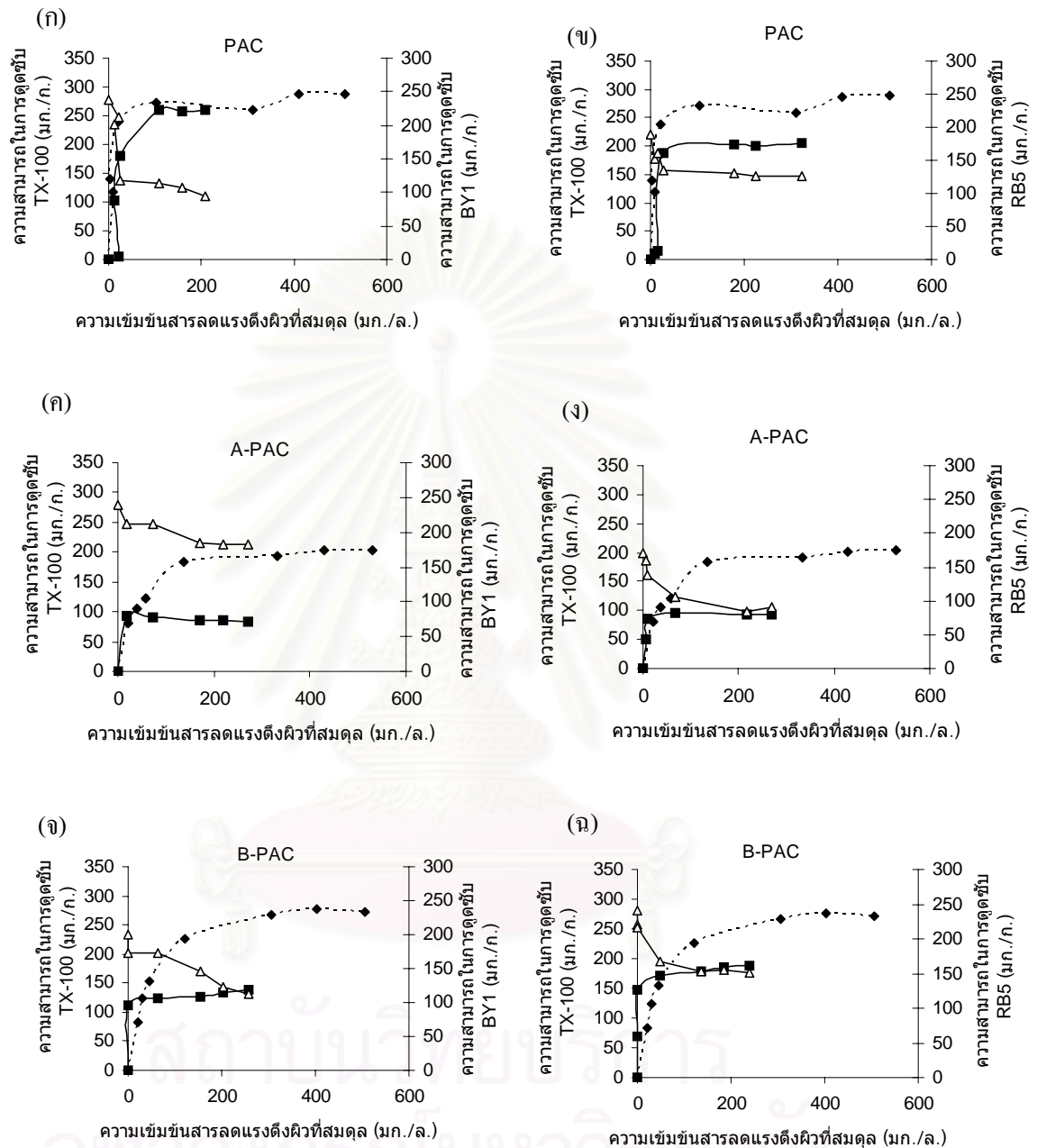
ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างการดูดซับ TX-100 บนพื้นผิวสารดูดซับ

4.3.3 ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีย้อม

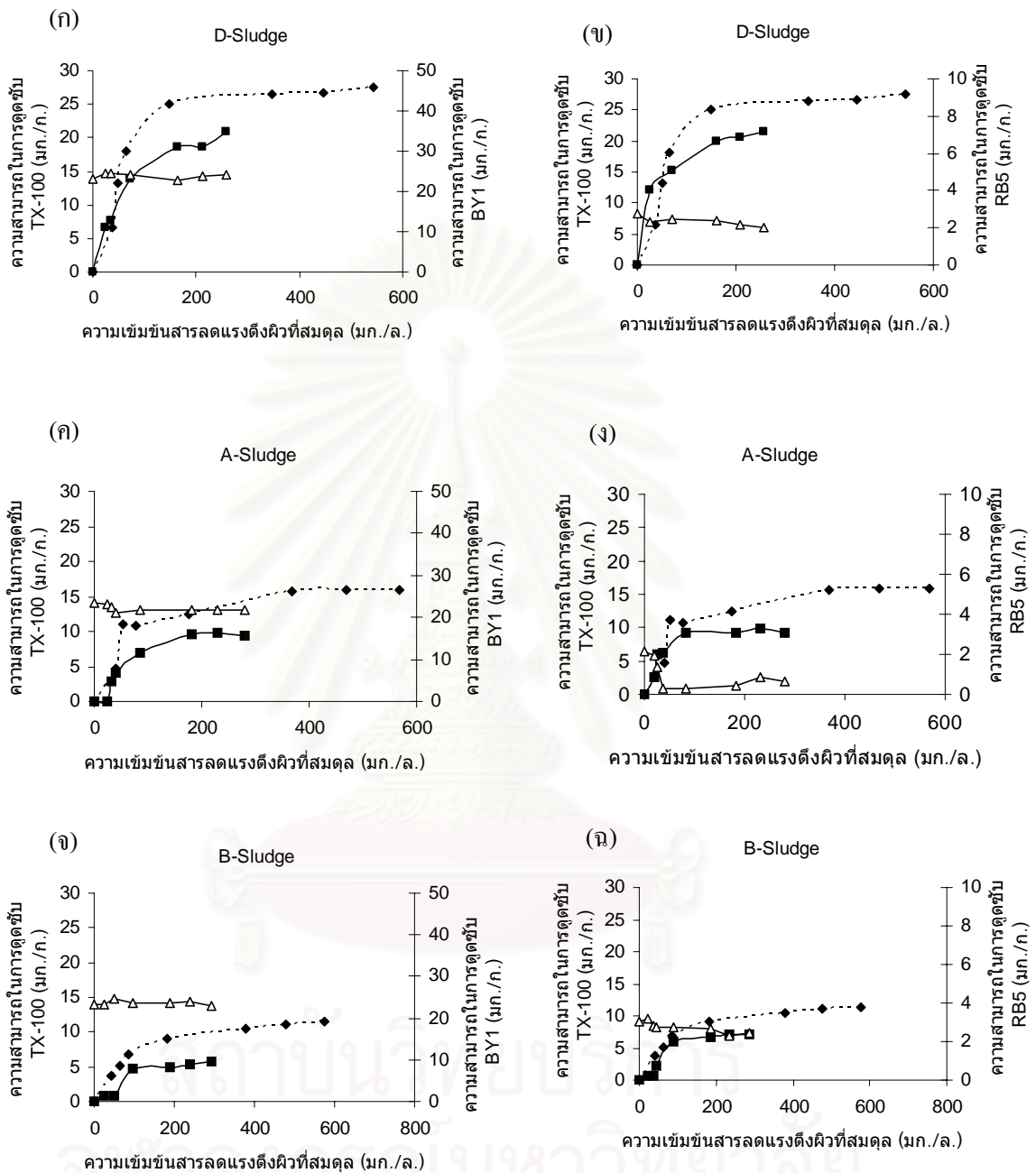
ผลการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีย้อม โดยควบคุมความเข้มข้นของสีย้อม และผสมกับสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมสารละลายที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์ปริมาณ TX-100 ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) รายละเอียดการใช้ HPLC แสดงดังภาคผนวก ง. ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.14 และ 4.15 และแสดงดังตารางที่ 4.13 และ 4.14



ภาพที่ 4.14 ผลของสารลดแรงดึงผิวต่อการดูดซับสี่ข้อมของ PAC A-PAC และ B-PAC

ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

โดย - - - คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงดึงผิวเมื่อไม่ผสมสี่ข้อม -△- คือความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมเมื่อผสมกับ TX-100 และ -■- คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงดึงผิวเมื่อผสมกับสี่ข้อม โดยใช้สี่ข้อมความเข้มข้นคงที่ 75 และ 50 มก./ล. สำหรับสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ และ สลัดจ์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.15 ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีของ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge

ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

โดย \triangle คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวเมื่อไม่ผสมสี \blacksquare คือความสามารถในการดูดซับสีเมื่อผสมกับ TX-100 และ \blacklozenge คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวเมื่อผสมกับสี โดยใช้สีความเข้มข้นที่ 75 และ 50 มก./ล. สำหรับสารดูดซับประเภทกาน้ำมันด์ และ สดีคัจ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลกระทบของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

สารดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว สูงสุด (มก./ก.) *			เปอร์เซ็นต์การดูดซับ TX-100 ที่ลดลง	
	TX-100	TX+RB5	TX+BY1	TX+RB5	TX+BY1
D-Sludge	27.9	25.6	24.5	8.5	12.3
A-Sludge	18.9	10.8	12.3	42.9	34.7
B-Sludge	12.7	7.7	5.9	39.4	53.7
PAC	291.6	204.1	285.7	30.0	2.0
A-PAC	208.3	93.5	84.7	55.1	59.3
B-PAC	297.6	188.7	138.9	36.6	53.3

หมายเหตุ * ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดจากค่า q_m ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

ตารางที่ 4.14 ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับสีย้อม

สารดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุด (มก./ก.) *				เปอร์เซ็นต์การดูดซับ สีย้อมที่ลดลง	
	RB5	RB5+TX	BY1	BY1+TX	RB5+TX	BY1+TX
D-Sludge	4.6	2.9	54.3	52.1	37.0	4.1
A-Sludge	4.3	1.7	60.6	51.0	61.3	15.8
B-Sludge	6.3	5.5	54.3	47.9	12.7	11.7
PAC	256.4	212.8	490.7	361.5	17.0	26.3
A-PAC	243.9	181.8	552.8	395.1	25.5	28.5
B-PAC	270.3	221.1	454.5	343.7	18.2	24.4

หมายเหตุ * ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดจากค่า q_m ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

กรณีใช้สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

จากภาพที่ 4.14 (ก) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ BY1 ลดลงและค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ในขณะที่มีสีย้อม BY1 ผสมอยู่ด้วยมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับ TX-100 เมื่อไม่มีสีย้อมผสม แสดงให้เห็นว่า PAC เลือกที่จะดูดซับ TX-100 มากกว่าสีย้อม BY1 โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม BY1 มีค่าลดลงประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงจากตารางที่ 4.14 สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 ของ PAC แสดงดังภาพที่ 4.14 (ข) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ RB5 ลดลงโดยค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 สูงสุดลดลงประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า TX-100 ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วย PAC

ส่วน A-PAC และ B-PAC จากภาพที่ 4.14 (ค) และ (จ) และตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ BY1 ลดลง โดยค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 ลดลง 29 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ในขณะที่มีสีย้อม BY1 ผสมมีค่าลดลงจากความสามารถในการดูดซับ TX-100 เมื่อไม่มีสีย้อมผสม เช่นเดียวกับสีย้อม RB5 ดังแสดงในภาพที่ 4.14 (ง) และ (ฉ) พบว่า A-PAC และ B-PAC มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 ลดลงประมาณ 26 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 สูงสุดลดลง แสดงให้เห็นว่า TX-100 ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมด้วย A-PAC และ B-PAC

โดยสรุป ในกรณีของสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากแรงในการดูดซับสีย้อมและ TX-100 เป็นแรงชนิดเดียวกันคือแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์เลือกดูดซับ TX-100 ผ่านส่วนไม่ชอบน้ำ (hydrophobic part) ใบบนพื้นผิวและรูพรุนของสารดูดซับได้มากกว่าสีย้อม ทำให้ขัดขวางการดูดซับสีย้อมบนพื้นผิวสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ โดยกลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมผสมสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพที่ 4.18 (ก) และ (ข)

กรณีใช้สารดูดซับประเภทสตัคซ์

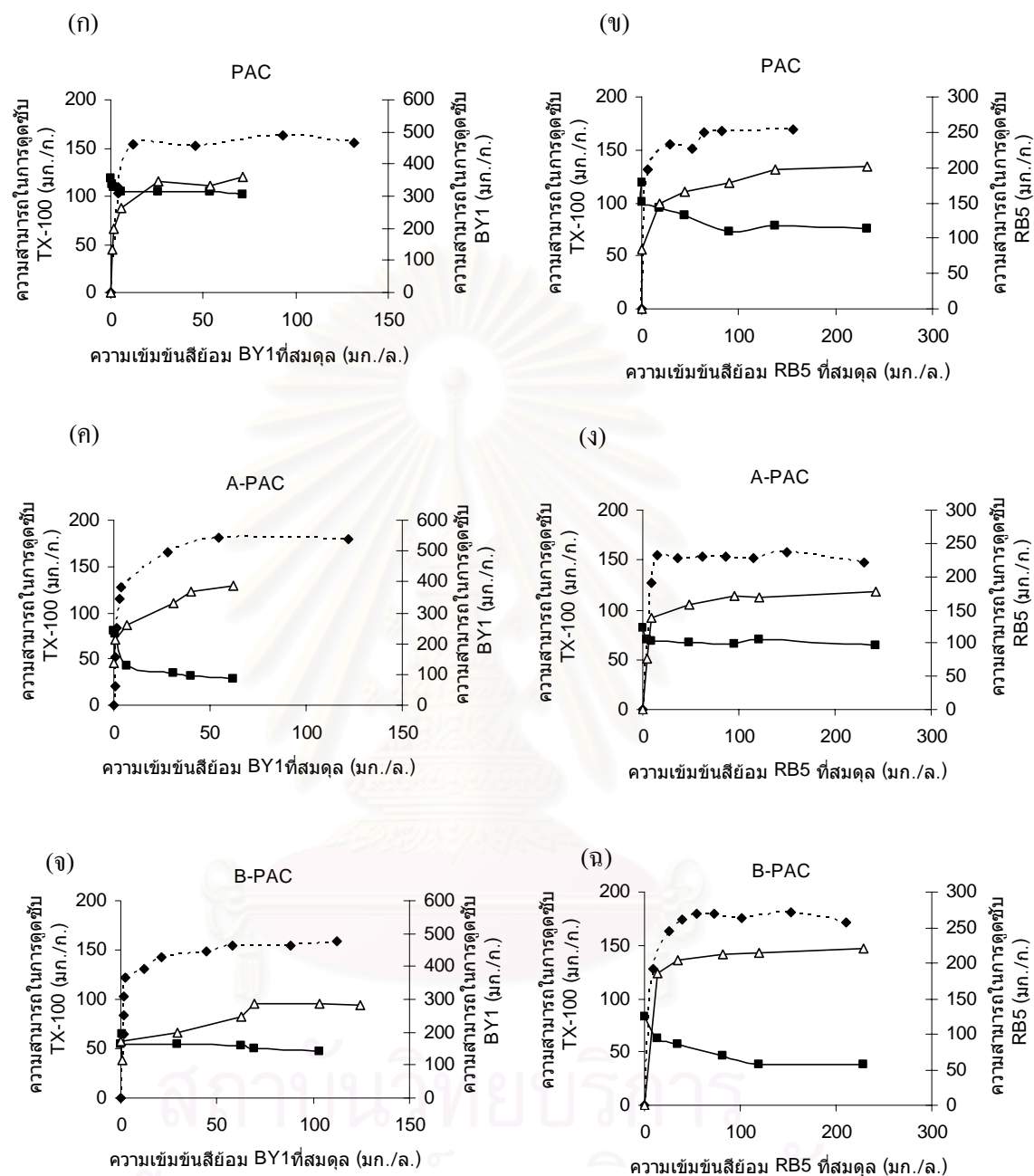
จากภาพที่ 4.15 (ก) และตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ D-Sludge ดูดซับสีย้อม BY1 ลดลงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 ไม่แตกต่างจากการดูดซับโดยไม่มีการผสมของ TX-100 โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 เมื่อมี TX-100 ผสมอยู่มีค่าลดลงเพียง 4 เปอร์เซ็นต์ ส่วน A-Sludge และ B-Sludge มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 ลดลงเล็กน้อยประมาณ 16 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับ

สีย้อม BY1 ที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนั้นแสดงให้เห็นว่า สารดูดซับเลือกที่จะดูดซับสีย้อม BY1 มากกว่า TX-100 เนื่องจากแรงที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม BY1 และ TX-100 มีความแตกต่างกัน โดย สารดูดซับประเภทสัลดจ์ดูดซับสีย้อม BY1 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ร่วมกับแรงดึงดูดระหว่างประจุ แต่ดูดซับ TX-100 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ร่วมกับแรงจากพันธะไฮโดรเจน จึงมีการแข่งขันเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์และด้วยสมบัติของ D-Sludge และ A-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย และมีแนวโน้มประจุเป็นลบซึ่งสีย้อม BY1 เป็นสีย้อมประจุบวกรวมทั้งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า TX-100 จึงเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในสารดูดซับได้มากกว่า ทำให้สีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีใกล้เคียงกับกรณีไม่ผสม TX-100 ส่วน B-Sludge มีประจุบนพื้นผิวเป็นเป็นกลางและบวกเล็กน้อย แต่ก็สามารถดูดซับสีย้อม BY1 ลดลงเพียงเล็กน้อย

ในส่วนการดูดซับสีย้อม RB5 พบว่า D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ผสม TX-100 ลดลงประมาณ 37 61 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 (ข) (ง) และ (ฉ) โดยประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของ TX-100 ในขณะที่มีสีย้อม RB5 ผสมลดลง เนื่องจากมีแรงที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม RB5 และ TX-100 ที่เป็นแรงชนิดเดียวกันคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงจากพันธะไฮโดรเจน แต่การดูดซับสีย้อม RB5 มีแรงระหว่างประจุร่วมด้วย และการดูดซับ TX-100 มีแรงหลักคือแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ลดลงเกิดจากการแข่งขันกันระหว่างสีย้อม RB5 และ TX-100 ด้วยการเกิดพันธะไฮโดรเจนโดยส่วนที่ชอบน้ำของ TX-100 ดูดซับบนพื้นผิวของ D-Sludge และ B-Sludge ทำให้ขัดขวางการดูดซับสีย้อม RB5 ซึ่ง B-Sludge มี pH_{pzc} สูงทำให้พื้นผิวมีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ จึงเลือกดูดซับสีย้อม RB5 ที่มีประจุลบได้ดีกว่า D-Sludge และสำหรับ A-Sludge มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม RB5 ลดลงมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 1.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงคิดเป็น 61 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อม RB5 ลดลง เป็นผลเนื่องจากพื้นผิวสารดูดซับ A-Sludge มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบ จึงดูดซับสีย้อม RB5 ที่มีประจุเป็นลบได้น้อย และโครงสร้างของ TX-100 ในส่วนชอบน้ำจึงเข้าไปอยู่บนพื้นผิว ของ A-Sludge ได้มากกว่า รวมทั้งขนาดโมเลกุลของสีย้อม RB5 มีขนาดใหญ่กว่า TX-100 จึงดูดซับที่ผิวนอกของสารดูดซับมากกว่าพื้นผิวภายใน โดยกลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมผสมสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพที่ 4.18 (ค) และ (ง)

4.3.4 ผลกระทบของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว

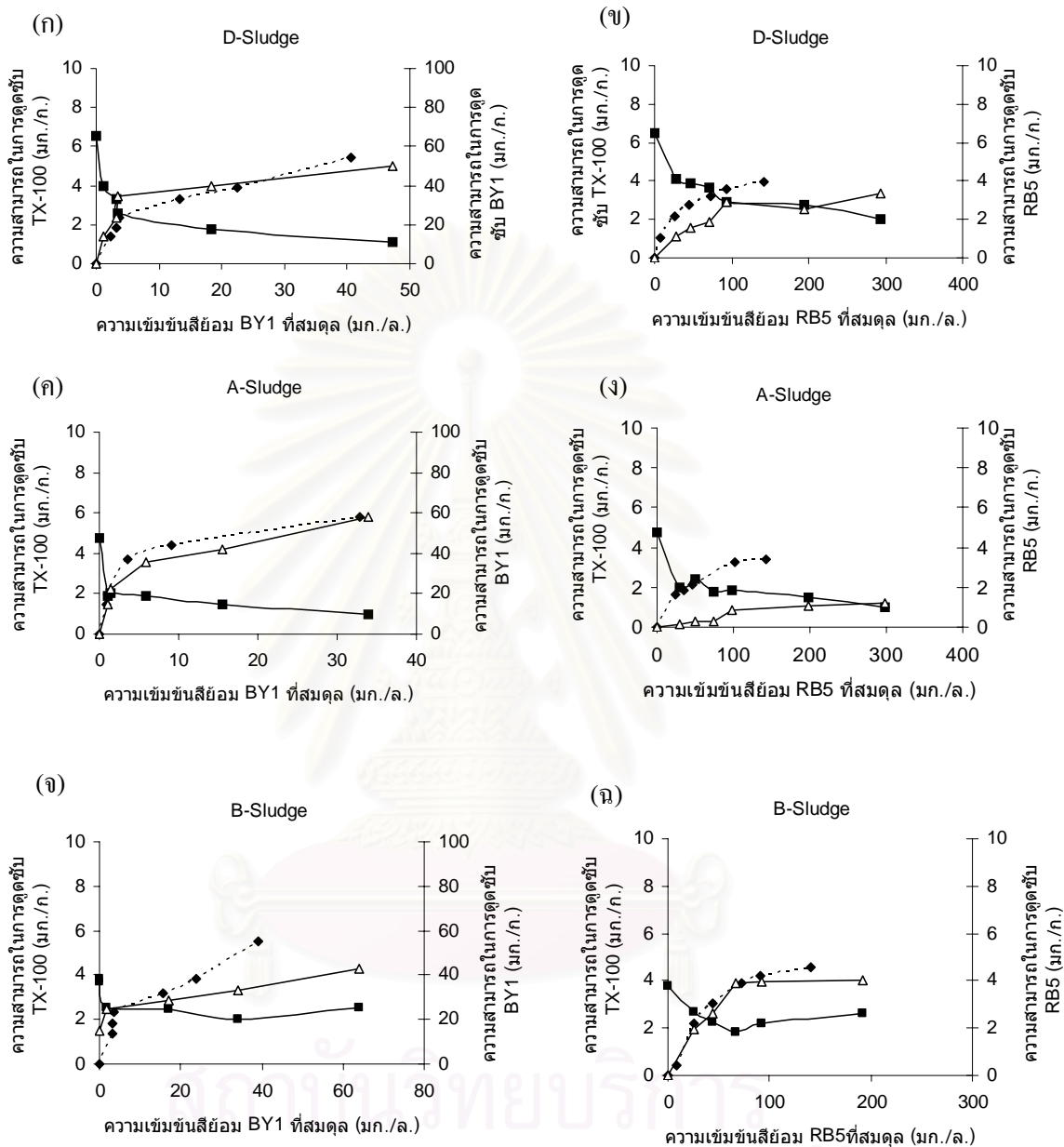
ผลกระทบของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว (TX-100) โดยควบคุมความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และผสมกับสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมสารละลายที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.16 และ 4.17



ภาพที่ 4.16 ผลของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิวของ PAC A-PAC และ B-PAC

ที่พีเอช 7 25 °C ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

โดย - - - คือความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว —△— คือความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อผสมกับ TX-100 และ —■— คือความสามารถในการดูดซับ TX-100 เมื่อผสมกับสีย้อม โดยใช้ TX-100 ความเข้มข้นคงที่ 50 มก./ล.



ภาพที่ 4.17 ผลของสีย้อมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิวของ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge

ที่พีเอช 7 25 °C ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

โดย -◆- คือความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว ▲ คือความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อผสมกับ TX-100 และ ■ คือความสามารถในการดูดซับ TX-100 เมื่อผสมกับสีย้อม โดยใช้ TX-100 ความเข้มข้นคงที่ 50 มก./ล.

กรณีใช้สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์

จากภาพที่ 4.16 (ก) และตารางที่ 4.13 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อม BY1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ TX-100 ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ TX-100 เมื่อไม่มีสีย้อมผสมโดยมีค่าลดลงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าสีย้อม BY1 มีผลต่อการดูดซับ TX-100 ด้วย PAC น้อยมาก เนื่องจาก PAC มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจึงดูดซับ TX-100 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ได้มากกว่าสีย้อมที่มีประจุและการดูดซับ TX-100 บนพื้นผิว PAC เป็นการขัดขวางการดูดซับสีย้อม BY1 ในรูพรุนของ PAC อีกด้วย

จากภาพที่ 4.16 (ค) และ (จ) และตารางที่ 4.13 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อม BY1 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ A-PAC และ B-PAC มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ TX-100 ลดลง 59 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 ในขณะที่มี TX-100 ผสมอยู่ด้วยมีค่าลดลงด้วย แสดงว่า A-PAC และ B-PAC เลือกที่จะดูดซับทั้งสีย้อม BY1 และ TX-100 ไปพร้อมๆ กัน การดูดซับ TX-100 ลดลงเกิดจากการแข่งขันกันระหว่าง TX-100 และ สีย้อม BY1 บนพื้นผิวสารดูดซับ A-PAC และ B-PAC ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงระหว่างประจุของสีย้อมกับสารดูดซับ การลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับ TX-100 เกิดจากสีย้อมถูกดูดซับอยู่ใน โครงสร้างรูพรุนของสารดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ จึงขัดขวางการดูดซับ TX-100 ในส่วนไม่มีขั้ว (hydrophobic) บนพื้นผิวสารดูดซับ รวมทั้ง A-PAC และ B-PAC มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้นทำให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำลดลงด้วย และเกิดประจุบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปโดย A-PAC มีประจุที่พื้นผิวเป็นลบมากขึ้นจึงดูดซับ BY1 ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการขัดขวางการดูดซับ TX-100

สำหรับสีย้อม RB5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อม RB5 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC A-PAC และ B-PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ TX-100 ลดลง 30 55 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.13 และค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 ในขณะที่มี TX-100 ผสมอยู่ด้วยของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงแสดงว่า PAC A-PAC และ B-PAC เลือกที่จะดูดซับทั้งสีย้อม RB5 และ TX-100 ไปพร้อมๆ กัน โดยจากผลลัพท์ดังกล่าวเกิดจากการแข่งขันกันระหว่าง TX-100 และสีย้อม RB5 บนพื้นผิวสารดูดซับ PAC A-PAC และ B-PAC ซึ่งการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับ TX-100 เกิดจากสีย้อม RB5 ถูกดูดซับอยู่ใน โครงสร้างรูพรุนของสารดูดซับบางส่วน จึงขัดขวางการดูดซับ TX-100 ในส่วนไม่มีขั้ว (hydrophobic) บนพื้นผิวสารดูดซับ เพราะแรงดูดซับสีย้อม RB5 และ TX-100 เป็นแรงชนิดเดียวกันคือเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลักและมีแรงจากพันธะไฮโดรเจนร่วมด้วย โดยกลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมผสมสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพที่ 4.18 (ก) และ (ข)

กรณีใช้สารดูดซับประเภทสไลด์จ์

จากภาพที่ 4.17 (ก) (ค) และ (จ) และตารางที่ 4.13 พบว่า D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีประสิทธิภาพในการดูดซับ TX-100 ลดลง เมื่อมีความเข้มข้นลิเทียม BY1 เพิ่มขึ้น โดย D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีประสิทธิภาพในการดูดซับ TX-100 ลดลง 12 35 และ 54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดย D-Sludge มีความสามารถในการดูดซับ TX-100 ลดลงน้อยที่สุด เนื่องจาก D-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันที่มีชอบน้ำจำพวกหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถดูดซับโครงสร้างของ TX-100 ในส่วนชอบน้ำ (Hydrophobic part) ด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่า A-Sludge และ B-Sludge ที่มีหมู่ฟังก์ชันลดลง

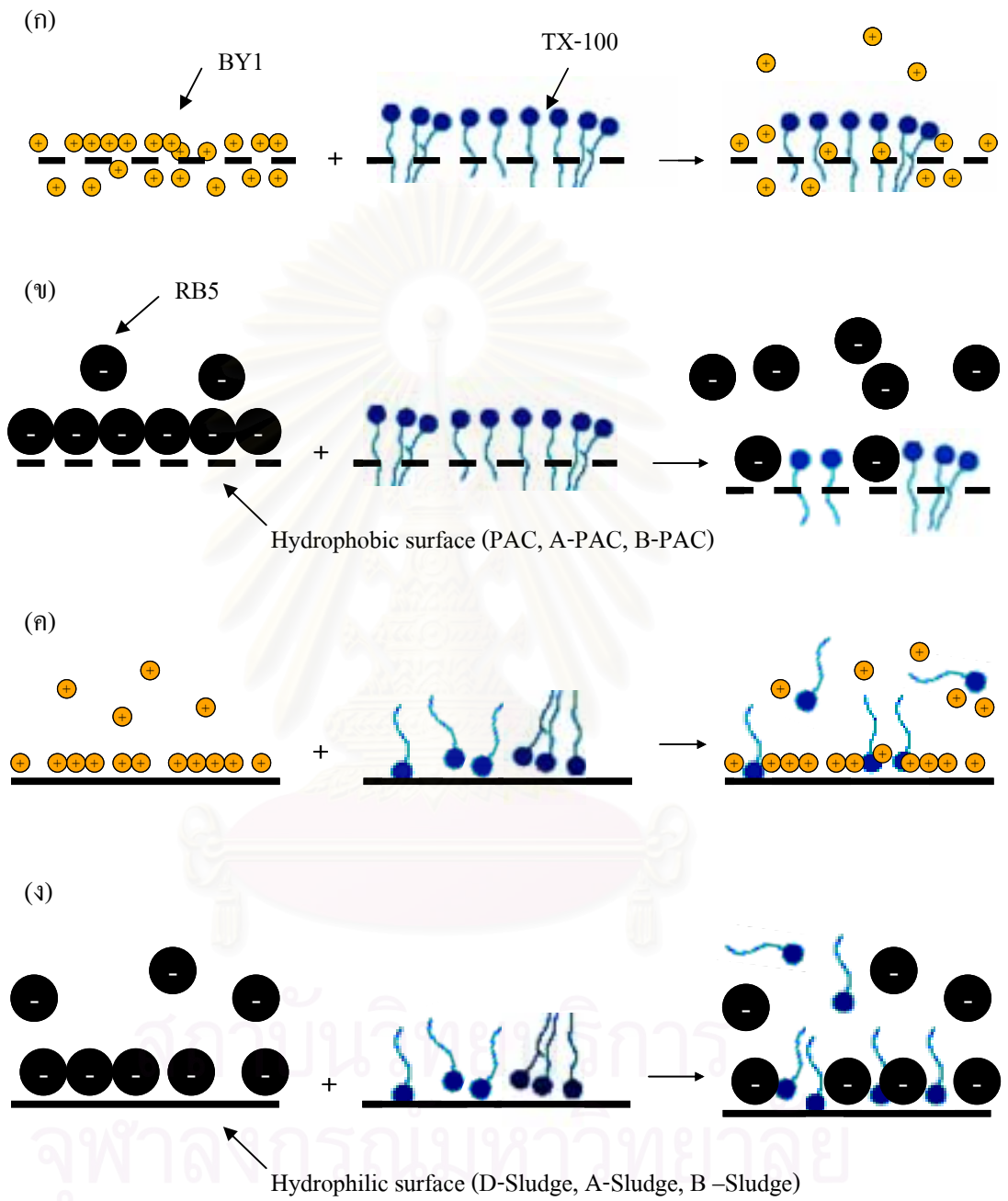
จากภาพที่ 4.17 (ข) (ง) และ (ฉ) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของลิเทียม RB5 เพิ่มขึ้น D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดของ TX-100 ลดลง 8 43 และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดย D-Sludge มีค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ขณะมีลิเทียม RB5 ผสมมีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซับ TX-100 เมื่อไม่มีลิเทียมผสม จึงสรุปได้ว่าลิเทียม RB5 ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ TX-100 ด้วย D-Sludge และ A-Sludge เล็กน้อย ส่วน A-Sludge และ B-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (OH) ลดลง จึงดูดซับโครงสร้างของ TX-100 ในส่วนชอบน้ำได้ลดลงกว่า D-Sludge โดยกลไกการดูดซับสารละลายลิเทียมผสมสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพที่ 4.18 (ค) และ (ง)

ผลของการคัดเลือกมลสารระหว่างลิเทียมและสารลดแรงตึงผิว

จากผลการวิจัยใน 2 ขั้นตอนคือผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการดูดซับลิเทียม และ ผลกระทบของลิเทียมต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว เพื่อศึกษาผลของการคัดเลือกมลสารระหว่างลิเทียมและสารลดแรงตึงผิวของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด โดยดูผลของการเปลี่ยนแปลงการดูดซับจากการผสมกันระหว่าง TX-100 และลิเทียม สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการคัดเลือกมลสารระหว่างลิเทียมและสารลดแรงตึงผิว

สารดูดซับ	การคัดเลือกมลสารระหว่างลิเทียมและสารลดแรงตึงผิว	
	TX-100 และ RB5	TX-100 และ BY1
D-Sludge	TX-100	BY1
A-Sludge	TX-100 และ RB5	BY1
B-Sludge	RB5	BY1
PAC	TX-100 และ RB5	BY1
A-PAC	TX-100 และ RB5	TX-100 และ BY1
B-PAC	TX-100 และ RB5	TX-100 และ BY1



ภาพที่ 4.18 กลไกการดูดซับสารละลายสีเขียวผสมสารลดแรงตึงผิว
 (ก) และ (ข) สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ (ค) และ (ง) สารดูดซับประเภทสไลด์จ์

4.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการกำจัดสีย้อมด้วยสารดูดซับ

ในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับโดยใช้สัจค์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง และทำการปรับปรุงพื้นผิวของสารดูดซับโดยกระตุ้นด้วยกรดและด่าง ดังนั้น ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์และคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดสีย้อมเพื่อให้เห็นความเหมาะสมในการเลือกสารดูดซับในการกำจัดสีย้อม

4.4.1 การคำนวณปริมาณสารดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม

เนื่องจากการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดและด่างนั้น พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างจากสารดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้สารดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้นในการคำนวณ และเพื่อเป็นการตัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นสารดูดซับ

สมมุติปริมาณน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอมีปริมาณ 1,000 ลิตรต่อวัน โดยมีความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องการบำบัดสีย้อมจนเหลือความเข้มข้น 3 ค่าคือไม่เกิน 0.5 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

จากภาพที่ 4.5 D-Sludge PAC ดูดซับสีย้อม RB5 และ สีย้อม BY1 จนมีความเข้มข้นของสีย้อม RB5 ที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.5 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับดังแสดงในตารางที่ 4.16 และคำนวณหาปริมาณการใช้สารดูดซับใน 1 วัน แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นสีย้อมคงเหลือต่างๆ

สารดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับสีย้อม (มิลลิกรัมต่อกรัม)					
	สีย้อม RB5 คงเหลือ			สีย้อม BY1 คงเหลือ		
	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล
PAC	3	5.5	12	38	72	146
D-Sludge	0.05	0.15	0.3	3	6.4	12.5

ตารางที่ 4.17 ปริมาณสารดูดซับที่ใช้ต่อวัน

สารดูดซับ	ปริมาณสารดูดซับ (กิโลกรัมต่อวัน)					
	สีย้อม RB5 คงเหลือ			สีย้อม BY1 คงเหลือ		
	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล
PAC	16.5	8.9	4.0	1.3	0.7	0.3
D-Sludge	990	326.7	160.0	16.5	7.7	3.8

4.4.2 ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ เตรียมสารดูดซับ และการกำจัดกากตะกอน

สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ แต่มีค่าใช้จ่ายในการเตรียม โดยการนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนได้น้ำหนักคงที่ ค่าใช้จ่ายจึงคำนวณเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบสลัดจ์ แต่สามารถทำให้แห้งได้โดยนำไปตากแดดก็จะไม่เสียค่าไฟฟ้าในการนำไปอบแห้งหรือเป็นการประหยัดเวลาในการอบให้แห้งในเตาอบได้อีกทางหนึ่ง

คำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบสลัดจ์ให้แห้ง เตาอบที่ใช้สำหรับอบโดยทั่วไปมีพลังงาน 1600 วัตต์ เวลาที่ใช้อบสลัดจ์ให้แห้งคิดที่ 5 ชั่วโมง หน่วยไฟฟ้า 1 หน่วย เท่ากับ 1000 วัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ไป} &= 1600 \times 5 = 8000 \text{ วัตต์ชั่วโมง} \\ &= 8 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ค่ากระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปจะอยู่ ประมาณ 2.50 ถึง 4.00 บาท ต่อหน่วย
สมมุติคิดที่ 3 บาทต่อหน่วย จะเสียค่าไฟ $8 \times 3 = 24$ บาทต่อเตา

โดยสมมุติปริมาณ D-Sludge ที่ได้จากการอบในเตาอบแต่ละครั้งได้ประมาณครั้งละ 20 กิโลกรัม โดยค่าไฟฟ้าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ D-Sludge

ตัวแปร	D-Sludge					
	สีย้อม RB5 คงเหลือ			สีย้อม BY1 คงเหลือ		
	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล
จำนวนครั้งที่อบ	50	17	8	1	1	1
ค่าไฟฟ้า (บาท)	1200	408	192	24	24	24

ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้าโดยทั่วไปราคาถ่านกัมมันต์ชนิดผงตันละประมาณ 1 แสนบาท หรือกิโลกรัมละ 100 บาท และราคาการกำจัดกากตะกอน จากบริษัทบริหารและพัฒนา เพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) (GENCO) อยู่ในอัตรา 3,000 บาทต่อตัน หรือ 3 บาทต่อกิโลกรัม โดยค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนแสดงดังตาราง 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอน

สารดูดซับ	ค่ากำจัดกากตะกอน (บาทต่อวัน)					
	สี้อม RB5 คงเหลือ			สี้อม BY1 คงเหลือ		
	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล
PAC	49.5	26.7	12.0	3.9	2.0	1.0
D-Sludge	2970.0	980.0	480.0	49.5	23.0	11.5

4.4.3 สรุปค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

ตารางที่ 4.20 สรุปค่าใช้จ่ายในการใช้สารดูดซับในการกำจัดสี้อม

สารดูดซับ	ค่าใช้จ่าย	ราคา (บาทต่อวัน)					
		สี้อม RB5 คงเหลือ			สี้อม BY1 คงเหลือ		
		0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล	0.5 มก./ล	1 มก./ล.	2 มก./ล
PAC	จัดซื้อ	1650.0	890.9	400.0	130.3	68.1	32.9
	กำจัดกากตะกอน	49.5	26.7	12.0	3.9	2.0	1.0
	รวม	1699.5	917.6	412.0	134.2	70.1	33.9
D-Sludge	ค่าไฟฟ้า	1200	408	192	24	24	24
	กำจัดกากตะกอน	2970.0	980.0	480.0	49.5	23.0	11.5
	รวม	4170.0	1388.0	672.0	73.5	47.0	35.5

จากตารางที่ 4.17 พบว่าไม่ควรนำ D-Sludge มาใช้ในการดูดซับสีย้อม RB5 เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า PAC มาก มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 น้อย และใช้ในปริมาณสูง แต่ D-Sludge เหมาะสมในกรณีใช้กำจัดสีย้อม BY1 มากเนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าการใช้ PAC เมื่อต้องการให้สีย้อมเหลือความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้ PAC ถึง 60.7 และ 23.1 บาทต่อวัน ตามลำดับ แต่ถ้าต้องการให้ความเข้มข้นเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ควรใช้ PAC เพราะมีราคาถูกกว่า D-Sludge 1.7 บาทต่อวัน แต่โดยปกติโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ ซึ่งถ้าโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอรับมากำจัดต่อจะเป็นการเพิ่มรายได้ และยังสามารถนำกำจัดสีย้อมได้อีกด้วย เพราะฉะนั้น การนำ D-Sludge มาใช้จึงให้ผลคุ้มค่าในการใช้งาน ดังนั้นสารดูดซับประเภทสลัดจ์ (D-Sludge) จึงเป็นทางเลือกอีกประการหนึ่งที่น่าสนใจในการใช้กำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5) และสีย้อมเบสิก (BY1) โดยใช้สไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ และถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้ามาเป็นสารดูดซับ โดยทำการศึกษาจลนศาสตร์ และไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม ศึกษาปัจจัยทางเคมี (การกระตุ้นสารดูดซับด้วยกรดและด่าง) และทางกายภาพ (อุณหภูมิและค่าพีเอช) ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม รวมทั้งศึกษาสมบัติของสารดูดซับในการคัดเลือกมลสารระหว่างสารลดแรงตึงผิว และสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับประเภทสลัดจ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 8.62-26.46 ตารางเมตรต่อกรัม และสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 980-1051.53 ตารางเมตรต่อกรัม หมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับประเภทสลัดจ์มีความหลากหลายและเป็นหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำ มากกว่าหมู่ไม่ชอบน้ำ ส่วนสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไม่หลายหลายนัก และมีสมบัติของความชอบไม่ชอบน้ำ โดยสารดูดซับกระตุ้นกรดจะพบหมู่กรดเพิ่มขึ้น ส่วนสารดูดซับกระตุ้นด่างจะพบว่ามีหมู่กรดลดลง ค่า pH_{PZC} ของ D-Sludge A-Sludge B-Sludge PAC A-PAC และ B-PAC มีค่าเท่ากับ 6.70 2.73 7.68 7.08 4.26 และ 8.29 ตามลำดับ ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารดูดซับประเภทสลัดจ์มีความสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับ

5.1.2 เวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ (RB5) และสีย้อมเบสิก (BY1) ของสารดูดซับประเภทสลัดจ์เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที และสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 360 นาที เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

5.1.3 การดูดซับสีย้อม RB5 ด้วย D-Sludge และ B-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และในส่วนของ A-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช สำหรับไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม BY1 ปรากฏว่า D-Sludge และ A-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ส่วน B-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ในส่วนของ PAC A-PAC และ B-PAC ไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม RB5 ให้ค่า R^2 ต่ำทั้ง 2 ไอโซเทอม สำหรับไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม

ย้อม BY1 พบว่า PAC และ A-PAC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และ B-PAC เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

5.1.4 การปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม พบว่าสีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-PAC ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 552.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนของสไลด์จ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วย A-Sludge โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 60.6 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อม RB5 พบว่าถูกดูดซับได้ดีด้วย B-PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 270.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนของสไลด์จ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วย B-Sludge โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 6.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นไปตามผลของ pH_{PZC}

5.1.5 สีย้อม RB5 ถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วย B-PAC ที่พีเอช 9 และในส่วนสไลด์จ์พบว่า B-Sludge ดูดซับได้ดีที่พีเอช 7 ส่วนสีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-PAC ที่พีเอช 9 และในส่วนสไลด์จ์พบว่า A-Sludge ดูดซับได้ดีที่พีเอช 9

5.1.6 ค่าของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม จากการคำนวณสมการเทอร์โมไดนามิกส์ โดยสารดูดซับทุกชนิดดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง (ที่ 40 และ 50 องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการที่เกิดขึ้นได้ว่าเป็นกระบวนการดูดความร้อน และส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นได้เอง

5.1.7 เวลาที่ใช้ในการดูดซับสารดูดซับสารลดแรงตึงผิว (TX-100) ของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที โดย D-Sludge A-Sludge B-sludge PAC A-PAC และ B-PAC มีความสามารถในการดูดซับ TX-100 สูงสุดเท่ากับ 27.9 18.9 12.7 291.6 208.3 และ 250.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.1.8 การคัดเลือกมลสารระหว่างสีย้อม และ TX-100 กรณีสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์พบว่า TX-100 และสีย้อมต่างส่งผลให้การดูดซับสารทั้ง 2 ชนิดลดลง ยกเว้นการดูดซับด้วย PAC พบว่าสีย้อม BY1 ส่งผลต่อการดูดซับ TX-100 ไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนสารดูดซับประเภทสไลด์จ์ พบว่าสีย้อมมีผลต่อการดูดซับ TX-100 ลดลง แต่ TX-100 ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นการดูดซับด้วย A-Sludge พบว่า TX-100 และสีย้อม RB5 ต่างส่งผลให้การดูดซับสารแต่ละชนิดลดลง และ TX-100 ส่งผลให้ B-Sludge ดูดซับสีย้อม RB5 ลดลง และสีย้อม RB5 ส่งผลต่อการดูดซับ TX-100 ไม่เปลี่ยนแปลง

5.1.9 D-Sludge สามารถกำจัดสีย้อม BY1 โดยมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการใช้ PAC ในกรณีต้องการให้สีย้อม BY1 เหลือความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าต้องการให้ความเข้มข้นเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ควรใช้ PAC เพราะมีราคาถูกกว่า D-Sludge ดังนั้นสารดูดซับ

ประเภทสลัดจ์ (D-Sludge) จึงเป็นทางเลือกอีกประการหนึ่งที่น่าสนใจในการใช้กำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการกระตุ้นสารดูดซับโดยใช้วิธีอื่นเพื่อให้สารดูดซับมีความแตกต่างกันในสมบัติทางเคมีและกายภาพอย่างชัดเจน เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้สมบัติของสารดูดซับที่ถูกกระตุ้นยังมีความแตกต่างจากสารดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้นน้อย จึงให้ผลการดูดซับไม่แตกต่างกัน

5.2.2 ควรศึกษาผลของความสามารถในการดูดซับของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการปรับสภาพสลัดจ์ในขั้นตอนการกำจัดสลัดจ์ก่อนตากในลานตากตะกอน เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วย

5.2.3 ควรศึกษาการคัดเลือกมลสารระหว่างสีย้อมกับสารอื่นๆ ที่ปะปนมากับน้ำเสียดูดซับ เช่น อิเล็กโตรไลต์ชนิดต่างๆ และ โลหะหนัก เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ควบคุมในกระบวนการดูดซับ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรรณิการ์ สิริสิงห. 2544. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- กรุงเทพมหานคร. สำนักการระบายน้ำ. สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ. 2549. โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม [online]. กรุงเทพมหานคร. แหล่งที่มา: http://dds.bma.go.th/nong_k.htm [20 ตุลาคม 2550]
- จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุทัศน์ มลินทะเลข. 2537. การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิรสา กรงกรด. 2548. สารลดแรงตึงผิว [online]. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ. แหล่งที่มา: www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf [25 มกราคม 2551]
- ณัฐพล อิงอรวิจิตตรา. หัวหน้างานระบบบำบัดน้ำเสีย บริษัท ฮันส์แมน (ประเทศไทย) จำกัด. สัมภาษณ์, 20 กุมภาพันธ์ 2551.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า: รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธวัชชัย สิงหศิริ. 2548. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม่กระถินเทพา เพื่อการกำจัดโครเมียม และนิลที่เกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นริศญา กวินันทวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการ PAC-UF. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ปรานอม ขาวเมฆ. 2539. คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้ Fourier transform infrared spectrometer. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิศมัย ลิขิตบรรณกร. 2544. คู่มือสมบัติและกรรมวิธีการวิเคราะห์สารเคมี ที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ) ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.
2547. เอกสารประกอบการอบรมครู HPLC (High Performance Liquid Chromatography). ปทุมธานี: ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัทแซน. อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์.
- รัชনী รุกขชาติ. 2546. สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง [online]. กรุงเทพมหานคร: กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ. แหล่งที่มา:
http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm [5 กรกฎาคม 2550]
- ลิลี โกศยยานนท์. 2539. คู่มือวิชาการสิ่งทอ. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วณัฏฐ์ ประยูรพรหม. 2541. ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์เม็ด สำหรับการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วราญา ประทุมแก้ว. 2543. การลดสีรีแอกทีฟโดยกระบวนการเอสบีอีอาร์แบบแอนไอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2548. ศัพท์บัญญัติและนิยามสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, สถาบันสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. 2545. คู่มือตรวจประเมินเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพมหานคร.

- เสกสรรค์ เชื้อขวัญกิจ. 2546. การกำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไม้ยูคาลิปตัส และแอน ทราไซต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โสภณ ชินเวชกิจวานิชย์. 2540. การลดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วยระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิชาติ หิรัญจิตต์. 2539. การกำจัดสีรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยกระบวนการร่วมของการดูดซับและโคแอกกูแลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัมพร อึ้งปรกรณ์แก้ว. 2540. เครื่องวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน(CHNS/O Analyzer). วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 6: 51-71.
- อรทัย ลีลาพจนานพร. 2550. Fourier Transform Infrared Spectrometer [online]. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ. แหล่งที่มา: www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/lpd_10_2546_ft-ir.pdf [19 มกราคม 2551]
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Al-Ghouti, M.A., Khraisheh, M.A., Allen, M.S.J., and Ahmad, M.N. 2003. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. Journal of Environmental Management. 69: 229-238.
- Al-Qodah, Z. 2006. Biosorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated sludge. Desalination. 196: 164-176.
- Brosillon, S., Djelal, H., Merienne, N., and Amrane, A. 2008. Innovative integrated process for the treatment of azo dyes: coupling of photocatalysis and biological treatment. Desalination. 222: 331-339.
- Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. 1978. Carbon adsorption handbook. Michigan : Ann Arbor Science.
- Faust, S.D., and Aly, O.M. 1987. Adsorption processes for water treatment. Stoneham : MA. Butterworth.
- Gulnaz , O., Kaya, A., and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials. 134: 190-196.
- Gulnaz, O., Kaya, A., Matyar, F., and Arikan, B. 2004. Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge. Journal of Hazardous Materials. B108: 183-188.
- Kargi, F., and Ozmihci, S. 2005. Comparison of adsorption performances of powdered activated sludge and powdered activated carbon for removal of turquoise blue dyestuff. Process Biochemistry. 40: 2539-2544.
- Martin, J. M., Artola, A., Balaguer, D. M., and Rigola, M. 2003. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions. Chemical Engineering Journal. 94: 231-239.
- Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater engineering: treatment disposal and reuse. 3rd edition. New York : McGraw-Hill.
- Otero, M., Rozada, F., Calvo, F. L., Garcia, I. A., and Morán, A. 2003. Kinetic and equilibrium modelling of the methylene blue removal from solution by adsorbent materials produced from sewage sludges. Biochemical Engineering Journal. 15: 59-68.

- Punyapalakul, P. 2004. Removal of alkylphenol polyethoxylates using hexagonal mesoporous silicate. Doctoral dissertation. Department of Engineering Graduate School The University of Tokyo.
- Punyapalakul, P., and Takizawa, S. 2006. Selective adsorption of nonionic surfactant on Hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes. Water Research. 40 : 3177-3184.
- Soonglendsongpha, S. 2006. Removal of haloacetic acid by adsorption on mesoporous silicates. The Master's Thesis. Department of Science Program in Environmental Management, Chulalongkorn University.
- Thuy, Q. 2006. Effect of acid/base treatment of powdered activated carbon on adsorption and membrane fouling in PAC-Microfiltration system (PAC-MF). Doctoral dissertation. Department of Engineering Graduate School The University of Tokyo.
- Valencia, G., and Gloyna, E.F. 1972. On the synthesis of activated carbon column design data. Technical report EHE-72-11 CRWR 90. Civil engineering department The University of Texas at Austin.
- Wang, J., Huang, C. P., Allen, H. E., Cha., D. K. and Kim., D. W. 1998. Adsorption Characteristics of dye onto sludge particulates. Journal of colloid and interface science. 208: 518-528.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ข้อมูลจลนศาสตร์การดูฉบับสื้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ข้อมูลจนศาสตร์การดูดซับสีย้อม

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลจนศาสตร์ดูดซับสีย้อมด้วย PAC

เวลา (นาที)	สีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สีย้อมเบสิก (BY1)					
	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-gt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-gt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	150.000	201.680	0.000	2.305	-	0.000	150.000	368.322	0.000	2.566	-	0.000
0.5	113.567	201.680	104.095	1.989	0.005	0.707	59.287	368.322	259.180	2.038	0.002	0.707
1	110.715	201.680	112.243	1.952	0.009	1.000	52.873	368.322	277.505	1.958	0.004	1.000
5	106.806	201.680	123.410	1.894	0.041	2.236	48.401	368.322	290.283	1.892	0.017	2.236
10	100.257	201.680	142.123	1.775	0.070	3.162	43.338	368.322	304.750	1.803	0.033	3.162
30	95.398	201.680	156.006	1.660	0.192	5.477	34.519	368.322	329.946	1.584	0.091	5.477
60	89.482	201.680	172.907	1.459	0.347	7.746	31.397	368.322	338.867	1.469	0.177	7.746
120	87.264	201.680	179.245	1.351	0.669	10.954	27.768	368.322	349.234	1.281	0.344	10.954
180	83.989	201.680	188.602	1.117	0.954	13.416	24.885	368.322	357.472	1.035	0.504	13.416
240	81.243	201.680	196.449	0.719	1.222	15.492	23.478	368.322	361.491	0.835	0.664	15.492
300	80.657	201.680	198.123	0.551	1.514	17.321	22.339	368.322	364.746	0.553	0.822	17.321
360	80.187	201.680	199.467	0.345	1.805	18.974	21.805	368.322	366.273	0.312	0.983	18.974
480	79.412	201.680	201.680	-	2.083	20.494	21.087	368.322	368.322	-	1.140	20.494

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสีย้อมด้วย A-PAC

เวลา (นาที)	สีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สีย้อมเบสิก (BY1)					
	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	150.000	119.914	0.000	2.079	-	0.000	150.000	411.240	0.000	2.614	-	0.000
0.5	135.150	119.914	42.429	1.889	0.012	0.707	58.907	411.240	260.265	2.179	0.002	0.707
1	138.286	119.914	33.469	1.937	0.030	1.000	52.156	411.240	279.554	2.120	0.004	1.000
5	129.575	119.914	58.357	1.789	0.086	2.236	42.916	411.240	305.955	2.022	0.016	2.236
10	125.045	119.914	71.299	1.687	0.140	3.162	28.063	411.240	348.391	1.798	0.029	3.162
30	118.774	119.914	89.219	1.487	0.336	5.477	21.650	411.240	366.715	1.649	0.082	5.477
60	114.244	119.914	102.160	1.249	0.587	7.746	15.968	411.240	382.950	1.452	0.157	7.746
120	115.289	119.914	99.174	1.317	1.210	10.954	13.591	411.240	389.741	1.332	0.308	10.954
180	109.714	119.914	115.102	0.682	1.564	13.416	7.177	411.240	408.065	0.502	0.441	13.416
240	108.321	119.914	119.084	-0.081	2.015	15.492	6.166	411.240	410.954	-0.544	0.584	15.492
300	108.245	119.914	119.300	-0.212	2.515	17.321	6.108	411.240	411.119	-0.919	0.730	17.321
360	108.450	119.914	118.714	0.079	3.032	18.974	6.122	411.240	411.079	-0.794	0.876	18.974
480	108.030	119.914	119.914	-	3.503	20.494	6.066	411.240	411.240	-	1.021	20.494

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสี่ข้อมด้วย B-PAC

เวลา (นาท)	สี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สี่ข้อมเบสิก (BY1)					
	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	150.000	197.757	0.000	2.296	-	0.000	150.000	393.076	0.000	2.594	-	0.000
0.5	112.933	197.757	105.905	1.963	0.005	0.707	58.316	393.076	261.953	2.118	0.002	0.707
1	113.567	197.757	104.095	1.972	0.010	1.000	41.565	393.076	309.813	1.920	0.003	1.000
5	107.863	197.757	120.392	1.889	0.042	2.236	52.156	393.076	279.554	2.055	0.018	2.236
10	98.567	197.757	146.952	1.706	0.068	3.162	36.671	393.076	323.797	1.841	0.031	3.162
30	95.398	197.757	156.006	1.621	0.192	5.477	27.684	393.076	349.476	1.639	0.086	5.477
60	90.327	197.757	170.493	1.436	0.352	7.746	23.253	393.076	362.134	1.491	0.166	7.746
120	86.208	197.757	182.264	1.190	0.658	10.954	19.484	393.076	372.903	1.305	0.322	10.954
180	81.771	197.757	194.940	0.450	0.923	13.416	16.544	393.076	381.302	1.071	0.472	13.416
240	81.877	197.757	194.638	0.494	1.233	15.492	14.350	393.076	387.571	0.741	0.619	15.492
300	81.724	197.757	195.074	0.428	1.538	17.321	13.675	393.076	389.500	0.553	0.770	17.321
360	81.137	197.757	196.751	0.003	1.830	18.974	13.028	393.076	391.348	0.238	0.920	18.974
480	80.785	197.757	197.757	-	2.124	20.494	12.423	393.076	393.076	-	1.068	20.494

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลจลนศาสตร์ดูดซับสีย้อมด้วย D-Sludge

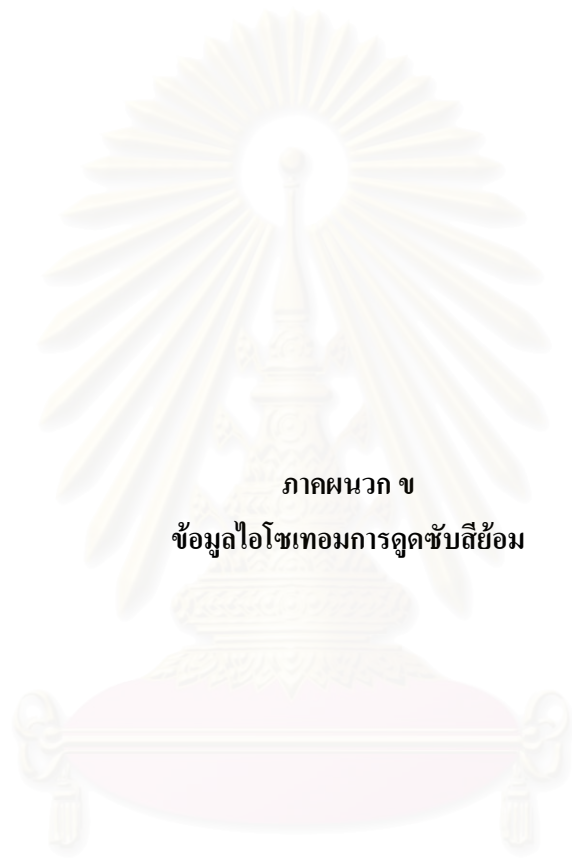
เวลา (นาท)	สีย้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สีย้อมเบสิก (BY1)					
	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log (q_c-qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	50.000	2991	0	3.476	-	0.000	50.000	22846	0	4.3588	-	0.000
0.5	46.105	2991	1948	3.019	0.0003	0.707	41.298	22846	4351	4.2671	0.0001	0.707
1	46.944	2991	1528	3.165	0.0007	1.000	14.589	22846	17705	3.7110	0.0001	1.000
5	45.301	2991	2350	2.807	0.0021	2.236	9.892	22846	20054	3.4459	0.0002	2.236
10	46.315	2991	1843	3.060	0.0054	3.162	6.544	22846	21728	3.0485	0.0005	3.162
30	45.580	2991	2210	2.893	0.0136	5.477	5.996	22846	22002	2.9263	0.0014	5.477
60	45.580	2991	2210	2.893	0.0272	7.746	5.194	22846	22403	2.6464	0.0027	7.746
120	44.449	2991	2776	2.334	0.0432	10.954	4.730	22846	22635	2.3242	0.0053	10.954
180	44.477	2991	2761	2.361	0.0652	13.416	4.449	22846	22776	1.8471	0.0079	13.416
240	44.018	2991	2991	-	0.0802	15.492	4.308	22846	22846	-	0.0105	15.492

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลจลนศาสตร์คูชับสี่ข้อมด้วย A-Sludge

เวลา (นาทึ)	สี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สี่ข้อมเบติก (BY1)					
	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log(q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log(q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	50.000	2129	0	3.328	-	0.000	50.000	24122	0	4.3824	-	0.000
0.5	46.683	2129	1659	2.672	0.0003	0.707	32.916	24122	8542	4.1926	0.0001	0.707
1	46.265	2129	1868	2.417	0.0005	1.000	30.552	24122	9724	4.1583	0.0001	1.000
5	46.927	2129	1537	2.773	0.0033	2.236	22.622	24122	13689	4.0184	0.0004	2.236
10	46.230	2129	1885	2.387	0.0053	3.162	9.476	24122	20262	3.5866	0.0005	3.162
30	46.578	2129	1711	2.621	0.0175	5.477	2.524	24122	23738	2.5850	0.0013	5.477
60	46.474	2129	1763	2.563	0.0340	7.746	2.063	24122	23969	2.1871	0.0025	7.746
120	46.927	2129	1537	2.773	0.0781	10.954	2.007	24122	23997	2.0999	0.0050	10.954
180	46.822	2129	1589	2.732	0.1133	13.416	1.853	24122	24073	1.6898	0.0075	13.416
240	45.742	2129	2129	-	0.1127	15.492	1.755	24122	24122	-	0.0099	15.492

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลจลนศาสตร์คูชับสี่ข้อมด้วย B-Sludge

เวลา (นาท)	สี่ข้อมรีแอกทีฟ (RB5)						สี่ข้อมเบติก (BY1)					
	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log(q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$	ความเข้มข้นสี่ ข้อม (มก./ล.)	q_c	q_t	$\log(q_c - qt)$	t/q_t	$t^{0.5}$
0	50.000	2243	0	3.351	-	0.000	50.000	22804	0	4.3580	-	0.000
0.5	49.713	2243	643	3.204	0.0008	0.707	41.298	22804	4351	4.2661	0.0001	0.707
1	49.287	2243	857	3.142	0.0012	1.000	16.305	22804	16847	3.7750	0.0001	1.000
5	49.182	2243	1409	2.921	0.0035	2.236	8.007	22804	20996	3.2570	0.0002	2.236
10	48.531	2243	1734	2.707	0.0058	3.162	5.447	22804	22276	2.7222	0.0009	4.472
30	48.308	2243	1846	2.599	0.0163	5.477	4.983	22804	22508	2.4703	0.0018	6.325
60	48.168	2243	1916	2.515	0.0313	7.746	4.828	22804	22586	2.3385	0.0027	7.746
120	46.007	2243	1997	2.392	0.0601	10.954	4.491	22804	22755	1.6922	0.0053	10.954
180	45.710	2243	2145	1.993	0.0839	13.416	4.392	22804	22804	-	0.0079	13.416
240	45.514	2243	2243	-	0.1070	15.492	-	-	-	-	-	-



ภาคผนวก ข
ข้อมูลไอโซโทมการดูดซับสี่ข้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอม

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
110	0.0340	4.26	311.0	0.0032	0.2350	2.4928	0.6289
130	0.0402	4.44	312.3	0.0032	0.2251	2.4946	0.6477
150	0.0444	3.65	329.6	0.0030	0.2739	2.5180	0.5624
170	0.0342	12.38	460.9	0.0022	0.0808	2.6636	1.0926
200	0.0338	46.09	455.3	0.0022	0.0217	2.6583	1.6636
250	0.0322	93.07	487.3	0.0021	0.0107	2.6878	1.9688
300	0.0362	131.87	464.5	0.0022	0.0076	2.6669	2.1201

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย A-PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
80	0.0312	1.67	251.1	0.0040	0.5985	2.3998	0.2229
110	0.0312	2.74	343.8	0.0029	0.3656	2.5363	0.4370
150	0.0380	4.16	383.8	0.0026	0.2402	2.5841	0.6195
200	0.0348	28.17	493.8	0.0020	0.0355	2.6935	1.4498
250	0.0360	54.64	542.7	0.0018	0.0183	2.7345	1.7375
300	0.0332	121.73	537.0	0.0019	0.0082	2.7299	2.0854

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย B-PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
110	0.0364	1.22	298.8	0.0033	0.8179	2.4754	0.0873
130	0.0350	2.06	365.5	0.0027	0.4847	2.5629	0.3145
150	0.0350	12.20	393.7	0.0025	0.0820	2.5952	1.0863
170	0.0351	20.87	424.9	0.0024	0.0479	2.6283	1.3196
200	0.0354	44.44	439.4	0.0023	0.0225	2.6429	1.6478
220	0.0345	57.89	469.9	0.0021	0.0173	2.6720	1.7626
250	0.0350	88.06	462.7	0.0022	0.0114	2.6653	1.9448
280	0.0350	112.51	478.5	0.0021	0.0089	2.6799	2.0512

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย D-Sludge

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
30	0.1991	2.23	13.9	0.0717	0.4482	1.1445	0.3485
40	0.2001	3.23	18.4	0.0544	0.3100	1.2643	0.5086
50	0.2000	3.65	23.2	0.0431	0.2743	1.3651	0.5618
80	0.2000	13.41	33.3	0.0300	0.0746	1.5224	1.1273
100	0.2007	22.50	38.6	0.0259	0.0444	1.5868	1.3521
150	0.2009	40.49	54.5	0.0183	0.0247	1.7365	1.6074

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย A-Sludge

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
30	0.2000	3.20	13.4	0.0746	0.3127	1.1271	0.5048
40	0.2000	3.28	18.4	0.0545	0.3047	1.2639	0.5161
50	0.2000	3.73	23.1	0.0432	0.2681	1.3643	0.5717
80	0.2000	15.80	32.1	0.0312	0.0633	1.5065	1.1987
100	0.2000	23.87	38.1	0.0263	0.0419	1.5805	1.3778
150	0.2000	39.28	55.4	0.0181	0.0255	1.7432	1.5941

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมเบสิกด้วย B-Sludge

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
30	0.1956	0.90	14.9	0.0672	1.1104	1.1725	-0.0455
40	0.2000	0.98	19.5	0.0513	1.0156	1.2902	-0.0067
80	0.2044	3.66	37.3	0.0268	0.2732	1.5723	0.5634
100	0.2060	9.12	44.1	0.0227	0.1096	1.6446	0.9601
150	0.2016	32.82	58.1	0.0172	0.0305	1.7644	1.5161

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
75	0.0348	6.72	196.2	0.0051	0.1489	2.2927	0.8271
110	0.0344	29.67	233.5	0.0043	0.0337	2.3683	1.4724
130	0.0348	51.29	226.2	0.0044	0.0195	2.3544	1.7101
150	0.0346	63.79	249.2	0.0040	0.0157	2.3965	1.8048
170	0.0346	82.88	251.8	0.0040	0.0121	2.4011	1.9184
250	0.0374	155.38	253.0	0.0040	0.0064	2.4031	2.1914

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย A-PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
75	0.0348	8.43	191.3	0.0052	0.1186	2.2817	0.9261
110	0.0412	14.68	231.4	0.0043	0.0681	2.3643	1.1667
130	0.0408	36.93	228.1	0.0044	0.0271	2.3582	1.5673
150	0.0384	61.66	230.0	0.0043	0.0162	2.3618	1.7900
170	0.0364	86.12	230.4	0.0043	0.0116	2.3626	1.9351
200	0.0372	114.89	228.8	0.0044	0.0087	2.3594	2.0603
250	0.0424	149.28	237.6	0.0042	0.0067	2.3758	2.1740
300	0.0312	230.68	222.2	0.0045	0.0043	2.3467	2.3630

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย B-PAC

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
75	0.0348	8.43	191.3	0.0052	0.1186	2.2817	0.9261
110	0.0346	25.13	245.3	0.0041	0.0398	2.3897	1.4002
130	0.0348	38.90	261.8	0.0038	0.0257	2.4179	1.5899
150	0.0356	53.86	270.0	0.0037	0.0186	2.4314	1.7313
170	0.0358	73.33	270.0	0.0037	0.0136	2.4314	1.8653
200	0.0376	100.80	263.8	0.0038	0.0099	2.4213	2.0035
250	0.0356	153.62	270.7	0.0037	0.0065	2.4326	2.1864
300	0.0344	211.36	257.7	0.0039	0.0047	2.4111	2.3250

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย D-Sludge

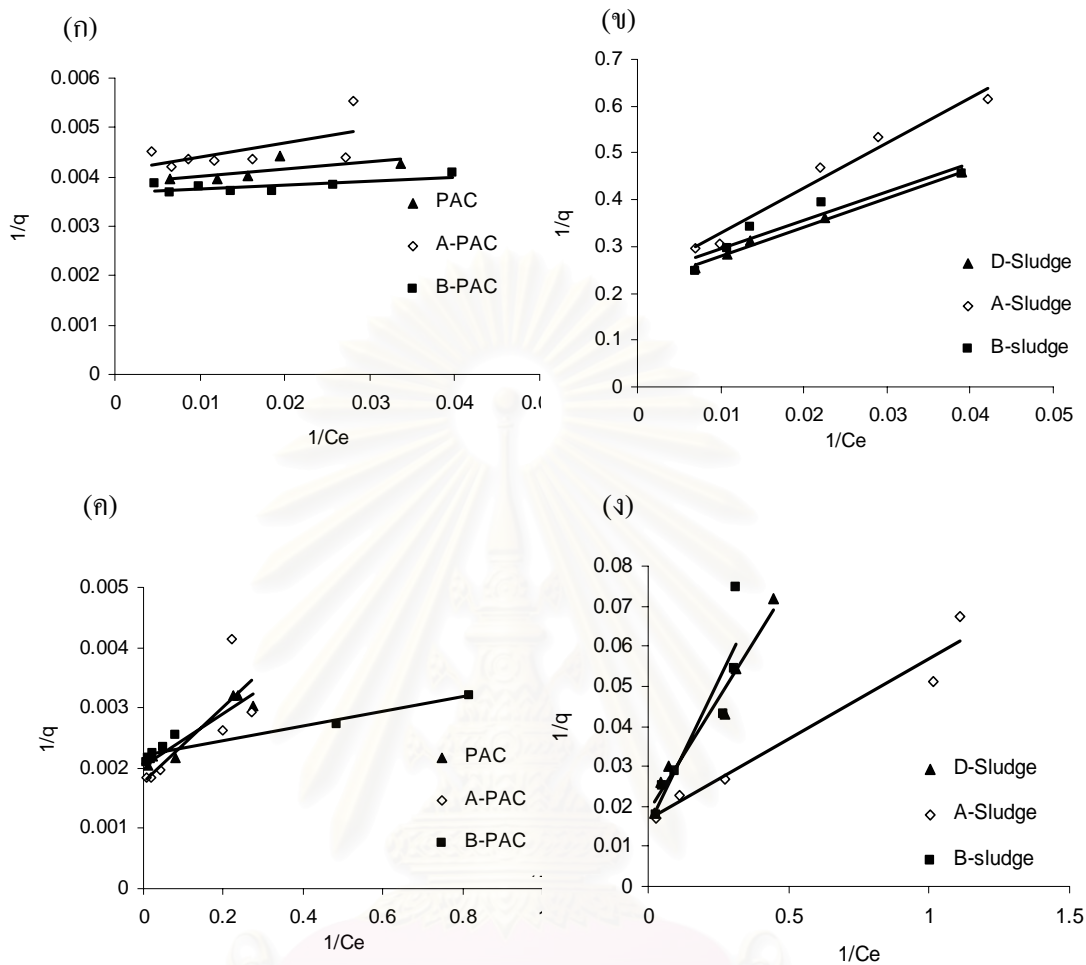
ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
10	0.1998	7.93	1.0	0.9646	0.1261	0.0157	0.8992
30	0.2007	25.62	2.2	0.4578	0.0390	0.3394	1.4085
50	0.2008	44.43	2.8	0.3602	0.0225	0.4435	1.6476
80	0.2006	73.57	3.2	0.3122	0.0136	0.5056	1.8667
100	0.2004	92.89	3.5	0.2820	0.0108	0.5497	1.9680
150	0.1987	142.21	3.9	0.2552	0.0070	0.5931	2.1529

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย A-Sludge

ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
27	0.2000	23.74	1.6	0.6144	0.0421	0.2115	1.3756
38	0.1800	34.63	1.9	0.5340	0.0289	0.2725	1.5394
50	0.2068	45.58	2.1	0.4680	0.0219	0.3297	1.6588
110	0.2516	101.74	3.3	0.3045	0.0098	0.5164	2.0075
150	0.1987	143.30	3.4	0.2967	0.0070	0.5277	2.1563

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วย B-Sludge

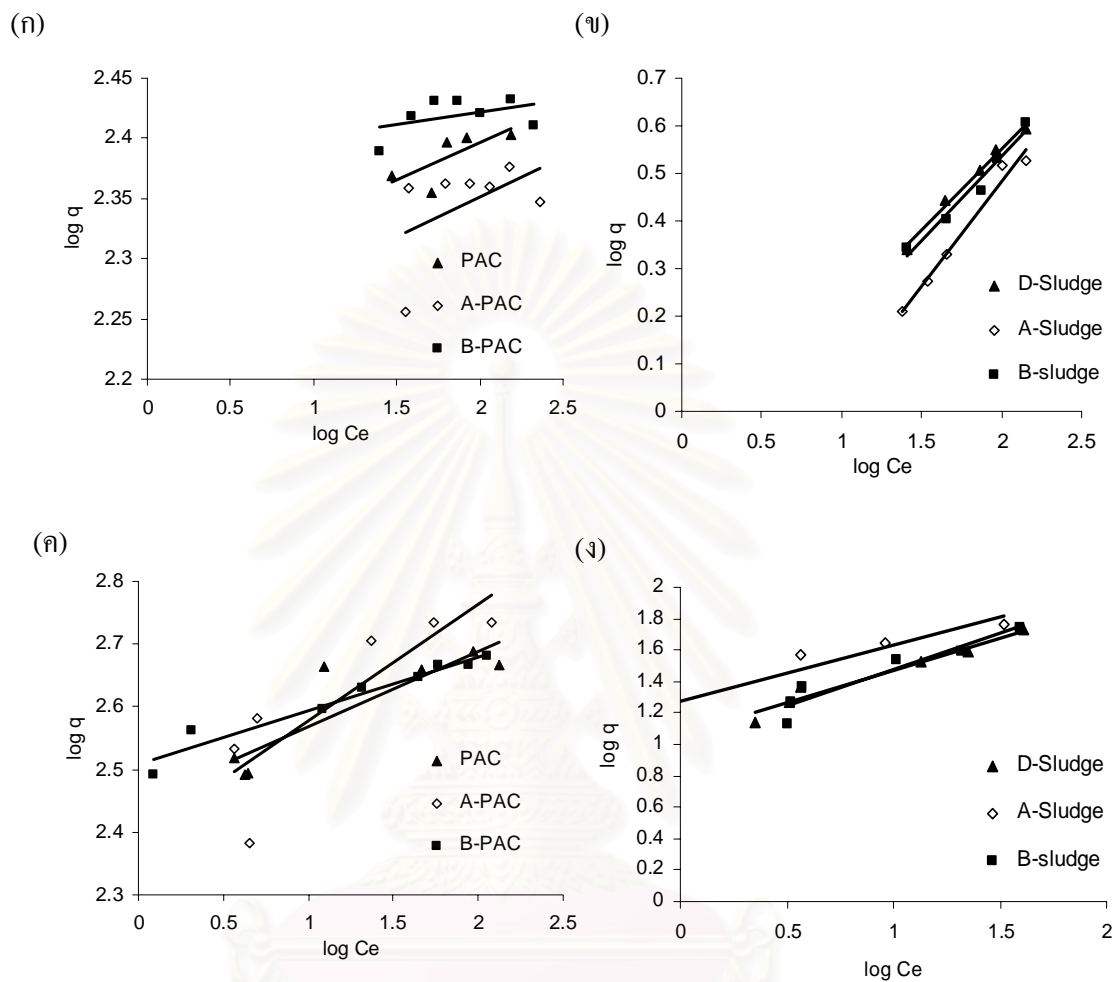
ความเข้มข้น สี่ข้อมเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนักสาร ดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี่ ข้อมที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
10	0.2003	9.09	0.5	2.1892	0.1101	-0.3403	0.9583
30	0.2008	25.58	2.2	0.4545	0.0391	0.3425	1.4079
50	0.1986	43.95	3.0	0.3282	0.0228	0.4838	1.6429
80	0.1993	72.18	3.9	0.2549	0.0139	0.5937	1.8584
100	0.2004	91.53	4.2	0.2367	0.0109	0.6258	1.9616
150	0.2004	140.89	4.5	0.2199	0.0071	0.6577	2.1489



ภาพที่ ข-1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

(ก) และ (ข) สีย้อมรีแอกทีฟ (RB5) (ค) และ (ง) สีย้อมเบสิก (BY1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข-2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

(ก) และ (ข) สีซ้อมรีแอกทีฟ (RB5) (ค) และ (ง) สีซ้อมเบติก (BY1)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการศึกษาสมการเทอร์โมไดนามิกส์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค ข้อมูลการคำนวณจากสมการเทอร์โมไดนามิกส์

สมการเทอร์โมไดนามิกส์

$$K_c = \frac{q_c}{C_c}$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}$$

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

ΔS° = ค่าความต่างของเอนโทรปี (Entropy)

ΔH° = ค่าความต่างของเอนทาลปี (Enthalpy)

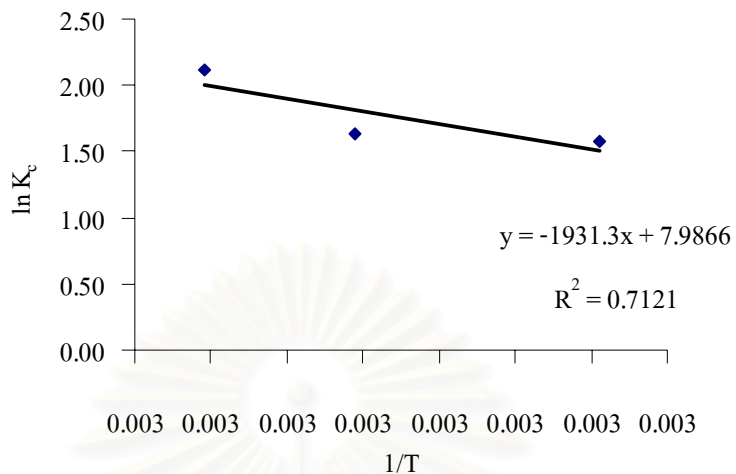
ΔG° = ค่าความต่างของพลังงานอิสระ (Free Energy)

R = the universal gas constant, $8.31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

ค่า ΔH° และ ΔS° คำนวณได้จาก slope และ intercept ตามลำดับ

ตารางที่ ค-1 ตัวอย่างการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีช้อมเบสิกด้วย PAC

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)	K_c	$\ln K_c$	1/T	ΔG°
25	298	4.8348	1.57584	0.003356	-3902.38
40	313	5.115	1.632177	0.003195	-4245.34
50	323	8.3423	2.121339	0.003096	-5693.95



ภาพที่ ค-1 ตัวอย่างเทอร์โมไดนามิกส์

สมการที่ได้จากกราฟ $y = -1.931.3x + 7.9866$

$$\Delta S^\circ/R = 7.9866$$

$$\Delta S^\circ = 66.369$$

$$\Delta H^\circ/R = 1931.3$$

$$\Delta H^\circ = 16049.1$$

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลจากการคำนวณสมการเทอร์โมไดนามิกส์

สารดูดซับ	สี่เหลี่ยมเบสิก		สี่เหลี่ยมรีแอกทีฟ	
	ΔS°	ΔH°	ΔS°	ΔH°
D-Sludge	-2.14	-1862.52	87.17	33818.38
A-Sludge	8.98	675.33	111.37	41508.45
B-Sludge	-40.67	-13359.99	-2.14	14824.21
PAC	66.37	16049.10	-29.34	-10984.16
A-PAC	41.45	7996.88	4.45	332.52
B-PAC	47.65	9889.73	38.58	9771.73



ภาคผนวก ง

รายละเอียดการวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

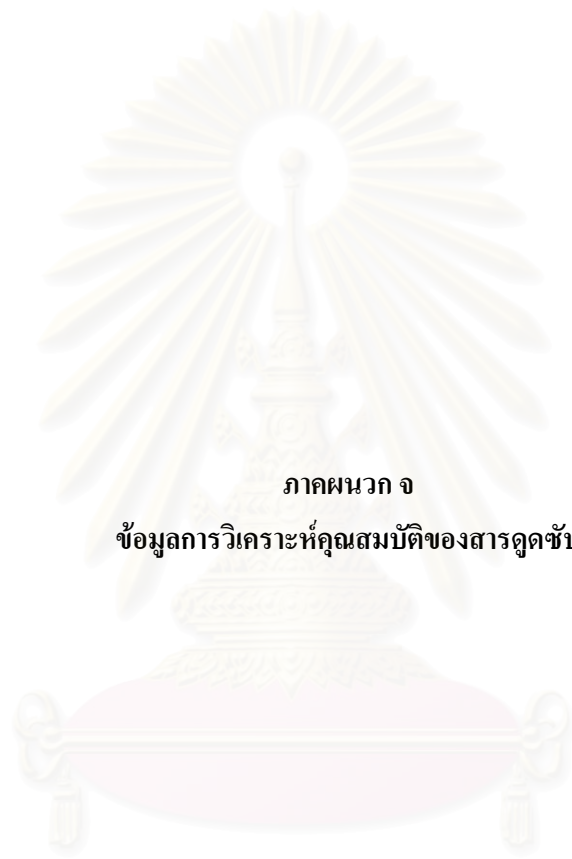
ภาคผนวก ง รายละเอียดการวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)**รายละเอียดการวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)**

(Punyapalakul, 2004)

เครื่องมือ	: HPLC และ UV/ Visible detector
ความยาวคลื่น	: 275 นาโนเมตร
คอลัมน์	: 10 μm -Lichrosorb-NH ₂ ขนาด 250 มิลลิเมตร x 4.6 มิลลิเมตร
Mobile phase	: A; n-Hexane/ 2-propanol (9/1) , B; 2-propanol/water (9/1) เริ่มต้น A:B (97:3) – 30 นาที A/B (37:63) Linear gradient
อัตราการไหล	: 1.5 มิลลิตรต่อนาที
ปริมาณการฉีดตัวอย่าง	: 50 ไมโครลิตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

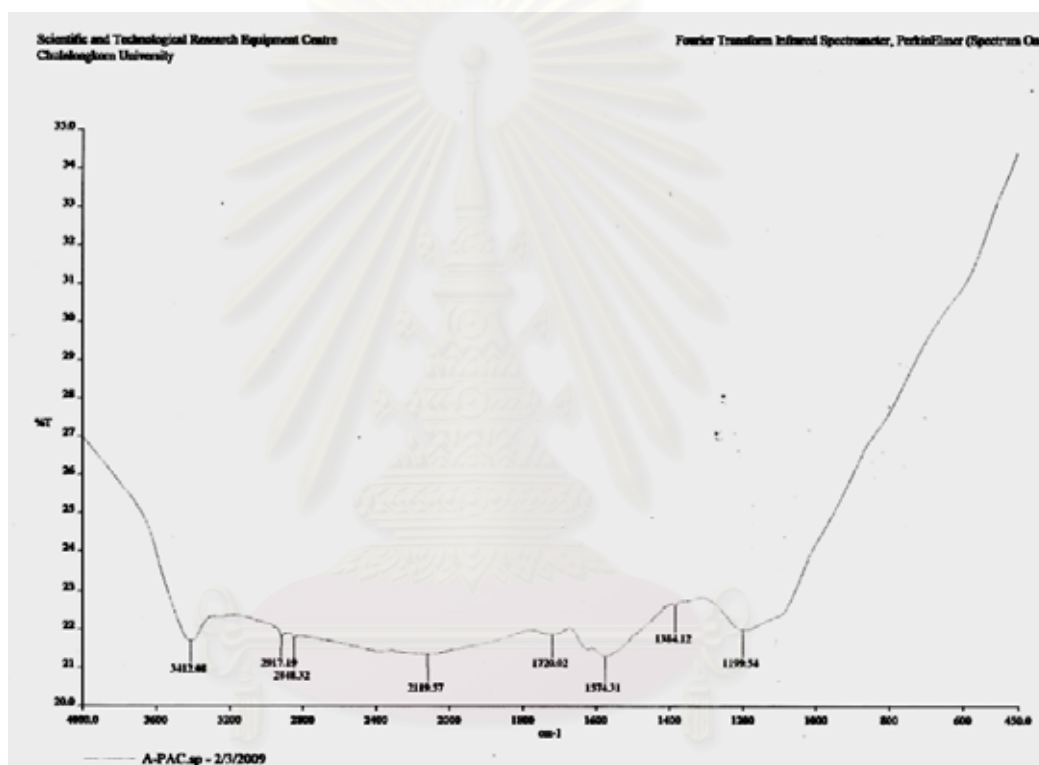
ข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

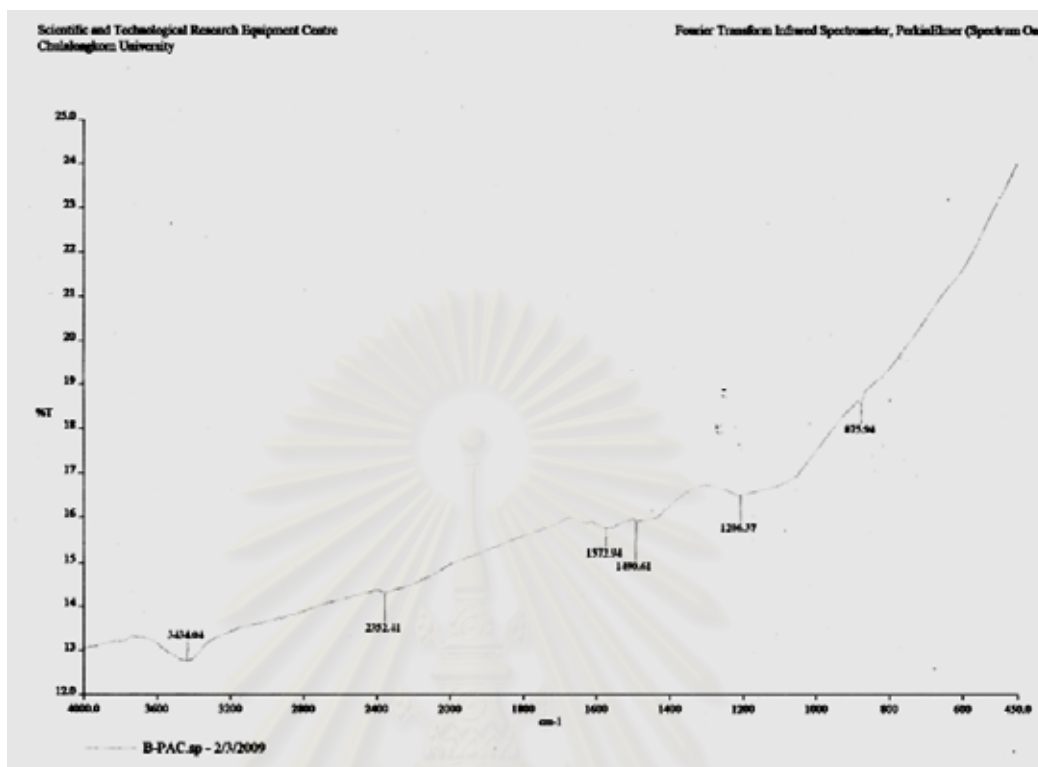
ภาคผนวก จ ข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารดูดซับ

1. การตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันของสารดูดซับ

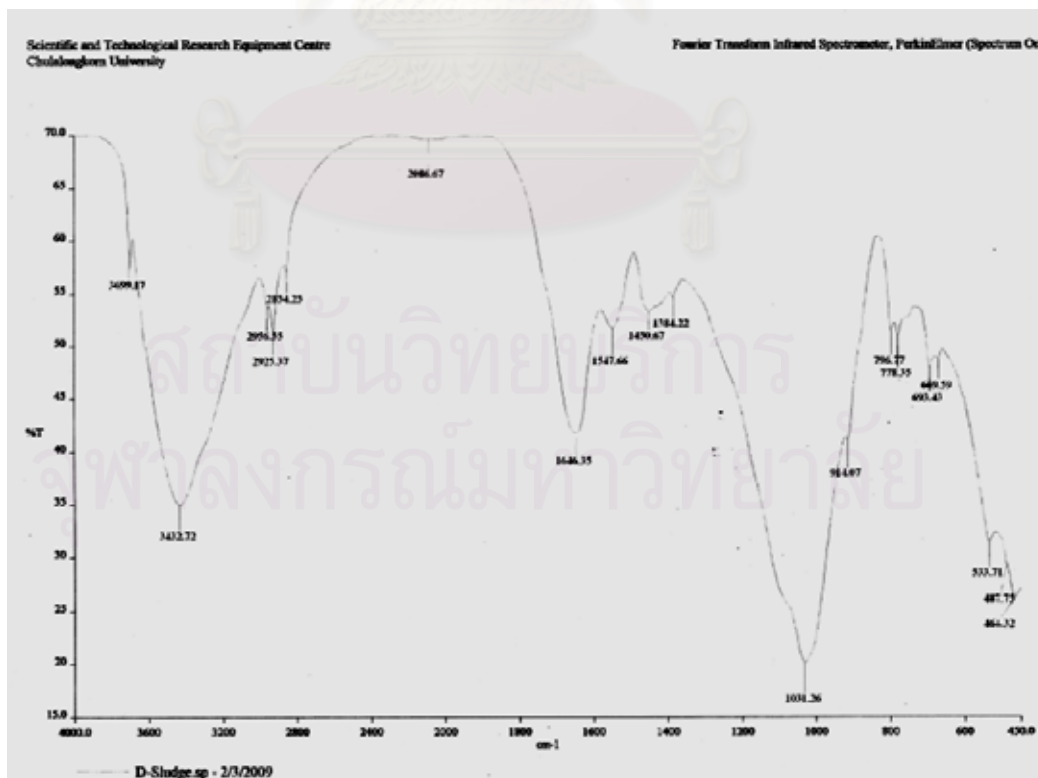
เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR Spectrometer (FT-IR) โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแสดงผลดังภาพที่ จ-1 - จ-5



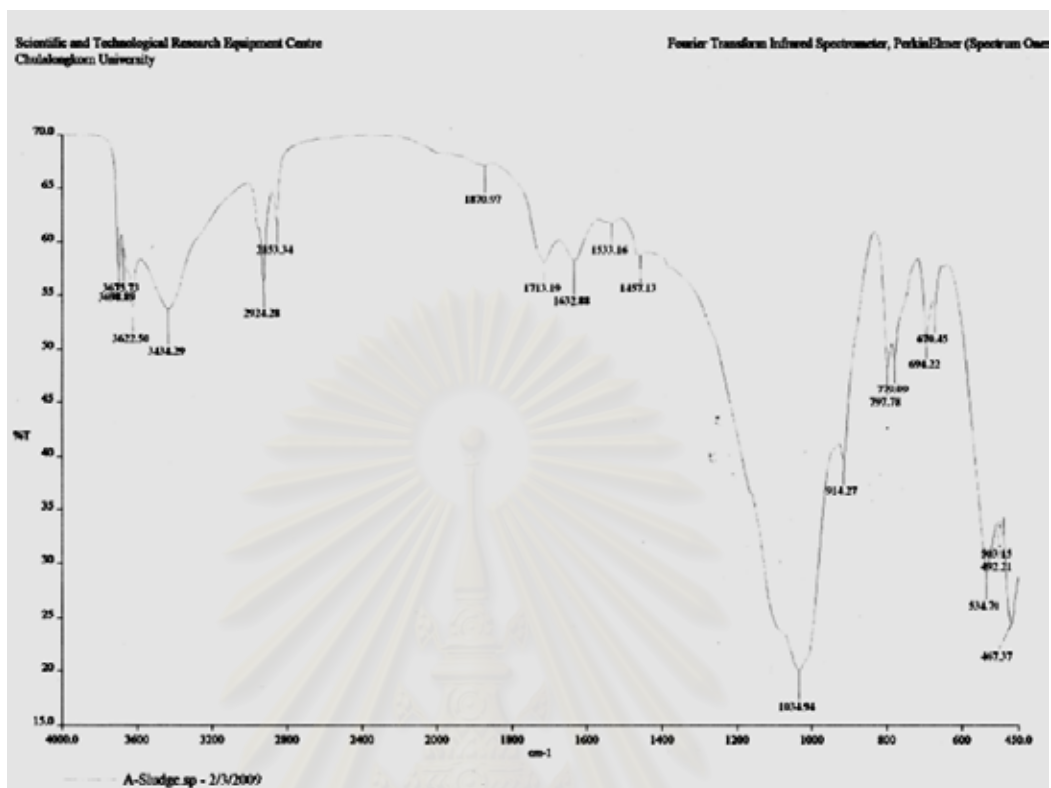
ภาพที่ จ-1 FT-IR ของ A-PAC



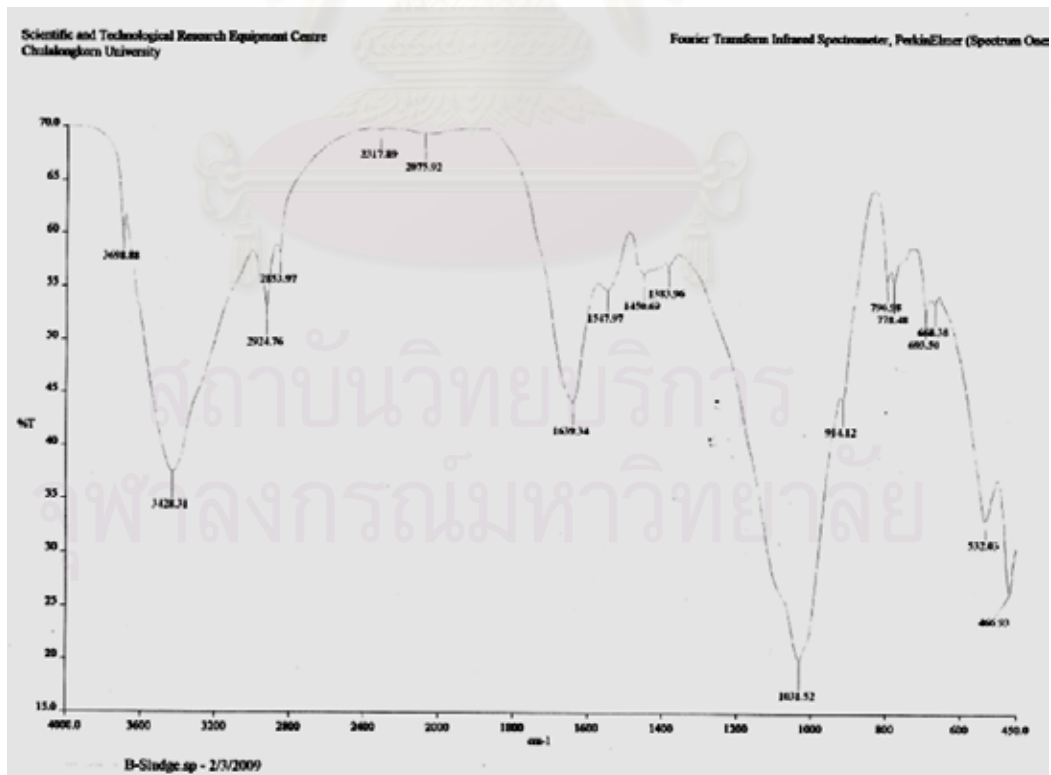
ภาพที่ จ-2 FT-IR ของ B-PAC



ภาพที่ จ-3 FT-IR ของ D-Sludge



ภาพที่ จ-4 FT-IR ของ A-Sludge



ภาพที่ จ-5 FT-IR ของ B-Sludge

2. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวสารดูดซับ

วิเคราะห์พื้นที่ผิวสารดูดซับโดยส่งวิเคราะห์ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงดังนี้

- เครื่องมือรุ่น Atosorb 1C , Quantachrome Instrument, U.S.A.
- การเตรียมตัวอย่าง Outgas ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่าง A-Sludge B-Sludge และ D-Sludge
- การเตรียมตัวอย่าง Outgas ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่าง A-PAC และ B-PAC

รายงานผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ จ-6 – จ-7



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2552

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ได้ดำเนินการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะตามคำร้องขอรับบริการวิเคราะห์ตัวอย่างของนางสาวปรางศิริ ศรีศุกพัชร ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เสร็จเรียบร้อยแล้ว ปรากฏผลดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
A-PAC	1,025.50
B-PAC	1,051.53
A-Sludge	26.46
B-Sludge	12.94
D-Sludge	8.62

ลงชื่อ
(นางสาววรรณิ ศรีนุดตระกุล)

ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์
ผู้รายงาน

ลงชื่อ
(นางสาวนิภาวรรณ ปรมาริกุล)

ตำแหน่ง วิศวกรรมการแทนผู้ชำนาญการกุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์

ภาพที่ จ-6 หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ



หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2552

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ได้ดำเนินการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ
ตามคำร้องขอรับบริการวิเคราะห์ตัวอย่างของนางสาวปราณี ศรีสุภพัชร ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เสร็จเรียบร้อยแล้ว ปรากฏผลดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	พื้นที่ผิวภายนอก (m ² /g)
A-PAC	1,025.50	416.6
B-PAC	1,051.53	463.4

ลงชื่อ (นางสาววรรณิ ศรีนุศตระกูล) ลงชื่อ (นางสาวนิภาวรรณ ปรมายุก)

ตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ ตำแหน่ง วิศวกรแทนผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์
ผู้รายงาน

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ จ-7 หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และพื้นที่ผิวภายนอก

3. ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของสารดูดซับ

เครื่องมือวิเคราะห์ CHN Elemental analyzer โดยส่งวิเคราะห์ที่ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยรายงานผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่

จ-8

FM		
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7529-8 โทรสาร 0-2255-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการแก้ไข 0 หน้า 1

วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2552

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการทดสอบหาปริมาณ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ผู้ส่งตัวอย่าง : ...นางสาวปรางศรี ศรีศุกพัชร.....โบเสนราคาแตรที่...CT0062/52.....
 หน่วยงาน : ...ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ
 ชนิดตัวอย่าง : ...เก็บปราง
 วันที่รับตัวอย่าง : ...28 มกราคม 2552... วันที่วิเคราะห์ : 3 กุมภาพันธ์ 2552
 เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : ... CHN Elemental analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ LEGO
 สภาพการวิเคราะห์ : ...อุณหภูมิวิเคราะห์ 950 °C...
 มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -
 ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)
1	A-Sludge	10.07	1.718	0.578
2	B-Sludge	16.49	3.095	2.149
3	D-Sludge	17.85	3.163	2.660

รับของผลการวิเคราะห์ถูกต้อง


 (นางอารยา อินทร์ศิริ)
 นักวิทยาศาสตร์
 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2552


 (ผศ.ดร. วรวิศ อามจันทร์ศิริชัย)
 หัวหน้าห้องปฏิบัติการเครื่องมือวิเคราะห์
 วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2552

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้จนถึงส่วนรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
 2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

เลขที่	ผู้รับ	วันที่รับ	สถานที่รับ	ชื่อผู้รับ	ตำแหน่ง	ผู้ส่ง	วันที่ส่ง	ชื่อผู้ส่ง

ภาพที่ จ-8 รายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรางศิริ ศรีศุภพัชร เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2527 ที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สวนกุหลาบวิทยาลัย ปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี ปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย