

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมบนถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษ
ด้วยการเคลือบไคโตซานและเติมอากาศ



นางสาวปนัดดา โลหะสาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCEMENT OF DYES ADSORPTION EFFICIENCY ON ACTIVATED CARBON
FROM PAPER PULP SLUDGE BY CHITOSAN COAT AND AERATION



Miss Panadda Lohasarn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบนถ่านกัมมันต์จากกาก
ตะกอนเยื่อกระดาษด้วยการเคลือบโคโคซานและเติมอากาศ

โดย

นางสาวปนัดดา โลหะสาร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล

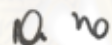
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



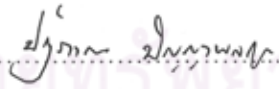
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเจียร)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)



.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)



.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นุชยฤทธิ ปัญญาภิญญาผล)

ปนัดดา โลหะสาร : การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบนถ่านกัมมันต์จากกากตะกอน
 เชื้อกระดาษด้วยการเคลือบไคโตซานและเติมอากาศ (ENHANCEMENT OF DYES
 ADSORPTION EFFICIENCY ON ACTIVATED CARBON FROM PAPER PULP
 SLUDGE BY CHITOSAN COAT AND AERATION) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 ดร.พิศุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ; 202 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเคลือบถ่านกัมมันต์จากกากตะกอน
 เชื้อกระดาษ (SAC) ด้วยไคโตซาน การเติมอากาศ พีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
 สีประเภท Reactive Black 5 (RB5) และสี Basic Yellow 1 (BY1) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ
 ดูดซับสีย้อมดังกล่าวบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (PAC) โดยทำการศึกษาลักษณะทาง
 กายภาพ จลนศาสตร์ และไอโซเทอมการดูดซับในสภาวะต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 สูงที่สุดที่
 พีเอช 9 เท่ากับ 298.76 และ 538.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับการดูดซับสี RB 5 พบว่า
 ถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษชนิดเคลือบไคโตซาน (CH-SAC) มีความสามารถในการ
 ดูดซับสี RB 5 สูงที่สุดที่พีเอช 5 เท่ากับ 151.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า SAC ที่มีค่าสูงสุดที่
 พีเอช 7 เท่ากับ 130.02 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการดูดซับสี BY 1 พบว่าถ่าน CH-SAC มี
 ความสามารถในการดูดซับสี BY 1 สูงที่สุดที่พีเอช 9 เท่ากับ 187.98 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า
 SAC ที่มีค่าสูงสุดที่พีเอช 9 เท่ากับ 157.70 มิลลิกรัมต่อกรัม การเติมอากาศที่อัตราการไหลของก๊าซ
 0.6 ลิตรต่อนาที ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสี RB 5 ใกล้เคียงกับการกวนผสมด้วยความเร็ว
 รอบ 200 รอบต่อนาที และการเติมอากาศจะส่งผลดีต่อการดูดซับสี BY 1 บนถ่านกัมมันต์ทุกชนิด
 โดยการดูดซับสี RB 5 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่
 การดูดซับสี BY 1 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ปนัดดา โลหะสาร.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2551.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970421021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION/ ACTIVATED CARBON/ DYE/ PAPER PULP SLUDGE/
CHITOSAN

PANADDA LOHASARN : ENHANCEMENT OF DYES ADSORPTION
EFFICIENCY ON ACTIVATED CARBON FROM PAPER PULP SLUDGE BY
CHITOSAN COAT AND AERATION. ADVISOR : PISUT PEANMANAKUL, Ph.D.,
CO-ADVISOR : PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D 202 pp.

The objective of this study is to investigated the effect of chitosan coating on activated carbon made from paper pulp sludge (SAC) on adsorption efficiency of Reactive Black 5 (RB 5) and Basic Yellow 1 (BY 1), comparing with powder activated carbon (PAC). The effects of aeration pH and temperature were studied. The data concerning to physico-chemical characterization, adsorption kinetic and isotherm in various conditions were applied to evaluate the adsorption mechanism.

From obtained data, PAC had the highest adsorption efficiency for RB 5 and BY 1 at pH 9 equal to 298.76 and 538.63 mg/g, respectively. Highest adsorption efficiency for RB 5 obtained with chitosan coated SAC (CH-SAC) at pH 5 (151.60 mg/g) was higher than that obtained with the SAC at pH 7 (130.02 mg/g). For the adsorption of BY 1, CH-SAC can provide the highest adsorption at pH 9 (187.98 mg/g) and higher than obtained with SAC at pH 9 (157.70 mg/g). Due to the aeration process, The air flow rate of 0.6 L/m shows the result similar to the stirring mixer with the speed at 200 rpm. The remarkable effect of aeration can be observed on the BY 1 adsorption on all adsorbents. Adsorption of RB 5 had the highest efficiency at 25 °C under exothermic reaction, whereas in the case of adsorption of BY 1, the highest efficiency can be found at 55 °C under endothermic reaction.

Department : Environmental Engineering Student's Signature Pone
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature Pist P.
Academic Year : 2008 Co- Advisor's Signature P. R.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องมาจากได้รับความช่วยเหลือและคำปรึกษาโดยตลอดจาก ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และช่วยเหลือค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะข้อควรแก้ไขจนทำให้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์พร้อมทั้งให้ความกรุณาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี จึงขอกราบ ขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ รวมทั้งเครื่องมือทางเทคนิค ตลอดจนงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือรวมทั้งบุคคลอื่นที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดทุกท่าน และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุน งานวิจัยและสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนค่าเล่าเรียน คอยช่วยเหลือค่าใช้จ่ายบางส่วนในงานวิจัย และคอยให้กำลังใจอันเป็นแรงผลักดันให้งานวิจัยสำเร็จ ลุล่วง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	5
2.2 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	22
2.3 กระบวนการดูดติดผิว.....	27
2.4 ถ่านกัมมันต์.....	38
2.5 ไคโตซาน.....	50
2.6 กากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	52
2.7 การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส.....	55
2.8 การกวนผสมและการเติมอากาศโดยอุปกรณ์กำเนิดฟอง.....	64
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	68
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	73
3.1 รูปแบบการดำเนินการศึกษา.....	73
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	73
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	76
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	98
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายรูปและทางเคมีของของตัวกลางดูดซับ.....	98

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับบนถ่านกัมมันต์.....	104
4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	113
4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของการเติมอากาศต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	121
4.5 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	149
4.6 การศึกษาค่าใช้จ่ายผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	165
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	167
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	167
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	171
รายการอ้างอิง.....	172
ภาคผนวก.....	176
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	202

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกสีข้อมตามลักษณะการใช้งานของสีประเภทต่างๆ กับเส้นใยชนิดต่างๆ.....	10
2.2 การนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....	38
3.1 กำหนดค่าและประเภทตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	76
3.2 มวลโมเลกุลสีข้อมและความยาวคลื่นที่ใช้ตรวจวัด.....	77
3.3 คุณสมบัติของกากตะกอนเยื่อกระดาษ.....	79
3.4 การศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางดูดซับ.....	83
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	98
4.2 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับ สี RB 5 ของตัวกลางดูดซับ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm.....	107
4.3 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับ สี BY 1 ของตัวกลางดูดซับ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm.....	112
4.4 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ของตัวกลางดูดซับในการดูดซับสี RB 5 ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และพีเอช 9 ภายใต้อุณหภูมิ 25° C และกวนด้วยความเร็ว รอบ 200 rpm.....	116
4.5 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ของตัวกลางดูดซับในการดูดซับสี BY 1 ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และพีเอช 9 ภายใต้อุณหภูมิ 25° C และกวนด้วยความเร็ว รอบ 200 rpm.....	119
4.6 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับ สี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C.....	122
4.7 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับ สี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C.....	124
4.8 ค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสี RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศ.....	128
4.9 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี BY 1 ภายใต้สภาวะ ที่มีการเติมอากาศ.....	131
4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Qg) ที่มีต่อความถี่ในการเกิดฟอง (f _g) ในการดูดซับสี RB 5.....	140

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Q_g) ที่มีต่อความถี่ในการเกิดฟอง (f_b) ในการดูดซับสี BY 1.....	142
4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Q_g) ต่ออัตราส่วน a / G ในการดูดซับสี RB5	146
4.13 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Q_g) ต่ออัตราส่วน a / G ในการดูดซับสี BY 1	148
4.14 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C	150
4.15 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C	150
4.16 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	152
4.17 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	152
4.18 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C	156
4.19 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C	157
4.20 ค่าคงที่อุณหพลศาสตร์ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	158
4.21 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	161
4.22 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	161

ตารางที่	หน้า	
4.23	ค่าคงที่อุณหภูมิพลศาสตร์ในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และการเติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C.....	162
4.24	ตารางคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์หนึ่งกิโลกรัม	165
4.25	ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับเฉลี่ยเท่ากัน.....	166
5.1	สรุปผลการศึกษาดนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์	168
5.2	สรุปสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของตัวกลางดูดซับที่อุณหภูมิ 25° C	169
5.3	สรุปรูปแบบการกวนผสมที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของตัวกลางดูดซับที่อุณหภูมิ 25° C.....	169
5.4	สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของตัวกลางดูดซับ.....	170
ผ.1	ปริมาณสี RB 5 ที่สามารถดูดซับต่อปริมาณถ่าน 1 กรัม และสัมประสิทธิ์การแพร่ ที่มีการเติมอากาศ	177
ผ.2	ปริมาณสี BY 1 ที่สามารถดูดซับต่อปริมาณถ่าน 1 กรัม และสัมประสิทธิ์การแพร่ ที่มีการเติมอากาศ	178

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ..... 6
2.2	ตัวอย่างของโครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ..... 13
2.3	การสังเคราะห์สีรีแอคทีฟชนิด triazine..... 13
2.4	หมู่ที่หลุดของสีรีแอคทีฟ..... 13
2.5	โครงสร้างของสีเบสิกกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2..... 16
2.6	การเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว..... 29
2.7	รูปแบบชั้นการดูดติดผิวของโมเลกุลบนผิวของแข็ง..... 29
2.8	ลำดับขั้นตอนของกลไกการดูดติดผิว..... 30
2.9	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์..... 34
2.10	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช..... 35
2.11	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์..... 44
2.12	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายรูปโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ..... 47
2.13	โครงสร้างของไคติน..... 51
2.14	โครงสร้างของไคโตซาน..... 52
2.15	ขั้นตอนกระบวนการบำบัดน้ำเสียและจุดเก็บตัวอย่างตะกอนเชื้อกระดาษ..... 54
2.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับกับเวลา..... 58
2.17	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที..... 60
3.1	โมเดลถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง(1) ชุดการทดลองการกวนผสม ด้วยใบพัด (2) ชุดการทดลองการกวนผสมด้วยฟองเต็มอากาศ..... 75
3.2	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม ก) Reactive Black 5 (RB 5) (ข) Basic Yellow (BY 1)..... 78
3.3	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษ..... 80
3.4	ขั้นตอนการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซาน..... 82
3.5	ขั้นตอนการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์..... 87
3.6	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์..... 89
3.7	ขั้นตอนการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมของการเติมอากาศ..... 91
3.8	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมของการเติมอากาศ..... 93

รูปที่	หน้า	
3.9	ขั้นตอนการศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ ในการดูดซับสีเขียวของถ่านกัมมันต์.....	95
3.10	ขั้นตอนการศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อไอโซเทอม การดูดซับสีเขียวของถ่านกัมมันต์.....	97
4.1	ถ่านกัมมันต์ที่ไม่เคลือบสารไคโตซาน(SAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 2,000 เท่า.....	100
4.2	ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารไคโตซาน (CH-SAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 3,500 เท่า.....	100
4.3	ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า(PAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวาง กำลังขยาย 3,500 เท่า.....	101
4.4	ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าเคลือบสารไคโตซาน (CH-PAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลัง ขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 3,500 เท่า.....	101
4.5	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน(FTIR) ของถ่านกัมมันต์ (ก) SAC และ CH-SAC (ข) PAC.....	103
4.6	จลนศาสตร์การดูดซับสีเขียว RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9	104
4.7	จลนศาสตร์การดูดซับสีเขียว BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9	110
4.8	ไอโซเทอมการดูดซับสีเขียว RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9	114
4.9	ผลกระทบจากค่าพีเอช (pH) ต่อการดูดซับสีเขียว RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วย ความเร็ว รอบ 200 rpm	117
4.10	ไอโซเทอมการดูดซับสีเขียว BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9	118

รูปที่	หน้า
4.11 ผลกระทบจากค่าพีเอช (pH) ต่อการดูดซับสี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm	120
4.12 ไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC	126
4.13 ไอโซเทอมการดูดซับสี BY 1 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC	129
4.14 สรุปผลจากชนิดการกวนผสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB5 และ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC	132
4.15 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Qg) ที่มีต่อค่าการดูดซับสีของ RB 5 (q _๐) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC	135
4.16 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Qg) ที่มีต่อค่าการดูดซับสีของ BY 1 (q _๐) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC	137
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Qg และ d _B ในการดูดซับสี RB 5	141
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Qg และ f _B ในการดูดซับสี RB 5	141
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Qg และ d _B ในการดูดซับสี BY 1	143
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Qg และ f _B ในการดูดซับสี RB 5	144
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟอง(D _B) และความเร็วฟอง(U _B) ในการดูดซับสี RB 5	145
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของก๊าซ (Qg)และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวฟองต่อความเร็วเกรเดียนท์(a/G) ในการดูดซับสี RB 5	147
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของก๊าซ (Qg) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวฟองต่อความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ในการดูดซับสี BY 1	149
4.24 ความสามารถในการดูดซับสีของ RB 5 (q _๐) ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C และ 55° C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ	155

รูปที่	หน้า
4.25	ความสามารถในการดูดซับสีย้อมBY 1 (q_e) ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C และ 55° C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ 159
4.26	สรุปผลจากอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC 163
ผ.1	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm 179
ผ.2	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm 180
ผ.3	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 l/m 181
ผ.4	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมไนโตรเจนด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 l/m 182
ผ.5	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 l/m 183
ผ.6	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมไนโตรเจนด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 l/m 184
ผ.7	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm 185
ผ.8	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm 186

รูปที่	หน้า
ผ.9	ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของ การดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 l/m187
ผ.10	ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของ การดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 l/m188
ผ.11	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วย ความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25° C และค่าความหนาแน่นของประจุ 0.01 โมลาร์ ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC189
ผ.12	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 กวนด้วยความ เร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25° C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC190
ผ.13	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วย ความเร็วรอบ 200 rpm และ Qg เท่ากับ 0.6 l/m ภายใต้อุณหภูมิ 25° C ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC192
ผ.14	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 กวนด้วย ความเร็วรอบ 200 rpm และ Qg เท่ากับ 0.6 l/m ภายใต้อุณหภูมิ 25° C ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC193
ผ.15	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 ที่ อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ค่าพีเอช 7 ด้วย ถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC195
ผ.16	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 ที่ อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC196
ผ.17	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 ที่ อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C ภายใต้ค่าพีเอช 7 เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 l/m ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC198
ผ.18	Langmuir Isotherm และFreundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C ภายใต้ค่าพีเอช 7 เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 l/m ด้วย ถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC200

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาในด้านสิ่งแวดล้อมผลกระทบที่เกิดจากการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เห็นได้ชัดเจนก็คือมลพิษทางน้ำและทางอากาศ ที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์ในที่สุด

มลพิษทางน้ำจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเกิดจากน้ำที่ผ่านกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) ซึ่งองค์ประกอบหลักในน้ำเสียจากกระบวนการทั้งสอง ได้แก่ ซีโอดี (Chemical oxygen demand) บีโอดี (Biochemical oxygen demand) สี (Color) ของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) กรด - ด่าง (Acidity - Alkalinity) และความร้อน (heat) นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ ปนเปื้อนในน้ำเสียอีกด้วย ซึ่งสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นสีย้อมสังเคราะห์ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ผลิตเป็นสีย้อมหลากหลายชนิดด้วยเทคนิคต่าง ๆ สีที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมฟอกย้อม เช่น สีรีแอคทีฟ สีเบสิก สีแอซิด สีไดเร็กต์ สีดิสเพอร์ธ (ชลธิชา, 2545) เนื่องจากสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ย่อยสลายได้ยากโดยจุลินทรีย์ น้ำเสียความเข้มข้นสีที่สูงเป็นดัชนีบ่งบอกถึงการปนเปื้อนของสารมลพิษอื่นๆ ในน้ำเสียนั้นสูงด้วย (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนของสีสู่แหล่งน้ำก็ส่งผลให้ได้รับมลพิษอื่นๆ สะสมตามไปด้วย

นอกจากนี้ความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งที่มีค่าสูง ถึงแม้ความเป็นพิษของสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตจะไม่มากนักเนื่องจากสภาพที่เจือจางแต่ความเข้มข้นของสีจะขัดขวางการเดินทางของแสงซึ่งส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชและเมื่อพิจารณาแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนไปด้วยสีต่างๆ ในด้านทัศนียภาพก็ยังเป็นที่น่ารังเกียจให้แก่ผู้พบเห็น ซึ่งปัจจุบันเทคนิคการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมสามารถทำได้ด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ วิธีที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปเช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) การออกซิเดชัน (Oxidation) และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) หรือกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น ระบบสระเติมอากาศ (Aerated lagoon) และระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่เรียกว่ากระบวนการ BAC (Biological activated carbon) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่อาศัยเทคนิคการบำบัดทางชีววิทยาและทางเคมีมา

ทำการบำบัดสีร่วมกัน จากวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมที่กล่าวมานี้แต่ละวิธีจะมีข้อจำกัด และประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน โดยวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนค่าก่อสร้างระบบการบำบัดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดอื่นๆ การใช้งานไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพเพื่อใช้ใหม่ (ธวัชชัย, 2548)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากจึงนิยมใช้ในการกำจัดกลิ่นและสีกลิ่นมาก การใช้งานถ่านกัมมันต์มีทั้งชนิดที่เป็นชนิดเกล็ดและผงถ่านซึ่งถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดจะใช้ในคอลัมน์ที่มีการใช้งานแบบต่อเนื่องและสามารถฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วให้นำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงมักใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง ซึ่งโดยทั่วไปถ่านที่ผลิตได้จากวัตถุดิบต่างชนิดกันจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพในการดูดซับที่แตกต่างกันด้วย ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดซับที่นิยมใช้แต่ก็มีข้อจำกัดความสามารถในการดูดซับสารบางชนิดและมีราคาที่สูง ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและการหาวัตถุดิบราคาถูกลงมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์จึงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสนใจและศึกษาต่อไป (ชลธิชา, 2545)

ไคโตซานเป็นสารดูดซับทางชีวภาพซึ่งเป็นที่รู้จักกันและนำมาใช้ในงานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอาหาร การแพทย์และเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การเกษตรและสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติสามารถดูดซับสีย้อมและโลหะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีองค์ประกอบของหมู่อะมิโนปริมาณมากที่ทำหน้าที่เป็นแกนยึดสำหรับสีย้อมและโลหะต่างๆ แต่เนื่องจากราคาของไคโตซานในท้องตลาดสูงถึง 700-2,500 บาทต่อกิโลกรัม (Aqua Premier Co., Ltd) ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการบำบัดสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม แต่จากงานวิจัยของอนัญญา (อนัญญา, 2542) ที่ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์โดยการเคลือบไคโตซานซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีเพิ่มขึ้นจริง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของออกซิเจนต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์พบว่าในการดูดซับสารบางชนิด เช่น ฟีนอล และ ไตรเอทิลฟีนอล ในสถานะที่มีออกซิเจนจะมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าสถานะไม่มีออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนไปคะตะลิสต์พื้นผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาอิมตัวของตัวดูดซับ ดังนั้นการศึกษาผลของออกซิเจนที่มีต่อการดูดซับสารชนิดต่างๆ จึงเป็นอีกประเด็นที่ควรศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารที่ต้องการ (Vidic และคณะ, 1990)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษซึ่งเป็นอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเพราะเป็นอุตสาหกรรมที่รองรับผลผลิตทางการเกษตรจำพวกไม้ไผ่หรือไม้เนื้อแข็งหรือแม้กระทั่งขานอ้อยที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษได้ ซึ่งการขยายตัว

ของอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสินค้าส่งออกส่งผลดีต่อเศรษฐกิจของประเทศ ในขณะที่เดียวกันตะกอนเศษเยื่อกระดาษที่เหลือออกมาคือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปริมาณมากเมื่อผ่านกระบวนการรีดน้ำแล้วทำให้ได้กากตะกอนเยื่อกระดาษที่มีปริมาณประมาณ 30 ตันต่อวัน (โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี) ถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งตะกอนเยื่อกระดาษเหล่านี้มีองค์ประกอบของคาร์บอนอันเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆที่นิยมนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ อีกทั้งมีปริมาณมากต่อวัน ดังนั้นกากตะกอนเยื่อกระดาษจึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และควรให้ความสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนาความสามารถในการดูดซับและพิจารณาความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ต่อไปเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและลดของเสียโดยการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากตะกอนเยื่อกระดาษ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซานที่มีต่อการดูดซับสีของน้ำเสียดังเคราะห์
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของกวนผสมด้วยฟองอากาศที่มีต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ทั้งในด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรวมไปถึงในด้านอุทกพลศาสตร์
4. เพื่อศึกษาปัจจัยทางค่าพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการดูดซับสีของน้ำเสียดังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองศึกษาการดูดซับสีของน้ำเสียดังเคราะห์ ซึ่งสีที่ใช้ศึกษามี 2 ประเภท ได้แก่ สีรีแอคทีฟ ชนิด Reactive Black 5 และสีเบสิกชนิด Basic Yellow 1
2. ใช้ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากบริษัทผลิตเยื่อและกระดาษแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
3. ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงมี 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเยื่อกระดาษ ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเยื่อกระดาษเคลือบไคโตซาน ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าชนิด Shirasagi S-10 และถ่านกัมมันต์ Shirasagi S-10 เคลือบด้วยไคโตซาน

4. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง ขนาดโพรงเฉลี่ย ลักษณะพื้นผิวและศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวเท่ากับศูนย์
5. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์การดูดซับบนถ่านกัมมันต์จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและอันดับปฏิกิริยา
6. ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสี่ข้อมของถ่านกัมมันต์
7. การศึกษาผลกระทบจากการกวนผสมด้วยฟองอากาศต่อการดูดซับบนถ่านกัมมันต์
8. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี่ข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ค่าพีเอช และอุณหภูมิ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
2. เพิ่มทางเลือกวัตถุดิบที่มีราคาถูกเพื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์
3. เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับด้วยวิธีการเคลือบผิวตัวกลางด้วยไคโตซานและกวนผสมด้วยฟองอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

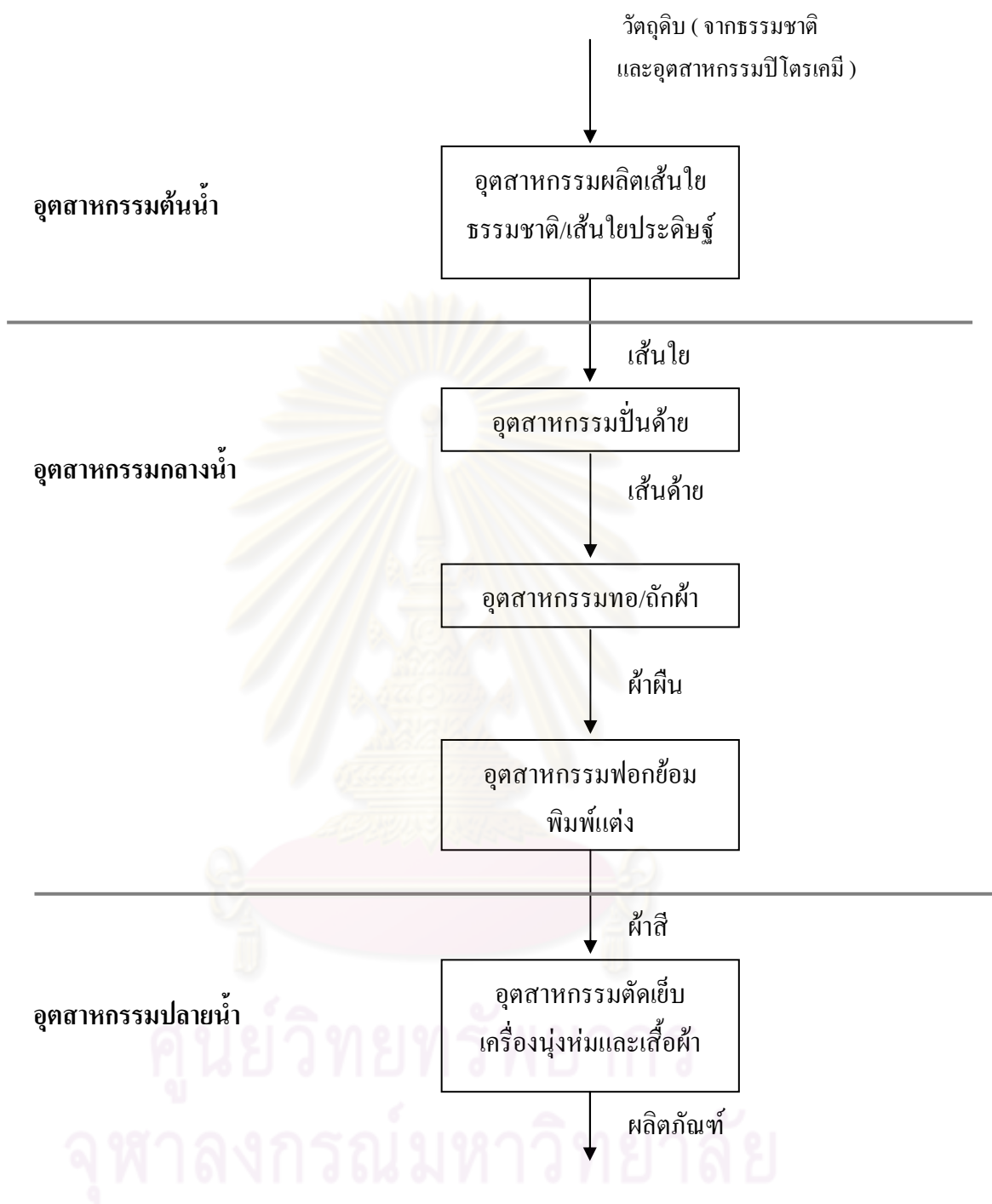
แนวคิดและทฤษฎี

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการนำเข้าเงินตราต่างประเทศอย่างต่อเนื่องและมีรายขายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากเครื่องนุ่งห่มเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เมื่อพิจารณาทางด้านสิ่งแวดล้อมพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเจือปนด้วยสีย้อมและสารเคมีที่หลุดตกค้างจากกระบวนการผลิตโดยเฉพาะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นปัญหาหลักในอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ต้องให้ความสำคัญและทำการบำบัดก่อนถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดเกณฑ์สีในน้ำทิ้งเพียงไม่เป็นที่น่ารังเกียจแต่ในความเป็นจริงความเข้มของสีที่เจือปนอยู่ในน้ำเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็นได้จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม (รัชนิย์, 2007)

การบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้กันปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมี วิธีกายภาพ และกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งวิธีการกำจัดสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีการบำบัดทางเคมีที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะนำเอาของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีราคาถูกลงมาเป็นวัตถุดิบผลิตถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กากตะกอนเยื่อกระดาษที่ได้จากตะกอนในระบบบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษที่ผ่านกระบวนการรีดน้ำสลัดจ์แล้ว และทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์โดยการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซานและการเติมอากาศในน้ำเสีย

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ดังรูป 2.1 ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ

กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็น สีย้อม กรด ด่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น และสิ่งที่ไม่ขาดไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณมากเพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสดใสสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึง

เกิดขึ้นจากน้ำและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมันและของเสีย ไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ปนเปื้อนออกมานอกจากนี้ น้ำทิ้งยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรงและมีสีที่น้ำรังเกียจ

เมื่อน้ำทิ้งที่มีสีย้อมปนเปื้อนถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือสิ่งแวดล้อมนอกจากจะทำลายความสวยงามของธรรมชาติยังพบว่าสีที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำส่งผลให้พืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงและซึ่งอาจส่งผลให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำตายได้

2.1.1 ชนิดของสีย้อม (Dye stuffs)

สีย้อม คือสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าซึ่งอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ หากเป็นสารอินทรีย์จะผลิตจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นผลผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่ผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนสภาพไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคต่างๆ จนกลายเป็นสีย้อมในที่สุด โดยการเกิดสีของสีย้อมซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งกลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย, 2527) คือ

1. กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
2. กลุ่มไนโตร (Nitro group)
3. กลุ่มอะโซ (Azo group)
4. กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)
5. กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen group)
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group)

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติกโดยการดูดกลืนแถบสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสงทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมที่มีโทนสีแตกต่างกันไป โดยทั่วไปสีย้อมมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียดซึ่งสีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้และบางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปใน โมเลกุลของเส้นใยซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ใน โมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน โดยพลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 nm ดังนั้นสีย้อมที่มีโครงสร้างทาง โมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน

แสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไปซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาแตกต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์

2.1.1.1 สีย้อมธรรมชาติ และ สีย้อมสังเคราะห์

1. สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในห้องปฏิบัติการมีหลากหลายสีคงทนต่อการซักล้าง ทนแดด ทนร้อน ย้อมติดเส้นใยทุกชนิด ผลิตได้ทีละมาก ๆ ใช้ง่าย เก็บรักษาง่าย ราคาถูก ทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากแต่มีการวิจัยพบว่าสีย้อมเคมีบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ทั้งระหว่างการย้อมและในน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนดิน น้ำ พืชและสัตว์ เมื่อคนได้รับสารตกค้างเหล่านี้ก็ได้รับสารก่อมะเร็งเช่นกัน

การจำแนกสีย้อมสังเคราะห์มีหลายวิธีแต่ที่นิยมกันมากที่สุดคือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งานเพราะจะต้องมีความคงทนต่อการซัก คงทนต่อแสงและความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ สีเอซิด สีไดเรกต์ สีเบสิก สีดิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีอะโซอิก สีแเว็ด สีมอร์แดนท์ สีอินเทรน สีออกซิเดชันและสีซัลเฟอร์ โดยสีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อมตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสีเพราะวัสดุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเรกต์ เป็นต้น ซึ่งสีแต่ละประเภทมีคุณลักษณะดังนี้

1. สีเอซิด (Acid dye) เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง

2. สีไดเรกต์ (Direct dye) สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

3. สีเบสิก (Basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยที่มีหมู่เป็นกรด เช่น $-COOH$, $-SO_3H$ โดยพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสีกับเส้นใยคือ พันธะเกลือ

4. สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรืออัตราการย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง

5. สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่างเหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ซึ่งสีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^{\circ}C$ และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ

6. สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน เป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้

7. สีวัต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแฉะละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยสีแฉะจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงจะซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแฉะ

8. สีเมอร์แดนท์ หรือ โครม (Mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดินบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีเมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีเมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะ สามารถละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย

9. สีอินเกรน (Ingrain dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ

10. สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ โดยสีจะติดแน่นอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11. สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีราคาถูก เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำ

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสี้อมตามลักษณะการใช้งานของสีประเภทต่างๆกับเส้นใยชนิดต่างๆ
(Buckley, 1992)

ประเภทสี้อม	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ประเภทเส้นใยที่เหมาะสมกับสี้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้งาน
สี้อมเอซิด (Acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีไม่ติดแน่น	- ขนสัตว์ - ไนลอน	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - สมมติเส้นใยมีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110°C
สี้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (Metal Complex Acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่นดี	- ขนสัตว์ - ไนลอน	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - สมมติเส้นใยมีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110°C
สี้อมไดเรกต์ (Direct dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายต่างอ่อน - เดิมเอเล็กโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสี้อม ที่อุณหภูมิ 98 °C
สี้อมเบสิก (Basic or cationic dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เดิมสี้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-150°C
สี้อมดิสเพิร์ส (Dispers dye)	- เป็นอนุภาคคอลลอยด์ กระจายในน้ำ - ละลายน้ำได้น้อยมากหรือไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่นดี	- อะคริลิก - ไนลอน - โพลีเอสเตอร์ - เซลลูโลส - อะซิเตท	- คอลลอยด์ของสี้อมติดติดผิวกับเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4.5 - เดิมสี้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 130°C

ตารางที่ 2.1(ต่อ) การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานของสีประเภทต่างๆกับเส้นใยชนิดต่างๆ

ประเภทสีย้อม	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ประเภทเส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้งาน
สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่นดี	- ขนสัตว์ - ฝ้าย - วิสกอต	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใย
สีย้อมวัต (Vat dye)	- เกิดเป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอต	- เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- เติมสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dye)	- เกิดเป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอต	- เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- เติมสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมอะโซอิก (Azoic dye)	- เกิดเป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอต	- เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- เติมสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใยและสีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมโซเดียมไดโครเมตและสีย้อม - เพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 98°C

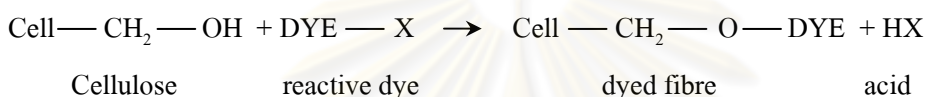
เนื่องจากสีรีแอคทีฟเป็นสีที่นิยมใช้กันมากในการย้อมผ้าฝ้ายเพราะสีมีความคงทนและกรรมวิธีการย้อมไม่ยากใช้งานสะดวก มีกระจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนสีเบติกจะนิยมใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิกและเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ถูกปรับปรุงให้ติดสีกระจุลบได้ ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ สิริแอคทีฟ สีเบสิก มาเป็นสารถูกดูดซับทดสอบความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

2.1.1.2 สิริแอคทีฟ

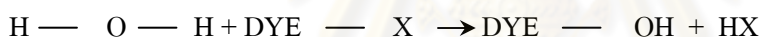
นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างของสีประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้ปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสและเกิดพันธะโควาเลนต์ ปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมและเส้นใยจะเป็นแบบ Nucleophilic displacement และเกิดผลพลอยได้ออกมาเป็นกรดเนื่องจากเบสจะเพิ่มสภาพของประจุลบบนอะตอมของออกซิเจนในเซลลูโลส ดังนั้นเบสจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบนี้ (วิมลรัตน์, 2550)

Fixation reaction



เมื่อ X = reactive group

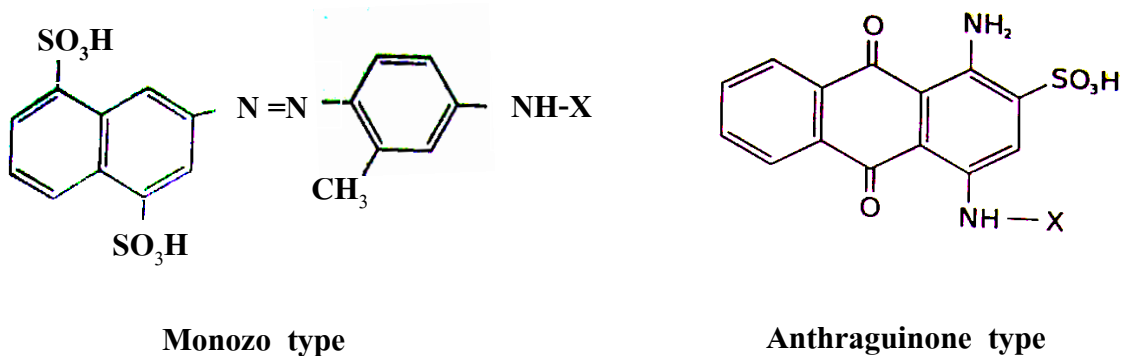
Hydrolysis reaction



ธรรมชาติของสิริแอคทีฟจะทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยทั่วไปแล้วสีที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยจะเรียกว่า Fixed dyes ส่วนสีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเรียกว่า Hydrolysed dyes ซึ่งสีที่ติดบนเส้นใยจะติดแน่นทำให้สิริแอคทีฟมีความทนต่อการซักล้างได้ดี ส่วน Hydrolysed dyes ไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่แข็งแรงกับเส้นใยแต่อาจทำปฏิกิริยาอย่างอ่อน เช่น แรงทุติยภูมิกับเส้นใย ซึ่งสีส่วนนี้จำเป็นต้องล้างออกก่อนที่การย้อมจะสิ้นสุดซึ่งอาจนำมาด้วยปัญหาในการกำจัดสีออกจากน้ำเสีย

โครงสร้างของสี

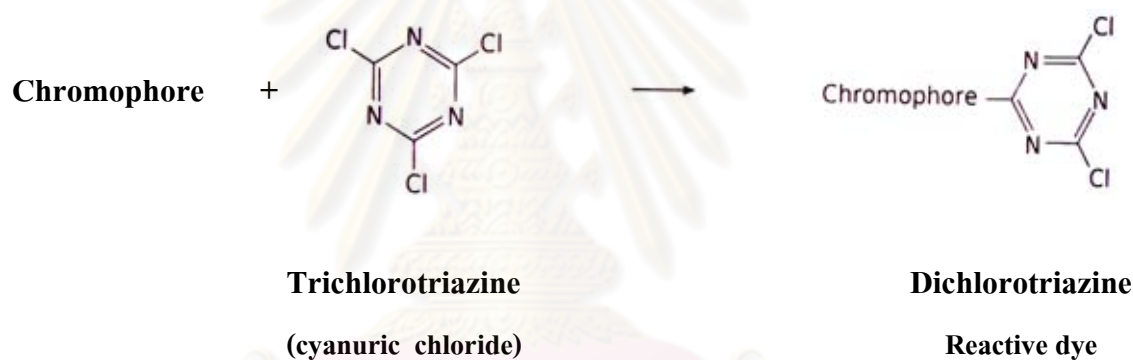
สิริแอคทีฟประกอบด้วยโครโมฟอร์ที่ติดอยู่กับหมู่ที่ว่องไว (Reactive group) ผ่านหมู่ -NH- เนื่องจากสีติดบนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ดังนั้นโครโมฟอร์มีขนาดเล็กและโครงสร้างไม่ซับซ้อนซึ่งเป็นข้อดีคือสีจะละลายน้ำดี การแยกสีที่ไม่ติดบนผ้าทำได้ง่าย สีแพร่เข้าสู่เส้นใยได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำและมีสีที่สดใสแต่ก็มีข้อเสียคือสิริแอคทีฟจะเกาะติดกับผิวของเส้นใยได้น้อย (Low substantivity) เพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้โครงสร้างของสียังต้องประกอบด้วยหมู่ซัลโฟเนตเพื่อช่วยในการละลายน้ำด้วยซึ่งโครโมฟอร์ในโครงสร้างของสิริแอคทีฟได้แก่ Monazo, Anthraquinone, Phthalocyanine เป็นต้น ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



เมื่อ X = reactive group

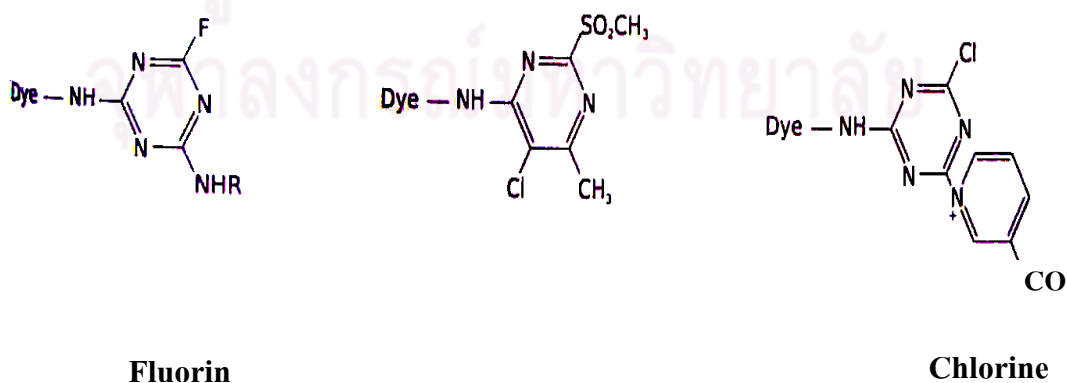
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของโครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีรีแอกทีฟ (วิมลรัตน์, 2550)

หมู่ที่ว่องไวในสีรีแอกทีฟมีหลายชนิด ซึ่งชนิดที่สำคัญได้แก่ สีรีแอกทีฟที่ประกอบด้วยหมู่ Triazine ซึ่งเกิดจากการเชื่อมหมู่โครโมฟอร์กับ Trichlorotriazine (Cyanuric chloride) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์สีรีแอกทีฟชนิด triazine (วิมลรัตน์, 2550)

หมู่ที่หลุดไป (Leaving group) ของสีรีแอกทีฟ ตัวที่นิยมคือคลอรีนนอกจากนี้ยังมีฟลูออรีน เมทิลซัลโฟนิล และ ควอเตอร์นารี แอมโมเนีย ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หมู่ที่หลุดของสีรีแอกทีฟ (วิมลรัตน์, 2550)

การย้อมสีรีแอกทีฟ

การย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ สามารถทำได้ 2 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการดูดซับ (The adsorption stage) เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยเวลาในการย้อม อุณหภูมิและปริมาณเกลือ
2. ขั้นตอนการติดสี (The fixation stage) การติดสีจะได้ผลดีขึ้นอยู่กับค่าพีเอช หรือการเติมเบสที่เหมาะสม

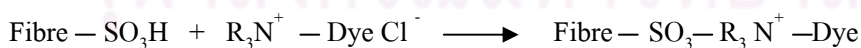
เนื่องจากสีรีแอกทีฟมีหลายชนิดและแต่ละชนิดจะมีปัจจัยเรื่องระยะเวลาย้อม อุณหภูมิ ค่าพีเอชของน้ำย้อมแตกต่างกันออกไป ซึ่งเป้าหมายของวิธีการย้อมสีรีแอกทีฟคือต้องทำให้สีติดบนเส้นใยให้มากที่สุดและปริมาณสีที่เกิดไฮโดรไลซิสให้น้อยที่สุด

ในขั้นตอนการย้อมส่วนใหญ่ในช่วงเริ่มต้นค่าพีเอชของน้ำย้อมจะใกล้เคียงสภาวะเป็นกลาง เพราะสีส่วนใหญ่จะอยู่ในน้ำย้อม ความว่องไวของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเบสในขั้นตอนต่อไป ทำให้สีส่วนใหญ่เข้าไปอยู่ในเส้นใย ชนิดและปริมาณของเบสที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีรีแอกทีฟ เบสที่ใช้ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลเฟต เป็นต้น

ในระบบการย้อมแบบแช่เนื่องจากธรรมชาติของสีรีแอกทีฟจะมีการยึดติด (Affinity) กับเส้นใยต่ำดังนั้นการเติมเกลือจะช่วยให้สีย้อมเข้าสู่เส้นใย ส่วนการย้อมด้วยวิธีใช้ลูกกลิ้งอาจไม่ต้องการเกลือเพราะค่า Liquor ratio ต่ำ แต่ถึงกระนั้นไม่ว่าจะย้อมสีรีแอกทีฟด้วยวิธีใดสุดท้ายต้องทำการล้างเพื่อเอา Hydrolysed dyes ออกซึ่งการล้างจะทำหลายครั้งพร้อมกับเติมสารซักล้างและทำที่อุณหภูมิสูง

2.1.1.3 สีเบสิก

บางครั้งอาจเรียกว่าสีแคทไอออนิกเนื่องจากโครโมฟอร์มีประจุบวก สีเบสิกจะใช้ย้อมเส้นใยที่มีหมู่ที่เป็นกรด เช่น -COOH , $\text{-SO}_3\text{H}$ โดยพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสีกับเส้นใยคือพันธะเกลือ (วิมลรัตน์, 2550)



สีเบสิกจะถูกผลิตในรูปของเกลือในที่นี้คือเกลือคลอไรด์ ความทนทานของสีเบสิกค่อนข้างไม่แน่นอนขึ้นกับว่าใช้ย้อมเส้นใยชนิดใด กล่าวโดยทั่วไปถ้าใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ความทนทานต่อการซักล้างและความทนทานต่อแสงของสีเบสิกจะค่อนข้างต่ำแต่ถ้าใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก ความทนทานต่อการซักล้างและความทนทานต่อแสงจะอยู่ในขั้นดีถึงดีมาก

โครงสร้างของสี

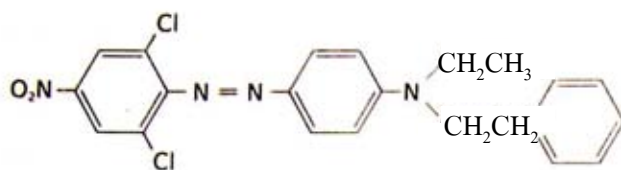
โครงสร้างของสีเบสิกแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. กลุ่มที่ 1 มีประจวบอยู่ประจำที่ด้านข้าง นิยมเป็นอะตอมไนโตรเจน โครโมฟอร์ ของสีเป็นกลุ่มอะโซ และ Anthraquinone
2. กลุ่มที่ 2 มีการเคลื่อนที่ของประจวบโดยตลอด โมเลกุล ได้แก่ สีอะโซหรือ Triphenyl methane ซึ่งสีกลุ่มที่ 2 จะมีความเข้มและความสว่างของสีมากกว่ากลุ่มแรก

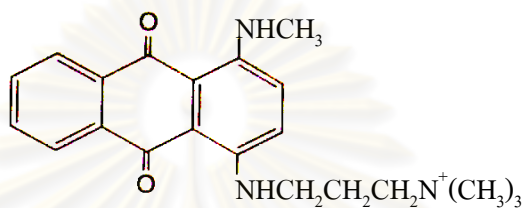
การย้อมสีเบสิก

การใช้งานของสีเบสิกส่วนใหญ่จะใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก ซึ่งเส้นใยอะคริลิกเป็นสารโคโพลิเมอร์ประกอบด้วยส่วนอะคริโลไนไตรด์อย่างน้อย 85 % ซึ่งการย้อมด้วยสีเบสิกจะทำให้ค่าพีเอชประมาณ 3.5-6.0 การใช้สารช่วยย้อม เช่น สารหน่วง จำเป็นในการย้อมสีเบสิกเพื่อควบคุมอัตราการย้อมให้ได้การย้อมที่สม่ำเสมอ ซึ่งสารหน่วงได้แก่ สารซักล้างชนิดแคทไอออนิกและแอนไอออนิกเกลือโซเดียมซัลเฟต เป็นต้น ในการทำโพลิเมอร์ไรเซชันจะถูกกระตุ้นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Potassium persulphate หรือ Sodium bisulfite ตัวกระตุ้นเหล่านี้จะเหลืออยู่ที่ปลายโซ่ของโพลิเมอร์และเป็นตำแหน่งที่จะติดสีเบสิก หรือเรียกว่า " Dye sites "

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

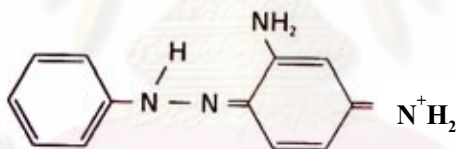


Basic Orange

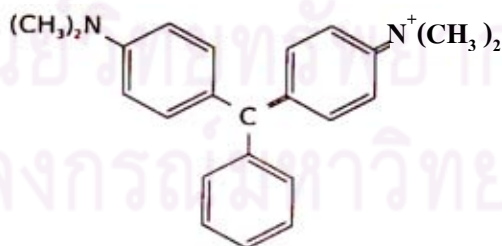


Basic Blue

กลุ่มที่ 1



Chrysodine (Yellow)



Malachite green

กลุ่มที่ 2

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสีเบสิคกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2 (วิมลรัตน์, 2550)

2.1.2 มลพิษจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

2.1.2.1 ที่มาของน้ำเสียและสิ่งสกปรกจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากกระบวนการทางสิ่งทอของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานฟอกย้อมมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ วัสดุ (เส้นใย เส้นด้าย ผ้า) ตัวกลาง (น้ำ) สี และสารเคมี (ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต กรดอะซิติก โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารช่วยชนิดต่างๆ) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจะมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้ (กองส่งเสริมและเผยแพร่ กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2007)

กระบวนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน โดยกระบวนการหลักที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ กระบวนการฟอกย้อม โดยในแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนการใช้วัตถุดิบ สารเคมีและสีย้อมต่างกันดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีความแตกต่างกันดังนี้

1. กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

ในกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้ายนี้เส้นด้ายจะถูกนำไปจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring) ด้วยความร้อนโดยมีสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) สารช่วยจัดสิ่งสกปรก (Scouring agent) และสารช่วยเปียก (Wetting agent) ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้มีค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical oxygen demand, BOD) ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS) ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) สภาพด่างและอุณหภูมิสูง จากนั้นเส้นด้ายที่ถูกจัดสิ่งสกปรกออกจะถูกนำไปฟอกขาว (Bleaching) ซึ่งมีการใช้สารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือโซเดียมคลอไรต์ (NaClO_2) รวมทั้งกรดและด่าง น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้จะมีค่าบีโอดี ทีเอส และสภาพด่างสูง ในขั้นตอนการย้อม (Dyeing) จะมีการใช้สารเคมีจำพวกสีย้อม สารเคมีช่วยย้อม และกรดและด่าง โดยมีการใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการทำให้น้ำเสียที่ออกมา มีอุณหภูมิสูง มีค่าบีโอดีและทีเอสสูงรวมทั้งน้ำมีสีเข้ม หลังจากนั้นก่อนที่จะได้ด้ายย้อมสำเร็จจะต้องมีการนำด้ายไปล้างด้วยน้ำสบู่ก่อน (Soaping) โดยจะมีการใช้สารสบู่ (Soaping agent) ทำให้น้ำเสียที่ออกมามีค่าบีโอดีต่ำแต่มีการปนเปื้อนของน้ำสบู่

2. กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบมีขั้นตอนคล้ายกับการฟอกย้อมเส้นด้าย ต่างกันตรงที่ก่อนการฟอกย้อมผ้าดิบต้องมีการลอกแป้ง (Desizing) ออกจากผ้าดิบก่อนและต้องมีการนำผ้าที่ผ่านการฟอกขาวแล้วไปซุบมัน (Mercerization) ก่อนนำไปย้อม หลังจากที่ผ่านมาการย้อมแล้วต้องมิ

การตกแต่งสำเร็จ (Finishing) โดยในขั้นตอนการลอกแป้งซึ่งจะมีการใช้สารเคมี ได้แก่ เอนไซม์ หรือกรดซัลฟูริก หรือสารออกซิไดซ์ รวมทั้งสารช่วยเปียกและอาศัยความร้อน ดังนั้นน้ำเสียที่ออกมาจะมีค่าบีโอดี ทีเอสรวมทั้งมีอุณหภูมิสูง สำหรับขั้นตอนการชุบมันซึ่งมีการใช้โซดาไฟ จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีค่าบีโอดี ทีเอสและสภาพด่างสูง ในขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จมีการใช้สารตกแต่ง เช่น เรซิน สารกันน้ำ ฯลฯ โดยใช้ความร้อนร่วมด้วย จึงทำให้น้ำเสียที่ออกมามีอุณหภูมิ ค่าบีโอดีสูงและมีสภาพกรด-ด่างเป็นกลาง

3. กระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้าย

กระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้ายมีขั้นตอนการฟอกย้อมเช่นเดียวกับการฟอกย้อมผ้าดิบแต่ไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ซึ่งลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนจะเหมือนกับน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ อย่างไรก็ตามลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นนอกจากจะมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ แล้วยังอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันที่ปะปนมากับเส้นใย เศษเส้นใยและเศษผ้าได้อีกด้วย

นอกจากแหล่งที่มาของน้ำเสียจะเกิดขึ้นจากน้ำใช้ในการกระบวนการผลิตแล้วยังมีน้ำเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อมไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม ขั้นตอนการฟอกย้อมพิมพ์และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิตแต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต
2. น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม ซึ่งมีปริมาณมากแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก
3. น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายย้อมและจะถูกรวมเป็นน้ำเสียในที่สุด
4. น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้ได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็นซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้
5. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

6. น้ำเสียจากแหล่งอื่น เช่น น้ำใช้ของคนงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

2.1.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

โดยทั่วไปน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้ (รัชนีชัย, 2550)

1. ปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 mg/L และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand , COD) ประมาณ 500-1,200 mg/L

2. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง(Alkalinity) สูง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 mg.CaCO₃ /L สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอชและค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)

3. อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 °C โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

5. ความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย ซึ่งเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้นดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมา กับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

6. โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

8. การปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

2.1.2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียปนเปื้อนด้วยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมเมื่อพิจารณาตามลักษณะคุณสมบัติ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังนี้ (เพ็ญลักษณ์, 2547)

1. สารอินทรีย์ (Organic matter) เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศที่อาศัยอยู่ในน้ำเสียใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและใช้ออกซิเจนในน้ำเป็นสารรับอิเล็กตรอน ดังนั้นยิ่งสารอินทรีย์ในน้ำมีปริมาณสูงก็จะทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์สูงขึ้นซึ่งมีผลทำให้สัตว์น้ำตายเพราะขาดอากาศ เกิดเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ให้แก่แหล่งน้ำยิ่งขึ้นและเกิดการเน่าของแหล่งน้ำเมื่อสารอินทรีย์ในน้ำสูงในขณะเดียวกันกับเกิดภาวะขาดออกซิเจนในน้ำทำให้เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งหากเกิดขึ้นเองโดยไม่มีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็น โดยปกติแล้วแหล่งน้ำสามารถที่จะทำความสะอาดตัวเองได้ (Self purification) แต่อาจใช้ระยะเวลาขึ้นอยู่กับความสกปรก ดังนั้นถ้าหากแหล่งน้ำสกปรกมากการทำความสะอาดตัวเองก็จะนานขึ้นจนอาจไม่สามารถรับรู้ถึงความเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่สูงมากและได้รับเพิ่มอย่างต่อเนื่องทำให้ในที่สุดแหล่งน้ำนั้นก็ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกทั้งยังเป็นที่น่ารังเกียจและแหล่งแพร่เชื้อโรคอีกด้วย

นอกจากความสกปรกที่แหล่งน้ำจะได้รับแล้วยังพบว่าสารเคมีจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมบางประเภทมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสารพิษอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ หรืออาจเกิดการสะสมพิษในสัตว์จวนในที่สุดสารพิษเหล่านั้นก็มาสู่มนุษย์ที่บริโภคเข้าไปตามวัฏจักรห่วงโซ่อาหาร

2. ความเป็นกรดและด่าง (pH) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสิ่งมีชีวิตจะดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกลาง คือช่วงค่าพีเอช 6-9 ดังนั้นหากน้ำเสียที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติมีค่าพีเอชที่ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีค่าพีเอชที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ หรืออาจตายได้ เป็นเหตุให้เกิดการสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้

3. อุณหภูมิ (Temperature) เนื่องจากออกซิเจนในน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังนั้นความสามารถของการละลายก๊าซออกซิเจนในอากาศลงสู่แหล่งน้ำจะมากหรือน้อยนั้นอุณหภูมิของน้ำก็เป็นปัจจัยในการละลายของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำเช่นกัน โดยเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ความดันไอของบริเวณผิวน้ำมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศมากขึ้นเพียงใด ก็จะส่งผลทำให้การแพร่ของก๊าซออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำเกิดขึ้นได้ยากมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้แหล่งน้ำเกิดภาวะขาดออกซิเจนได้ นอกจากนี้ความร้อนที่สูงยังเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตมีโครงสร้างของโปรตีนเมื่อโดนความร้อนที่สูงอาจเกิดการเปลี่ยนสภาพของโปรตีนหรือแม้กระทั่งเนื้อเยื่อสัตว์น้ำ ซึ่งผลกระทบนี้อาจทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้

4. ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved solids) คือจำพวกสารอนินทรีย์ ได้แก่แร่ธาตุต่างๆ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ที่ละลายในน้ำ ถึงแม้จะไม่ทำให้แหล่งน้ำเน่าเหม็นแต่สารอนินทรีย์เหล่านี้ก็อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้

5. สี (Dye) สีที่มาจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นเป็นสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม ซึ่งเมื่อสีเหล่านี้ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะไปคั่งค้างเส้นทางการผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำซึ่งแสงที่ผ่านลงสู่แหล่งน้ำนอกจากจะช่วยฆ่าเชื้อโรคในแหล่งน้ำแล้วยังมีความจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์แสงของพืชหรือสาหร่ายได้น้ำซึ่งการสังเคราะห์แสงของพืชหรือสาหร่ายจะได้ผลผลิตเป็นออกซิเจนออกมาทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นหากไม่มีแสงแดดพืชก็จะไม่สังเคราะห์แสงแต่ก็ยังหายใจโดยดึงเอาออกซิเจนที่ละลายในน้ำมาใช้ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง นอกจากนี้การมองเห็นสีปนเปื้อนในแหล่งน้ำก็ยังเป็นที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็นและไม่ใช่ที่พึงประสงค์ต่อการนำมาใช้ประโยชน์ทั้งด้านอุปโภคหรือบริโภค

6. โลหะหนัก (Heavy metal) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์หรืออนินทรีย์เมื่อปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหารเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยโลหะหนักที่มาจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม เช่น ทองแดง ตะกั่ว โครเมียมและสังกะสี โดยโลหะหนักเหล่านี้แต่ละชนิดมีฤทธิ์หรือพิษรวมทั้งอาการที่แสดงออกเมื่อได้รับสารต่างกันทั้งแบบฉับพลันและแบบสะสม

7. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids) โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีของแข็งแขวนลอย จำพวกเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากเมื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำมีสภาพน่ารังเกียจเพิ่มความขุ่นของน้ำในแหล่งน้ำเป็นสาเหตุของการขาดออกซิเจนในน้ำเนื่องจากพืชและสาหร่ายในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงและหากเกิดการจมตัวสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน นอกจากนี้หากเส้นใยที่ปนออกมานี้เป็นสารอนินทรีย์ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณสารอนินทรีย์ในน้ำ เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายและต้องใช้ออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงจนกระทั่งอาจเกิดภาวะขาดออกซิเจนในน้ำได้

เนื่องจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่งจะมีระบบบำบัดน้ำเสียรองรับน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเพื่อบำบัดให้คุณภาพน้ำทิ้งตรงตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมจะพบว่าสีที่ปนเปื้อนกับน้ำทิ้งนั้นมิได้กำหนดค่าเป็นเกณฑ์ เพียงแต่กำหนดว่าไม่ใช่ที่พึงรังเกียจเท่านั้นและเป็นไปได้ยากที่เจ้าของกิจการจะสังเกตเห็นความสำคัญของการบำบัดสีออกจากน้ำทิ้งเนื่องจากสีเปลี่ยนค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงพบเหตุการณ์ที่น้ำทิ้งซึ่งมีการปนเปื้อนด้วยสีย้อมถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำให้เห็นโดยทั่วไป ซึ่งสี

เหล่านี้เมื่อปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะทำให้แสงไม่สามารถผ่านลงสู่แหล่งน้ำได้ ส่งผลให้สาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงและมีการใช้ออกซิเจนในน้ำมากขึ้น สาหร่ายและสัตว์น้ำตายจากการขาดออกซิเจนจนทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียในที่สุด นอกจากนี้แหล่งน้ำที่มีสีปนเปื้อนยังเป็นที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็นและไม่เป็นที่พึงประสงค์ต่อการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สังเกตเห็นความสำคัญของการกำจัดสีออกจากน้ำเสียโดยอาศัยเทคโนโลยีทางการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

2.2 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้นส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำแต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไปตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดเกณฑ์มาตรฐานสีในน้ำทิ้งให้ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงานต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนโดยวิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้ (รัชนิย์, 2550)

2.2.1 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่สามารถลดปริมาณอินทรีย์สารได้มากที่สุดโดยอาศัยหลักการใช้อุณหภูมิที่ต่างกันมาทำการย่อยสลายเปลี่ยนสภาพของอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นต้น สำหรับการใช้กระบวนการทางชีววิทยาในการบำบัดสีนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงลักษณะน้ำเสียและองค์ประกอบของสีเพราะกระบวนการทางชีวภาพไวต่อสารมลพิษที่อาจมีในน้ำเสียและสามารถที่จะใช้ย่อยสลายสารประกอบสีเพียงบางประเภทหรือทำให้สารมีโมเลกุลที่เล็กลง แต่กระบวนการทางชีววิทยายังจำเป็นต้องมีในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมเพื่อลดค่าสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำส่วนใหญ่ลงซึ่งสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดีได้ตามมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งแต่น้ำทิ้งอาจจะยังคงมีสีอยู่โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมประกอบด้วย (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

2.2.1.1 ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกันโดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ขุดจากพื้นดินโดยตรง หลักการทำงานอาศัยจุลินทรีย์เหมือนกับบ่อแพลคัลเททีฟ มีเครื่องเติมอากาศผิวน้ำแบบทุ่นลอยหรือยึดติดกับแท่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับจุลินทรีย์ การเติมอากาศสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การผสมแบบ

สมบูรณ์ทั่วทั้งบ่อและการกวนผสมเพียงบางส่วน คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.2.1.2 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าบีโอดีในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยมีการเติมอากาศอยู่ตลอดเวลาเกิดมีจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันจุลินทรีย์บางส่วนจะหลุดออกไปพร้อมกับน้ำทิ้ง ดังนั้นต้องมีการออกแบบระบบให้คงปริมาณจุลินทรีย์ไว้โดยกำหนดองค์ประกอบหลักของระบบคือ ถังเติมอากาศและถังตกตะกอน โดยจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารและออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศเพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณกลายเป็นสลัดจ์ นอกจากอากาศที่เติมจะจำเป็นต่อจุลินทรีย์แล้วยังทำให้เกิดการกวนเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเมื่อจุลินทรีย์จมตัวลงที่ก้นถังทำให้ได้น้ำใสให้ไหลล้นออกมาสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้ายและตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนก็จะถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศ เพื่อควบคุมตะกอนจุลินทรีย์แล้วถูกส่งเข้าถังตกตะกอนอีกครั้งซึ่งจะเป็นไปอย่างนี้เรื่อย ๆ จนกว่าน้ำจะสะอาด น้ำทิ้งจากระบบที่ผ่านการบำบัดมักใสและไม่มีกลิ่น เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นมีแต่คาร์บอนไดออกไซด์ คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสามารถปล่อยทิ้งลงทางน้ำสาธารณะได้ ระบบนี้จึงเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสามารถลดค่า BOD ได้มากกว่า 90%

2.2.1.3 ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) เป็นระบบที่น้ำเสียถูกฉีดเป็นฝอยตกลงมายังก้อนหินที่เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์อยู่ จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับก้อนหินเหล่านี้จะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในน้ำขณะที่น้ำไหลผ่านก้อนหินออกไป การทำน้ำให้เป็นฝอยเพื่อต้องการให้น้ำเสียมีออกซิเจนอย่างเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพขั้นตอนนี้จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายในอากาศออกไป น้ำที่ผ่านออกไปจะไปสู่ถังตกตะกอนคล้ายกับถังในการบำบัดในขั้นที่หนึ่ง สิ่งเจือปนในน้ำเสียประมาณ 85 - 90 % จะถูกทำให้เป็นตะกอนและขจัดออกจากน้ำต่อไป น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมจะสามารถถูกบำบัดได้มากโดยวิธีโปรยกรอง แต่สามารถกำจัดได้เพียงบางส่วนซึ่งน้ำทิ้งจากระบบยังคงมีสีอยู่ค่อนข้างมาก

2.2.1.4 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contractor, RBC) เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศให้น้ำเสียไหลผ่านจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บนตัวกลางซึ่งมีพื้นที่ให้จุลินทรีย์ยึดเกาะสูง เช่น เป็นแผ่นจานกลมเรียงซ้อนกัน หรือเป็นแผ่นโปร่งแบบรังผึ้ง ตัวกลางนี้เป็นรูปทรงกระบอก แกนวางตามแนวนอน โดยส่วนล่างจมอยู่ในรางน้ำซึ่งน้ำเสียไหลเข้ามา ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้าๆ ตามแนวนอน ดังนั้นน้ำเสียและจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับตัวกลางจะหมุนลอยขึ้นสัมผัสอากาศทำให้จุลินทรีย์มีโอกาสดูดออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สัมผัสตัวกลางขึ้นมาด้วยแล้วก็หมุนกลับลงไปจมเอาน้ำเสียขึ้นมาย่อยอีกสลับอยู่ตลอดเวลา เกิดเป็นเมือกหนาของจุลินทรีย์แล้วค่อยๆ หลุดออกไป ตะกอนจุลินทรีย์จะถูกนำไปบำบัดในขั้นตอนต่อไปซึ่งระบบนี้ไม่มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีค่อนข้างสูงแต่ปัจจุบันไม่นิยมใช้เพราะมีปัญหาเรื่องแกนเปลวจานหมุนหักบ่อยและการคุมระบบต้องการการเอาใจใส่มาก

2.2.2 กระบวนการบำบัดร่วมทางเคมีและชีววิทยา

กระบวนการบำบัดร่วมทางเคมีและชีววิทยา (Biological activated carbon process, BAC) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการทำงานร่วมกันของการดูดซับของถ่านกัมมันต์และการย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าการใช้วิธีดูดซับธรรมดา หรือการใช้เพียงกระบวนการบำบัดโดยฟิล์มชีวภาพ จากหลักการการทำงานคือการเติมถ่านกัมมันต์ไม่ว่าจะอยู่ในรูปที่เป็นผง (Powder activated carbon, PAC) หรือชนิดที่เป็นเม็ด (Granular activated carbon, GAC) ลงไปในระบบบำบัดทางชีววิทยาที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดขึ้น ซึ่งจากการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการทำงานทางชีวภาพที่เกิดในถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียพบว่าจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมดและคอลลอยด์จะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปยังผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง (Liquid – solid interface) ดังนั้นบนจุลินทรีย์ที่เกาะบนผิวถ่านกัมมันต์จะมีค่าความเข้มข้นที่สมดุล (Equilibrium concentration) ของคอลลอยด์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่มากกว่าที่มีอยู่ในสารละลายทั้งหมด

นอกจากนี้จากการวิจัยของ The Beau of Mines of The U.S. Department of the interior (1996) ยังพบว่าอนุภาคถ่านหิน (Coal) มีความสามารถในการช่วยเพิ่มการเกิดออกซิเดชันทางชีวภาพ จากเหตุผลที่ว่าที่บริเวณผิวหน้าของถ่านมีความเหมาะสมต่อการเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ผิวหน้าถ่านเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวกลางเฉื่อยอื่นๆ เช่น ถ่านหิน หรือทราย เพราะถ่านกัมมันต์มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าดังนั้นจึงมีพื้นที่ให้จุลินทรีย์ได้มาเกาะอาศัยมากกว่าและจากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์และสามารถเลือกดูดซับออกซิเจนจากสารละลายของเหลว (Aqueous solution) โดยสามารถดูดซับออกซิเจนได้จำนวนมากเมื่อถูกล้อมรอบด้วยน้ำแต่จะไม่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนมากนักซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เอื้อประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ นอกจากนี้โพรงหรือช่องว่างที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ยังช่วยป้องกันแรงเฉือนจากน้ำจึงช่วยเพิ่มการยึดเกาะของจุลินทรีย์ดังนั้นในสถานะที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ละลายน้ำและออกซิเจนซึ่งทั้งหมดนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะในบริเวณผิวหน้าถ่านกัมมันต์ที่มีองค์ประกอบทั้งสามมาสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดจึงทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางชีววิทยามีค่าสูง เกิดได้เร็ว ข้อจำกัดของวิธีนี้คือความหนาของฟิล์มชีวภาพจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์เนื่องจากฟิล์มจะไปทำให้เกิดการอุดตันโพรงหรือรูพรุนทำให้การฟุ้งกระจายของสารเข้าไปในรูพรุนของถ่านลดลงแต่เมื่อพิจารณาอีกด้านหนึ่งพบว่าจุลินทรีย์สามารถช่วยฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เรียกว่า "Bioregeneration" ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดแต่พอ

อธิบายได้ว่าเนื่องจาก จุลินทรีย์ไปย่อยสลายสารที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ช่วยยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วการลดลงของภาระบรรทุกต่าง ๆ บนถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่อยู่ในช่องว่าง พื้นที่ผิวนอกและโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่จะมากกว่าการลดลงที่เกิดจาก Bioregeneration ซึ่งเป็นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้ในโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ (ชลธิชา, 2545)

2.2.3 กระบวนการบำบัดทางกายภาพและเคมี

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยวิธีทางกายภาพและเคมีผสมผสานกัน (Physical-chemical process) และต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง เครื่องมืออุปกรณ์ค่อนข้างมากกว่ากระบวนการอื่นๆ แต่ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีจนถึงระดับที่ดื่มได้ นิยมใช้กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการอื่นๆ มาแล้ว สำหรับในการกำจัดสี ถ้าสีนั้นเป็นสารแขวนลอยกระบวนการบำบัดมักจะเลือกใช้กระบวนการทางกายภาพ เช่น การตกตะกอนหรือในกรณีที่เป็นสารแขวนลอยขนาดเล็กหรือคอลลอยด์ซึ่งต้องใช้สารเคมีมาช่วยเพื่อรวมสารแขวนลอยให้มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่ายขึ้นซึ่งเป็นกระบวนการเคมี-กายภาพหรือในกรณีที่เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำให้ค่าซีโอดีสูงจะกำจัดโดยออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมีซึ่งการบำบัดด้วยกระบวนการนี้มีหลายขั้นตอนดังนี้

2.2.3.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างและสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เฟอร์รัสคลอไรด์หรือเฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มเป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้มทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้งจากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสีที่ย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นอย่างดีโดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.2.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีที่ย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้นต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อนซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่

นานนักซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเนชั่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีนหรือซัลเฟอร์เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.2.3.3 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) สามารถกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดีและยาฆ่าแมลง เป็นต้น โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี การดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดติดผิวที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อนโดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาวซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมากเพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอชก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วยทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

2.2.3.4 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane technology) ซึ่งกระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสีและนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี สีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้โดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้างโดยใช้กำจัดสีประเภทสียดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์และสีย้อมประเภทสียัลเฟอร์ สีแวต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (Viscose) ซึ่งสีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) เหมาะสำหรับการกำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอนคือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ

จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สองและสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

3. ไดนามิกเมมเบรน (Dynamic membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลีลิก เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

4. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

จากคุณสมบัติของสีย้อมซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีย้อมอาจทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงตามมา ซึ่งจากปริมาณน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมที่มีปริมาณมากอยู่แล้ว ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพอาจไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยหากพิจารณาเทคโนโลยีการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดทางกายภาพและเคมีซึ่งก็มีหลากหลายวิธีจะพบว่า การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่มีค่าลงทุนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ และกระบวนการดูดติดผิวก็เป็นที่ยอมรับใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ก็มีข้อจำกัดในด้านความสามารถในการดูดติดผิวสารต่างๆ ได้ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังจะได้อธิบายต่อไป นอกจากนี้ราคาสารดูดซับในท้องตลาดที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาวัสดุชีวราคาถูกมาใช้เป็นสารดูดซับและการพัฒนาความสามารถในการดูดติดผิวสารต่างๆ ของสารดูดซับจึงเป็นสิ่งสมควรให้ความสำคัญและเป็นประเด็นที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

2.3 กระบวนการดูดติดผิว

2.3.1 ความหมายของการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption process) หรือมีความหมายเช่นเดียวกันกับการดูดซับเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นที่ผิวของวัตถุของแข็งซึ่งผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างผิวของแข็งกับของไหลไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือก๊าซทำให้มีการถ่ายเทความเข้มข้นสารระหว่างทั้งสองสถานะ ความเข้มข้นสารในของไหลลดลงเนื่องจากอนุภาคสารที่เดิมเคยอยู่ในของไหลถูกดูดติดบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเรียกอนุภาคที่ถูกดูดซับนี้ว่า “ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” ส่วนของแข็งที่ทำหน้าที่ในการเป็นตัวดูดซับเรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbent)” ซึ่งในกระบวนการ

ดูดซับที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับในงานวิจัยนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลวดังรูปที่ 2.7 ที่แสดงให้เห็นการเคลื่อนย้ายของอนุภาคสารจากของไหลมาติดบนผิวของตัวดูดซับ (ธวัชชัย, 2548)

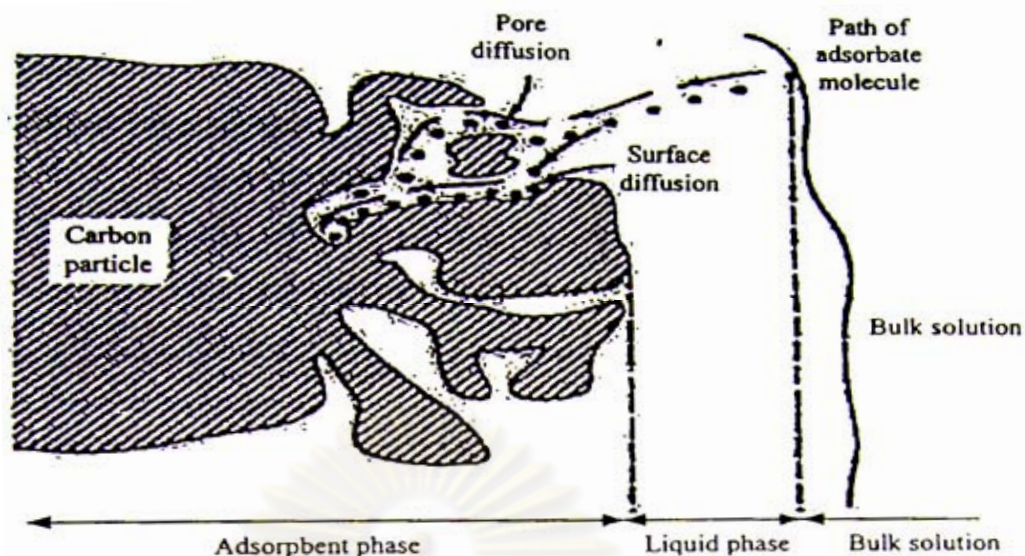
2.3.2 ประเภทของการดูดติดผิว

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ (วจน์สิริ, 2539)

1. การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) เมื่อผลจากแรงดึงดูดของสารดูดซับที่มีต่อโมเลกุลใดๆ มีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารนั้นๆ ทำให้โมเลกุลของสารใดๆ ในของเหลวเคลื่อนตัวมาสัมผัสบริเวณผิวของของแข็งโดยโมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนซึ่งไม่มีการใช้หรือถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นในระบบ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างช้าๆ ทั้งนี้เพราะเกิดการแพร่ของตัวถูกดูดซับไปบนผิวของตัวดูดซับและสามารถผันกลับได้ง่าย กระบวนการที่เกิดขึ้นจะไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ แต่สามารถเกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้

2. การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนการเกาะตัวของโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวเป็นชั้นๆ ในขั้นตอนการดูดติดผิวทางกายภาพแล้วจะเกิดปฏิกริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับเกิดเป็นสารประกอบเคมีใหม่ขึ้นซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการดูดติดผิวทางเคมี โดยการดูดติดผิวแบบทางเคมีจะเกิดการสร้างพันธะทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับซึ่งกระบวนการนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะผันกลับได้ยากหรือจะคงอยู่ในรูปนั้นไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้แต่การดูดติดผิวแบบทางกายภาพสามารถแปรสภาพกลับไปมาได้และกระบวนการที่เกิดขึ้นในการดูดติดผิวทางเคมีจะเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่เฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

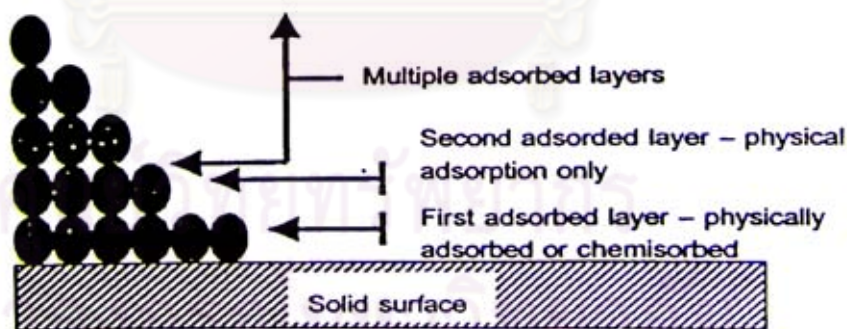
ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับมายังสารดูดซับ (Montgomery, 1985)

2.3.3 กลไกการดูดซับบนถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายกลไกการดูดซับบนตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเมื่อมีโมเลกุลของสารตัวถูกดูดซับเข้ามายังผิวตัวดูดซับในชั้นแรกสารที่ถูกดูดซับจะสามารถทำปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับได้ทำให้เกิดการดูดซับทั้งแบบทางกายภาพและทางเคมี ส่วนในชั้นถัดออกมา การดูดซับของสารหรือโมเลกุลต่างๆ จะเป็นเพียงแค่การดูดซับทางกายภาพเท่านั้น (ธวัชชัย, 2548)

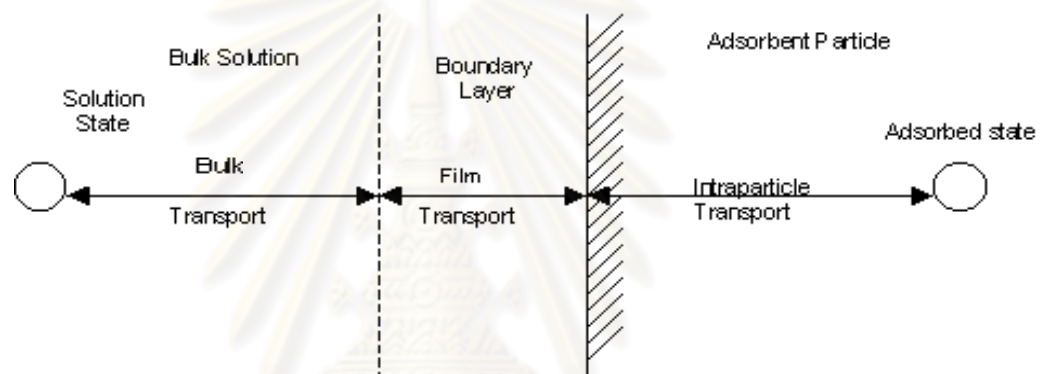


รูปที่ 2.7 รูปแบบชั้นการดูดซับของโมเลกุลบนผิวของแข็ง (Myer, 1999)

2.3.3.1 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับ

การดูดซับอนุภาคต่างๆ ของตัวดูดซับดังรูปที่ 2.8 จะดำเนินไปเป็นขั้นตอนตามลำดับดังต่อไปนี้ (ชลธิชา, 2545)

1. ขั้นตอน Bulk transport เป็นการเคลื่อนที่เข้าหาผิวฟิล์มตัวดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นของไหล ไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือก๊าซโดยผิวฟิล์มนี้คือของเหลวหรือน้ำที่เคลือบห่อหุ้มสารดูดซับไว้คล้ายเป็นเยื่อบางๆ ห่อหุ้มอยู่รอบๆ
2. ขั้นตอน Film diffusion เมื่อโมเลกุลของอนุภาคตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามาถึงตัวดูดซับซึ่งโดยปกติจะมีฟิล์มของน้ำหรือของเหลวห่อหุ้มอยู่ ดังนั้นโมเลกุลของอนุภาคตัวถูกดูดซับจะแทรกตัวเพื่อให้ผ่านฟิล์มให้ได้และเข้าถึงผิวตัวดูดซับในที่สุด
3. ขั้นตอน Pore diffusion เมื่อโมเลกุลของสารตัวถูกดูดซับแทรกตัวผ่านฟิล์มที่เคลือบผิวตัวดูดซับได้แล้วจะพยายามแทรกตัวเพื่อให้เข้าไปถึงช่องว่าง (Pore) ที่อยู่ภายในตัวดูดซับเพราะการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวซึ่งพื้นที่ผิวส่วนมากของตัวดูดซับจะอยู่ที่โพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในดังนั้นจึงเกิดการดูดติดผิวขึ้น



รูปที่ 2.8 ลำดับขั้นตอนของกลไกการดูดติดผิว (Mattson and Mark, 1971)

2.3.3.2 จลนศาสตร์ของการดูดติดผิว (Adsorption kinetic)

จาก Weber และ Morris model ที่กล่าวว่า กลไกต่างๆที่เกิดขึ้นในการดูดติดผิวถูกควบคุมโดยกระบวนการ Overall adsorption ส่วนอัตราที่เกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโดยตรง โดยจากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้เร็วมาก และจากการแบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้น Bulk transport ขั้น Film diffusion และขั้น Pore diffusion พบว่าในขั้นที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบการถ่ายเทมวลสารนอกฟิล์มของตัวดูดซับ โดยในขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในขั้นที่ 3 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสารตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยในการทดลองขั้นนี้จะไม่ขึ้นกับการกวนสารแต่จะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ขนาดของตัวดูดซับ (Size) และขนาดรู (Pore) ของตัวดูดซับ ดังนั้นขั้นที่ 2 และ 3 จะเป็นขั้นที่กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา (ชลธิชา, 2545 ; Mattson and Mark, 1971)

เมื่อพิจารณาจลนศาสตร์ของการดูดซับเทียบกับสภาวะที่สมดุล(Equilibrium) สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง ดังนี้

1. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (The pseudo-first-order-model)
จลนศาสตร์พื้นฐานของการดูดซับจะดำเนินไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ Lagergren expressed ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.1)$$

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่อัตรา Lagergren (1/ time unit)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)

ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตโดยจากเงื่อนไขขอบเขตคือ $q_t = 0$ ที่ $t = 0$ และ $q_t = q_t$ ที่ $t = t$ จะได้

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.2)$$

2. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (The pseudo-second-order-model)
อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนใช้อธิบายผลทางเคมีต่อการดูดซับ เช่น แรงทางวาเลนซ์ที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ อาทิ แรงดึงดูดโควาเลนต์ ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาอันดับสองอาจขึ้นอยู่กับปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับและปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งอัตราจลนศาสตร์สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ k_2 = ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสอง (mg/g – time unit)

ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตโดยจากเงื่อนไขขอบเขตคือ $t = 0$ ถึง t และ $q_t = 0$ ถึง q_t จะได้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.4)$$

ซึ่งหากต้องการทราบอัตราการดูดซับเริ่มต้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$h = k_2 q^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ h = อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/g – time unit)

2.3.4 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว (รัชชัย, 2548)

เมื่อสารที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะเกิดการคายตัวกลับออกสู่สารละลายอีกครั้งจนกระทั่งอัตราการดูดติดผิวของสารที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดติดผิวซึ่งเป็นสภาวะที่คงที่และจะเรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption equilibrium) ซึ่งถือเป็นจุดสมดุลของทั้งระบบ ณ สภาวะที่เกิดขึ้นนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของสารตัวดูดซับหรือในของเหลวหรือแม้กระทั่งอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอื่นๆ ก็จะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงใดๆ ซึ่งการดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นถ้าความเข้มข้นของสารดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

ไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption isotherm) เนื่องจากความสามารถการดูดซับของตัวดูดซับนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับเอง เช่น จำนวนช่องว่างหรือผิวที่ใช้ในการดูดซึมแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการดูดซับหรือสภาพสมดุลซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับหาได้จากการทดลอง โดยนิยามที่จะนำมาแสดงในลักษณะของไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งเป็นเส้นแสดงปริมาณการดูดซับที่สภาวะใดๆ โดยการพล็อตกราฟระหว่างปริมาณสารที่สามารถดูดซับที่สภาวะสมดุล (Equilibrium adsorption capacity, q_e) และความเข้มข้นสุดท้ายที่เหลือจากการดูดซับที่สภาวะสมดุล (C_e) ซึ่งค่า q สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.6

$$q = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad (2.6)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือที่สภาวะสมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลาย (L)

m = น้ำหนักสารตัวดูดซับ (g)

การใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ไอโซเทอมดังต่อไปนี้ (ชลธิชา, 2545)

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

คือ

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่ในบริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- พื้นที่บริเวณดูดซับมีจำนวนแน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

ซึ่งการดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.7)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุลการดูดซับ (mg/g)

q_m = ปริมาณสารสูงสุดที่สามารถถูกดูดซับปริมาณสารดูดซับ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)

b = สัมประสิทธิ์การดูดซับของแลงมัวร์

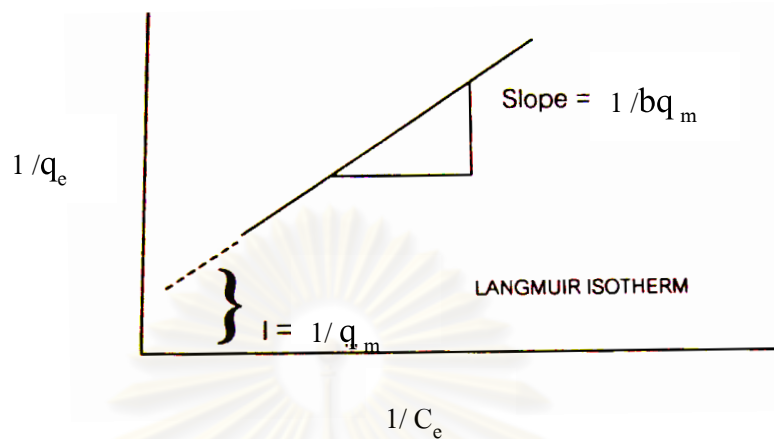
เมื่อ q_e เข้าสู่อันตรกิริยา q_m และ C_e เข้าใกล้ค่าอนันต์ (Infinity, ∞) จะเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{C_e}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{bq_m}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e / q_e กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/q_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bq_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรงคือ

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right) \left(\frac{1}{bq_m}\right) \quad (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงมีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$ จากสมการ 2.9 แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)
สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลวซึ่งมีสมการดังนี้คือ

$$q_e = K C_e^{1/n} \quad (2.10)$$

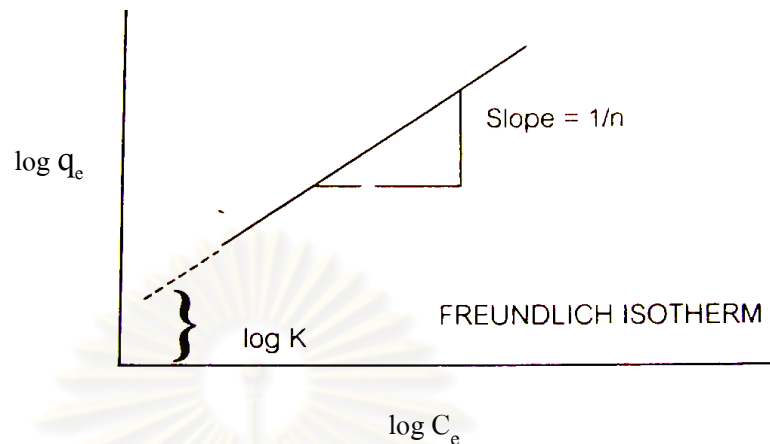
เมื่อ q_e = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สมดุลการดูดซับ (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่สถานะสมดุล (mg/L)
 K, n = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช

จากสมการที่ 2.10 สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้คือ

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ดังรูป 2.10 ซึ่งจากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดีแต่ถ้าค่า $1/n > 1$

แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดีและถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมมีความชันมากแสดงว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ และเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

2.3.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว (รัชชัย, 2548)

การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวดูดซับแล้วก็ยังมีสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวสาร โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลและส่งผลต่อการดูดติดผิวสารมีดังนี้

1. ขนาดของตัวดูดซับ

เนื่องจากความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นตัวดูดซับโดยทั่วไปถ้าหากเป็นวัตถุที่ไม่มีรูพรุนเมื่อขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นั่นคือมีความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงข้ามหากวัตถุตัวดูดซับมีรูพรุนมากและมีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดติดผิวอยู่ในรูพรุน ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของวัตถุตัวดูดซับที่มีรูพรุนไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล

เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีผลต่อความสามารถในการถูกดูดซับโดยน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเพราะความสามารถในการละลายของสารถูกดูดซับยังมีขนาดโมเลกุลที่มากขึ้นจะลดลง

3. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

เมื่อพื้นที่ผิวของวัตถุที่เป็นตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของตัวดูดซับที่มีผลต่อความสามารถ

ในการดูดติดผิว แต่พื้นที่ผิวไม่ได้เป็นเพียงปัจจัยเดียวที่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวยังมีโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของพื้นที่ผิวที่อยู่ภายในรูพรุนได้ โดยการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคของสารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนได้ ความสามารถในการดูดติดผิวสารของตัวดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดการดูดติดผิวสารขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวภายในรูพรุนแต่ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังพื้นที่ผิวที่อยู่ภายในรูพรุนได้ก็จะไม่เกิดการดูดติดผิวขึ้นในบริเวณนี้ทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวสารลดลงกว่าที่ควรจะเป็น

4. ความปั่นป่วน

กระบวนการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นในขั้นตอน Film diffusion หรือ Pore diffusion อาจส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นกับระบบเนื่องจากหากของเหลวเกิดการปั่นป่วนน้อยฟิล์มน้ำที่เคลือบตัวดูดซับก็就会有ความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวนซึ่งทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นกรณีนี้ Film diffusion จะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าของเหลวมีความปั่นป่วนสูงจะเป็นการรบกวนการสะสมตัวของฟิล์มที่ผิวตัวดูดซับจนไม่สามารถเกิดการสะสมตัวเป็นฟิล์มหนาได้ทำให้โมเลกุลหรืออนุภาคของสารตัวถูกดูดสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาพื้นผิวสารดูดซับได้อย่างรวดเร็วกว่าขั้นตอนการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงและในกรณี Pore diffusion จะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราของการดูดติดผิว สำหรับตัวดูดซับชนิดผงมักมีความปั่นป่วนสูง (เช่น มีการกวนน้ำในถังผสม) จะมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวที่ขึ้นอยู่กับ Pore diffusion แต่ถ้าเป็นตัวดูดซับแบบเกล็ดซึ่งลักษณะการใช้งานคล้ายกับถังกรองทรายซึ่งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำ

5. เคมีที่ผิวหน้า

การที่ผิวของตัวดูดซับมี Functional group จะทำให้มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิวได้ เช่น ถ้าสารที่เป็นตัวดูดซับมีโมเลกุลเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ Functional group ที่เป็นกรดแล้วจะมีผลทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวน้อยลง แต่ถ้ามีหมู่ Functional group ที่เป็นคาร์บอนิลก็จะทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

6. ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายสูงเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลายซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวเนื่องจากก่อนเกิดกระบวนการดูดติดผิวขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน ดังนั้นจากเหตุผลนี้จึงส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายการดูดติดผิวลดลง

7. ความมีขี้ว

เมื่อพิจารณาถึงน้ำเสียที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายความมีขี้วของสารตัวถูกดูดซับที่มีเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายของสารตัวถูกดูดซับมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวสารนั้นของตัวดูดซับมีค่าลดลง

8. ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช

สภาพความเป็นกรดด่างนี้เป็นผลมาจากไฮโดรเนียมไอออนซึ่งเป็นตัวที่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวโดยความเป็นกรด-ด่างนี้จะไปเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโมเลกุลที่เป็นสารดูดซับกับโมเลกุลที่เป็นตัวถูกละลาย เช่น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ผิวของตัวดูดซับให้มีสภาพเป็นกลางแล้วตัวดูดซับจะสามารถดูดซับได้ทั้งกรด $[H_3^+O]$ และเบส $[OH^-]$

9. อุณหภูมิ

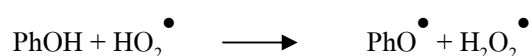
อุณหภูมิมิอิทธิพลต่ออัตราเร็วในการดูดติดผิวโดยตรงซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดติดผิวสารของตัวดูดซับ เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิเมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อนแต่เมื่อพิจารณาด้านการดูดติดผิวของสารตัวดูดซับซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวลดลง ในทางตรงข้ามถ้าอุณหภูมิลดต่ำลงก็จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดผิวสารเพิ่มสูงขึ้น

10. โมเลกุลออกซิเจน (ชลธิชา, 2545)

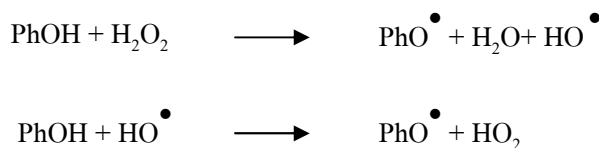
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า โมเลกุลของออกซิเจนมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวสารประกอบหลายชนิดของถ่านกัมมันต์ โดยจากงานวิจัยของ Vidic และคณะซึ่งศึกษาการดูดติดผิวฟีนอลพบว่าในสภาวะที่มีออกซิเจน(Oxic) ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากในสภาวะที่มีโมเลกุลออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยากู่ควบแบบออกซิเดชัน (Oxidative coupling) เกิดขึ้นบนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์และสารประกอบโดยที่โมเลกุลออกซิเจนจะเป็นตัวตั้งต้นของปฏิกิริยา Oxidative coupling ของฟีนอลซึ่งออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับฟีนอลโดยตรงดังสมการ (Vidic, 1993)



ผลจากสมการข้างต้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลฟีนอลอีกโมเลกุลดังสมการ



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสมการข้างต้นจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของฟีนอลอีกโมเลกุลดังสมการ



จากการทดลองดังสมการการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นได้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 180-210 °C ที่ความดัน 35 บรรยากาศ ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดสภาวะกระตุ้นที่สูงแต่ก็มีงานวิจัยบางฉบับที่รายงานว่า การเกิด Oxidative coupling สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้องเมื่อมีเกลือ Copper (I)

2.4 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โดยทั่วไปผลิตจากวัตถุดิบหลักคือ กะลามะพร้าว แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ชนิดผงละเอียดและชนิดเม็ดหรือเกล็ด โดยชนิดผงละเอียดสามารถกระจายน้ำได้ดีจึงนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลวเช่น ใช้ฟอกสีหรือดูดกลิ่นในอุตสาหกรรมน้ำตาล การผลิตน้ำมันพืช อุตสาหกรรมอาหารและการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ส่วนชนิดเม็ดหรือเกล็ดใช้ในอุตสาหกรรมการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น เครื่องกรองอากาศ เครื่องกันก๊าซพิษ ถังกรองนุหรี เป็นต้น

การเติบโตของอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์แปรตามการใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องซึ่งมีอยู่มากมายเช่น กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องกรองอากาศ อุตสาหกรรมน้ำดื่มและน้ำประปา อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ยังใช้ในครัวเรือนโดยเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น เช่น กลิ่นอับในตู้เย็น ตู้เสื้อผ้า ตู้รองเท้า เป็นต้น ดังนั้นจะพบว่าตลาดของถ่านกัมมันต์มีอยู่อย่างกว้างขวางมีแนวโน้มการใช้งานสม่ำเสมอทั้งในประเทศและส่งออกจำหน่ายยังต่างประเทศ แต่อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการคุณภาพของถ่านกัมมันต์ระดับสูง เช่น ในอุปกรณ์ฟอกอากาศบางชนิด จึงทำให้ยังมีมูลค่าการนำเข้าสูงกว่ามูลค่าส่งออกในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ปริมาณนำเข้า (ตัน)	ปริมาณส่งออก (ตัน)
2544	15,625	7,968
2545	14,969	9,056
2546 (ม.ค. – พ.ค.)	5,013	2,707

2.4.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอคทีฟคาร์บอน (Active carbon) หรือแอคทีเวตเต็ดคาร์บอน (Activated carbon) เป็นถ่านที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ได้มีการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพให้มากขึ้นโดยการเผาในที่อับอากาศและมีออกซิเจนน้อยมากเพื่อไม่ให้วัสดุติดเกิดการลุกไหม้และสูญเสียไปในรูปขี้เถ้าโดยความร้อนจะค่อยๆ คุ เมื่อเสร็จสิ้นการเผาแล้วนำไปร่อนเอากรวด หิน ดิน ทราย ขี้เถ้า และสิ่งสกปรกต่างๆ ออกให้หมดและนำไปบดให้ได้ขนาดตามต้องการจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยเทคนิคต่างๆ จนกลายเป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งวิธีนี้เป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดรูพรุนและการแตกแขนงภายในเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทำให้ถ่านที่ได้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับ สี กลิ่น สารอินทรีย์ อนุภาคสารพิษต่างๆ รวมถึงก๊าซพิษได้สูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โดยจำนวนและขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการดูดซับ การบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะบอกให้ทราบในรูปของค่าไอโอดีนซึ่งเป็นค่าที่บอกความสามารถในการดูดซับไอโอดีนในสารละลาย โดยยิ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไอโอดีนจากสารละลายได้มากเท่าไรแสดงว่าประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งตามมาตรฐาน AWWA (American water work association) กำหนดให้ถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกรัม

Derbyshire กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง สามารถดูดซับสารเคมีจากก๊าซและของเหลวได้ดี และสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่

Jankowska กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือ การนำเอาวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำให้วัสดุติดนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (87-90%) และมีธาตุอื่นที่เป็นองค์ประกอบคือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณเล็กน้อยเท่าใดนั้นขึ้นกับปริมาณที่มีในวัสดุติดและอาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการผลิต

ตาม มอก. 900-2532 กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุติดธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีถ่านกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ ถ่านกราไฟต์ ตรงที่ถ่านกัมมันต์มีความพรุน (Porosity) มากกว่า ซึ่งความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือทางกายภาพทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างผลึก (Elementary crystallites) ในถ่านเพิ่มขึ้น การเลือกใช้วิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมจะทำให้ได้รูพรุนเป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นสามารถดูดซับสารมากกว่าถ่านธรรมดา

2.4.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (เพ็ญลักษณ์, 2547)

การศึกษาเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์ควรทราบข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ดังนี้

2.4.2.1 ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของแกรไฟต์ เพียงแต่การจัดเรียงตัวของถ่านกัมมันต์มีความเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ โดยโครงสร้างของถ่านจะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนในรูปแบบวงเบนซิน (Benzene ring) หรืออาจเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม โดยพันธะที่เกิดขึ้นจะเป็นการสร้างพันธะเดี่ยวในลักษณะแผ่นแนวราบกับคาร์บอนสามอะตอม โดยความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม ส่วนอีกอะตอมที่เหลือจะเคลื่อนที่อิสระทั่วโครงสร้างเป็นลักษณะที่เรียกว่าเรโซแนนซ์ (Resonance) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นในโครงสร้างเป็นแรงประเภทแวนเดอร์วาลส์เรียงกันเป็นชั้นๆ โดยระยะระหว่างแผ่นแนวราบห่างกันประมาณ 2.354 อังสตรอม ดังนั้นการย้ายที่ (Displacement) จะเกิดขึ้นได้ง่ายในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) เพราะเป็นตำแหน่งที่แรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลส์อ่อนทำให้การเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือข้อบกพร่องต่างๆ ที่จุดหรือบริเวณนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในโครงสร้าง

2.4.2.2 โครงสร้างทางเคมี

ในที่นี้หมายถึงโครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์เนื่องจากเป็นบริเวณที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับมลพิษของถ่านกัมมันต์โดยตรง จากการเตรียมถ่านกัมมันต์ขึ้นมาโดยการนำวัสดุขึ้นมาเผาเอาอินทรีย์สารออกด้วยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 1000°C หรือที่เรียกกันว่ากระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นขั้นตอนที่ทำให้อะตอมต่างๆ นอกจากคาร์บอนถูกกำจัดออกไป เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ซึ่งถูกขับออกไปในรูปของก๊าซ ส่วนอะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงกันในลักษณะรูปแบบวงเบนซินเป็นชั้นๆ ซึ่งการเชื่อมโยงกันที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณที่สารที่เกิดจากการเผาสลาย เช่น น้ำมันดิน (Tar) มาอาศัยอยู่ แต่จากโพรงเหล่านี้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นจะทำให้โพรงกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับมลพิษเนื่องจากกระบวนการนี้จะขับน้ำมันดินและสารต่างๆ ที่อาศัยในโพรงหรือช่องว่างนี้ออกพร้อมทั้งยังสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทนเป็นผลให้มีความสามารถในการดูดซับมลพิษของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น

เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในโครงสร้างถ่านกัมมันต์เป็นสาเหตุที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับมลพิษ เนื่องจากเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่มีสภาพไม่เสถียรคือ เป็นวาเลนซ์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) ดังนั้นจึงพยายามไปเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นๆ เช่น อะตอมต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตั้งต้นหรือออกซิเจนในอากาศซึ่งกระบวนการกระตุ้นจะเป็นขั้นตอนที่ช่วยให้เกิดการเกาะกันระหว่างอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นๆ ทำให้กลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง โดย

มักเกิดขึ้นกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่บริเวณขอบของวงเบนซินที่อุณหภูมิสูง 400-500 °C ถ่านกัมมันต์จะสามารถดูดติดผิวแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนซึ่งจะเกิดเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังสามารถสร้างพันธะกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงถึงแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1000 °C ก็ไม่สามารถทำให้อะตอมหลุดออกมาและในสถานะเดียวกันนี้สามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนียหรือซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมทั้งดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุลของฮาโลเจนในสภาพที่เป็นก๊าซหรือของเหลวซึ่งเป็นเหตุผลที่เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ขึ้นบนผิวของถ่านกัมมันต์ โดยที่สำคัญคือผิวถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่าผิวออกไซด์

2.4.2.3 โครงสร้างรูพรุน

ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เมื่อนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นจะทำให้ได้ถ่านที่มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการกระตุ้นจะทำให้เกิดการขับสารประกอบคาร์บอนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกของคาร์บอน โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยต้องคำนึงว่าการกระตุ้นที่เหมาะสมนั้นเป็นการทำให้ถ่านมีความพรุนไม่ใช่การเพิ่มขนาดรูให้ใหญ่ขึ้น

ลักษณะเด่นที่ผิวถ่านกัมมันต์ คือ จะมีรูพรุนจำนวนมากซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันซึ่งรูจะลึกเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์อย่างไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นระเบียบ โดยไม่สามารถบอกรูปร่างของรูได้แน่นอนเพราะบางรูอาจมีรูปร่างลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่งหรือบางครั้งอาจเป็นรูปตัววี ในทางการค้าถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดประมาณ 200- 300 m²/g ถือว่าเป็นขนาดกลางซึ่งถ้าหากเป็นรูพรุนขนาดเล็กก็จะมีผลต่อความจุในการดูดติดผิว นอกจากนี้ความจุในการดูดติดผิวจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิว เช่น หากเป็นผิวบริเวณที่เป็นระนาบซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันใดๆ การดูดติดผิวก็จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์หรือจากอิเล็คตรอนอิสระซึ่งแรงยึดเป็นบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันจะทำให้การดูดติดผิวเกิดจากแรงที่แข็งแรงโอกาสหลุดของโมเลกุลสารที่ถูกดูดติดผิวจึงเกิดขึ้นน้อยกว่า ในที่นี้หมู่ฟังก์ชันที่พบกันบ่อยในบริเวณผิวถ่านกัมมันต์ มี 2 ชนิด คือพวกออกไซด์ของกรด กรณีนี้นี้จะพบในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400-500 °C และยังมีพวกออกไซด์ของค่าง กรณีนี้นี้พบในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800-1000 °C

2.4.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งตามลักษณะรูปร่างได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.4.3.1 ชนิดที่เป็นผงละเอียด (Powder activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กกว่า U. S. เบอร์ 50 (297 ไมครอน) มีคุณสมบัติสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดีแต่ไม่สามารถนำมาใช้

ใหม่ได้มักใช้ในการดูดติดผิวสารละลาย เช่น สี สารอินทรีย์ โดยทั่วไปจะผลิตโดยการใช้สารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ ในการกระตุ้นเศษไม้ ถ่าน หรือขี้เลื่อย แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็กกลง ซึ่งการบดจะทำให้ได้รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันทำให้ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติที่จะนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกันด้วย ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักนิยมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว ได้แก่

1. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์ในการฟอกสีและทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น
2. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชสำหรับบริโภค ใช้ถ่านกัมมันต์ในการฟอกสีและทำให้มีรสชาติดีขึ้น
3. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์ในการฟอกสีและดูดกลิ่นผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นที่อาจทำให้เกิดสารพิษตกค้างในร่างกายของผู้บริโภคได้
4. อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกิจการทำน้ำประปา ตลอดจนน้ำดื่มบรรจุขวดที่นิยมใช้ดื่มกันในปัจจุบันก็ใช้ถ่านกัมมันต์ในจุดจับสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งสกปรกในน้ำ

2.4.3.2 ชนิดที่เป็นเม็ดหรือเกล็ด (Granular activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่กว่า U. S. เบอร์ 50 (297 ไมครอน) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้สามารถนำเอาส่วนที่ผ่านการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ในครั้งต่อไปโดยนำไปผ่านขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น

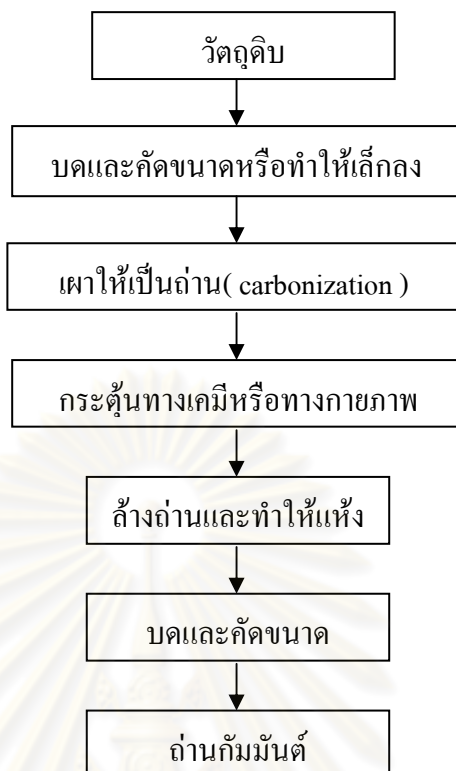
1. อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดก๊าซต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ซึ่งในปัจจุบันจากปัญหามลพิษต่างๆ ในสภาพแวดล้อมที่ประชาชนส่วนใหญ่ตื่นตัวกันมาก ดังนั้นเครื่องกรองอากาศที่มีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น
2. อุตสาหกรรมการทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้กันโดยทั่วไปและในด้านการทหารซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวก๊าซพิษและไอของสารพิษ
3. อุตสาหกรรมทำก๊าซ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดสิ่งสกปรกทำให้ก๊าซบริสุทธิ์และดูดไฮโดรคาร์บอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
4. อุตสาหกรรมการผลิตบูทหรือยางยืด เพื่อกรองก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำมันดิน (Tar) โดยนำถ่านกัมมันต์มาไว้ที่ก้นกรอง
5. อุตสาหกรรมทำเหมืองแร่ทองคำ

บางครั้งถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดหรือเกล็ดก็ถูกนำมาใช้ในการดูดซับพิษสารละลายด้วย เช่น การดูดซับคลอรีนในน้ำ การฟอกสีในสารละลาย โดยในปัจจุบันเราสามารถแบ่งเกรดของถ่านกัมมันต์ออกเป็น 2 เกรด คือ High grade และ Low grade โดย High grade นั้นมีองค์ประกอบในรูปของผงละเอียด 48 % และในรูปของเม็ดหรือเกล็ด 20 % ส่วน Low grade นั้นมีองค์ประกอบในรูปของผงละเอียด 20 % และในรูปของเม็ดหรือเกล็ด 12 %

2.4.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์เป็นการนำเอาวัตถุดิบต่างๆ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว ไม้ เปลือกไม้ แกลบ ถ่านหิน ชังข้าวโพด กากกาแฟ ของเสียจากโรงงานเชื้อกระดาษ ขี้เลื่อย มาผ่านกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีมากมายหลายวิธี ทั้งนี้จะเลือกใช้วิธีใดขึ้นกับวัตถุประสงค์ว่าต้องการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานเพื่ออะไร ชนิดของวัตถุดิบที่จะนำมาผลิต รวมทั้งคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนที่สองการเผาให้เป็นถ่านหรือที่เรียกกันว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และขั้นตอนที่สามการกระตุ้นหรือที่เรียกว่า แอคติเวชัน (Activation) ซึ่งการจัดการกับวัตถุดิบจนกระทั่งได้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 2.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.4.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ (ชวัชชัย, 2548)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์สารที่มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกเซลลูโลสจากพืชและต้นไม้หรืออาจเป็นพวกถ่านหินบางครั้งอาจมีพวกวัตถุดิบจากสัตว์บ้างแต่ไม่มากนัก ซึ่งขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบโดยทั่วไปจะนำวัตถุดิบมาทำการบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำคาร์บอนไนซ์ โดยก่อนทำการบดควรนำวัตถุดิบไปอบหรือตากให้แห้งเพื่อจะได้ทำการบดและคัดขนาดเป็นไปโดยง่าย หรืออาจนำวัตถุดิบมาผ่านการคาร์บอนไนซ์ก่อนบดก็ได้ หากวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์อาจนำมาทำเป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตาหรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบที่จะผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ก่อนผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนหรือขั้นตอนการกระตุ้นควรให้มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 20 เนื่องจากจากความชื้นเป็นตัวชีวิตที่สำคัญเพราะถ้าความชื้นที่มากกว่านี้จะทำให้ถ่านที่ได้เกิดรูพรุนน้อยซึ่งก็หมายถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาใช้งานจริงมีคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ควรพิจารณา ได้แก่

1. มีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ต่ำ
2. มีคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

3. มีปริมาณขี้เถ้า (Ash) ต่ำ
4. มีราคาถูกและหาได้ง่าย
5. มีคุณสมบัติคงที่
6. สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง ตัวอย่างเช่น พืท ถ่านหินลิกไนต์

ไม้ และ กะลามะพร้าว

2.4.4.2 ขั้นตอนและกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน (Carbonization)

ในการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมักใช้วิธีเผาในที่อับอากาศเพื่อไม่ให้วัตถุดิบกลายเป็นเถ้าซึ่งอุณหภูมิในการเผาประมาณ 200 – 400 °C หรืออาจทำการเผาในที่อับอากาศโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 °C ในเตาเผาแบบที่ใช้การกลั่นทำลาย (Destructive distillation) ซึ่งการใช้เตาเผาชนิดนี้จะได้ปริมาณถ่านมากกว่าการเผาแบบที่ชาวบ้านนิยมใช้ เช่น การเผาในถังน้ำมัน 200 ลิตร ซึ่งเป็นวิธีที่เกิดขี้เถ้าในปริมาณมากทำให้ได้ปริมาณถ่านต่ำ

2. ขั้นตอนการนำถ่านไปเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์

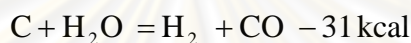
นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่าการกระตุ้น(Activation) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1) วิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) เป็นการกระตุ้นด้วยสารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ โปแตสเซียมคาร์บอเนต ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น โดยการนำเอาวัตถุดิบที่จะใช้ทำถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารเคมีเหล่านี้ซึ่งสารเหล่านี้สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึงและทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้น จากนั้นนำไปเผาในที่อับหรือมีอากาศเข้าไปน้อยที่สุดเป็นเวลานานหลายชั่วโมงโดยใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 600-700 °C แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องทำการล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลยเพื่อความปลอดภัยในการนำมาใช้งานแล้วนำมาผึ่งแดดให้แห้งซึ่งวิธีการผลิตประเภทนี้เป็นวิธีที่มีต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากต้องนำเข้าสู่สารเคมีจากต่างประเทศและอาจมีสารเคมีตกค้างซึ่งการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นตัวกระตุ้นจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อถ่านทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่

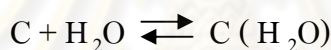
2.2) วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการนำถ่านมาทำการกระตุ้นด้วยสารที่เหมาะสมซึ่งส่วนใหญ่เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้ก๊าซ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ หรือไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- การกระตุ้นด้วยอากาศหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์น้ำมันดินทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีข้อเสียคือมักมีปัญหาในการควบคุมกระบวนการผลิตและมีผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำ

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ วิธีการจะคล้ายกับการกระตุ้นด้วยอากาศโดยจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์น้ำมันดินและบางส่วนของอะตอมคาร์บอนซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น และใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงเพราะการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated stream) ผ่านเข้าไปในถ่านซึ่งเผาในอุณหภูมิสูง 800 – 1000 °C ในที่อับหรือมีอากาศเข้าไปน้อยที่สุด โดยใช้เวลาและความดันที่เหมาะสมซึ่งในขณะที่ถ่านสัมผัสกับไอน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังนี้



โดยมีกลไก (Mechanism) ที่อธิบายได้ดังนี้



จากสมการ H_2 และ CO ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะหลุดออกไปทำให้เกิดรูพรุนแต่ CO ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยาให้ CO_2 และ C ดังสมการ



จากกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายไปทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะพรุน (Porous) อยู่ทั่วไป ขนาดรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมีซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถนำมาใช้งานได้เลยทันทีโดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้างซึ่งวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำนี้เป็นวิธีการผลิตที่มีต้นทุนต่ำกว่าการผลิตด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมีเนื่องจากลดขั้นตอนการล้างสารเคมีออกจากถ่าน นอกจากนี้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับพิษสารต่างๆ ได้แตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density) เช่น กะลามะพร้าว จะมีคุณสมบัติดูดซับก๊าซและสีได้ดีกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง

นอกจากการกระตุ้นสามารถทำได้โดยวิธีทั้งสองนี้แล้วก็ยังอาจใช้วิธีทั้งสองร่วมกันได้โดยเมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้ก๊าซหรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด เพื่อการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้นซึ่งขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

2.4.5 คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ (เพ็ญลักษณ์, 2547)

ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับสามารถดูดซับทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ก๊าซรวมทั้งโลหะหนัก โดยอัตราการดูดติดผิว (Adsorption rate) ของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของคาร์บอน (Carbon particle size) แต่ความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive capacity) จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส ปัจจุบันมีการนำคุณสมบัติความเป็นตัวดูดซับของถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายโดยจำแนกลักษณะการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดตัวกลางที่มีการปนเปื้อนดังนี้

2.4.5.1 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดก๊าซหรือไอ

1. ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดก๊าซพิษหรือไอของสารอินทรีย์ ซึ่งนิยมใช้กันในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษมีคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
2. ใช้ถ่านกัมมันต์แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดไอระเหยเหล่านั้นในสถานะอุณหภูมิห้องและคายออกที่สถานะความดันไอต่ำๆ นิยมใช้กันในงานด้านการสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
3. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ในโตรเจน ไฮโดรเจน ซีเลียม อะเซทีลีน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ แอมโมเนีย เป็นต้น
4. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

2.4.5.2 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้กับของเหลว

1. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการฟอกสี นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารโดยทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ขึ้น เช่น ในอุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
2. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการแยกเอาสบูและเปอร้อออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมัน
3. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการแยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม เพ็คติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ ทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหารจึงไม่เป็นอันตราย
4. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น เอสเทอร์ ใช้กับพวกอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เพื่อให้เครื่องดื่มมีรสชาติดีขึ้น
5. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี กลิ่นและรสจากน้ำเพื่อทำให้น้ำดื่มบริสุทธิ์ขึ้น หรือสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารพวกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้
6. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการสกัดโลหะ เช่น ทองคำ
7. ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวด้วยยา ใช้ในทางการแพทย์เพื่อให้ยาออกฤทธิ์อย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังใช้ในการดูดติดผิวสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาดหรือผู้ที่กินยาพิษ รวมทั้งสามารถใช้ในการรักษาอาการก๊าซในกระเพาะอาหารมากได้อีกด้วย

2.4.6 การปรับคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ (เพ็ญลักษณ์, 2547)

เนื่องจากการดูดติดผิวสารของถ่านกัมมันต์เกิดที่บริเวณพื้นที่ผิวรูพรุน ดังนั้นเมื่อการใช้งานดำเนินไปโมเลกุลของสารหรือสิ่งสกปรกจะทำให้รูพรุนเกิดการอุดตันซึ่งถือว่าถ่านหมด

ประสิทธิภาพ (Exhausted carbon) ในการดูดซับแล้ว แต่สำหรับถ่านที่ผ่านการใช้และหมดประสิทธิภาพแล้วนี้สามารถที่จะฟื้นฟูประสิทธิภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยการนำถ่านส่วนนี้ไปผ่านขั้นตอนการกำจัดโมเลกุลของสารต่างๆที่ไปอุดตันรูพรุนออกไปโดยเทคนิคที่ใช้กันในการฟื้นฟูประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ก็มีอยู่หลายวิธี ได้แก่

2.4.6.1 การฟื้นฟูประสิทธิภาพด้วยวิธีทางเคมี

วิธีนี้เป็นการใช้สารอนินทรีย์เคมีเพื่อมาทำการออกซิไดซ์สิ่งสกปรกหรือโมเลกุลต่างๆ ที่อุดตันอยู่ในรูพรุน แต่วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่มีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์โดยการเผาในเตา

2.4.6.2 การฟื้นฟูประสิทธิภาพด้วยการเผา

วิธีนี้เป็นการนำถ่านกัมมันต์ไปฟื้นฟูคุณภาพโดยเผาในเตาเผาแบบ Multiple chamber ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมสภาวะของการเผาไหม้เพื่อให้สิ่งสกปรกหรือโมเลกุลต่างๆ ที่อุดตันอยู่ในรูพรุนนั้นระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ไป ซึ่งการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์โดยวิธีนี้มีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. นำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ มารวมตัวกันกับน้ำให้กลายเป็นน้ำขุ่น (Slurry) จากนั้นสูบเข้าไปในระบบฟื้นฟูคุณภาพ
2. เมื่อถ่านกัมมันต์เข้าสู่ระบบฟื้นฟูคุณภาพ ถ่านกัมมันต์จะถูกแยกออกจากน้ำ แล้วถูกส่งต่อเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิสูง 870-980 °C ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมการเผาไหม้เพื่อให้สิ่งสกปรกหรือโมเลกุลต่างๆที่อยู่ในรูพรุนระเหยกลายเป็นไอและถูกเผาไหม้ไป
3. ถ่านกัมมันต์ที่ถูกขั้สารที่อุดตันรูพรุนออกเสร็จแล้วยังยังร้อนจัดอยู่ ดังนั้นต้องทำให้เย็นลงด้วยการจุ่มลงในน้ำ (Quenching)
4. ถ่านกัมมันต์ที่เย็นแล้วจะถูกนำไปล้างอีกครั้งเพื่อทำความสะอาดเอาเศษผงถ่านออก จากนั้นจึงสูบถ่านกัมมันต์ที่สะอาดแล้วไปเก็บไว้หรือนำไปใช้งานต่อไป

จากขั้นตอนการฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์ข้างต้นนี้จะทำให้สูญเสียถ่านไปประมาณร้อยละ 2-10 ใช้เวลาในการจัดการตามขั้นตอนทั้งหมดประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,250 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์

2.4.7 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิดซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้เลื้อย ช้างข้าวโพดหรือจำพวกถ่านหินก็ได้แก่

ลิกไนต์ แอนทราไซต์ ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดูกสัตว์ เลือดสัตว์ ขาสัตว์ เป็นต้น

ในปัจจุบันวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องเป็นวัตถุดิบที่มีเป็นจำนวนมากและสามารถหาซื้อได้ง่ายซึ่งก็คือกะลามะพร้าวที่สามารถซื้อจากเกษตรกรที่ทำการเผาถ่านในพื้นที่จังหวัดทางภาคใต้ของไทย นอกจากนี้ผู้ผลิตถ่านกัมมันต์รวมทั้งหน่วยงานภาครัฐ โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการยังได้มีการคิดค้นและพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กะลาปาล์มน้ำมันซึ่งพบว่าเป็นวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณภาพดีมีความเหมาะสมต่อการผลิต อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายและมีเป็นจำนวนมาก

2.5 ไคโตซาน

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์กุ้งมากขึ้นซึ่งปัญหาที่ตามมาคือปริมาณหัวกุ้งและเปลือกกุ้งที่มีมากขึ้น ซึ่งการนำเปลือกกุ้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไคตินและอนุพันธ์ของไคตินคือไคโตซานจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้ง เพราะไคโตซานมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลลูโลส มีสมบัติในการดูดซับสีข้อมได้ดีจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีข้อมจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้

2.5.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไคโตซาน (สำนักบริการวิชาการ, 2550)

ไคตินและไคโตซานเป็นสารโพลีเมอร์ธรรมชาติที่พบได้ในโครงสร้างของสัตว์จำพวกครัสเตเชีย เช่น กุ้ง ปูและหมีก นอกจากนี้ยังพบได้ในหอย แมลง และผนังเซลล์เชื้อรา ในปัจจุบันมนุษย์ได้นำสารดังกล่าวมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านอาหาร การแพทย์และเภสัชกรรม อุตสาหกรรมการเกษตรและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ไคตินและไคโตซานจัดอยู่ในกลุ่มของสารพอลิเมอร์ไฮโดรฟิลิกซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนอยู่ร่วมด้วย สารดังกล่าวนี้ถูกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติดังนั้นจึงมีความปลอดภัยในการนำไปใช้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อในด้านลบต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

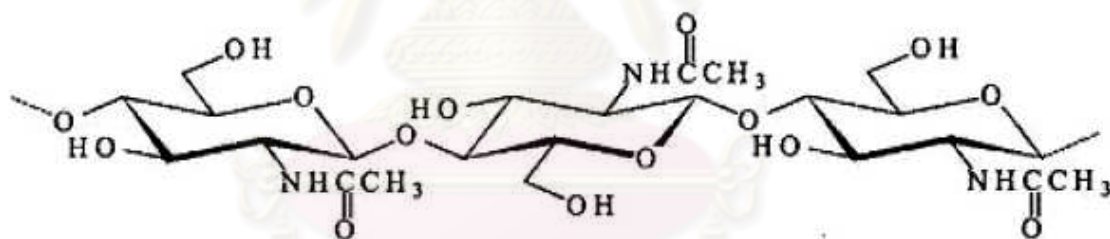
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตไคตินและไคโตซานได้มีการขยายตัวไปอย่างมากเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคซึ่งมีความต้องการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ แหล่งของวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตไคโตซานในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ เปลือกกุ้ง เปลือกปูและแกนหมีก ซึ่งประเทศไทยถือว่าเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์ไคตินและไคโตซานที่สำคัญเนื่องจากมีข้อได้เปรียบในด้านวัตถุดิบดังกล่าวซึ่งได้มาจากของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามการใช้วัตถุดิบดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น

1. ฤดูกาล ซึ่งปริมาณของสัตว์น้ำขึ้นอยู่กับฤดูกาลมีผลกระทบต่อปริมาณวัตถุดิบที่จะใช้ในการผลิต
2. การจัดเก็บวัตถุดิบก่อนการแปรรูป ซึ่งอาจประสบปัญหาในเรื่องพื้นที่จัดเก็บและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็น
3. ต้นทุนการผลิต ในปัจจุบันพบว่าประมาณร้อยละ 50 ของต้นทุนการผลิตไคตินและไคโตซานในระดับอุตสาหกรรมนั้นเป็นค่าวัตถุดิบ ส่งผลให้ราคาของผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดนั้นค่อนข้างสูง

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นอีกประเด็นที่ควรให้ความสนใจ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัตถุดิบอื่นๆ มาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตไคตินและไคโตซานในอนาคต

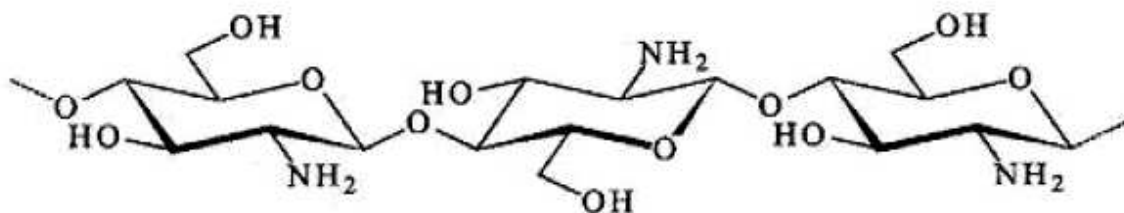
2.5.2 โครงสร้างของไคโตซาน (ภาวดี และอิสรา, 2543)

ไคตินเป็นสารโพลีเมอร์ชีวภาพประเภทโพลีแซคคาไรด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตประเภทที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยคล้ายคลึงกับเซลลูโลสจากพืชซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไคติน

ไคโตซาน คือ สารโพลีเมอร์ชีวภาพที่สกัดจากไคตินซึ่งเป็นการนำเอาอนุพันธ์ของไคตินมาตัดเอาหมู่อะซิทิล (Acetyl) ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกไปตั้งแต่ 50% ขึ้นไป โดยปฏิกิริยาที่เรียกว่า Deacetylation ทำให้โครงสร้างของไคตินเป็นที่เป็น N-acetylglucosamine กลายเป็น Glucosamine ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แอกทีฟพร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วมีสมบัติสามารถละลายในกรดอ่อน เช่น กรดอะซิติก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ และส่วนกรดเกลือ กรดฟอสฟอริก กรดฟอร์มิกซึ่งเป็นกรดอนินทรีย์ ซึ่งไคโตซานมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของไคโตซาน

2.5.3 คุณสมบัติของไคโตซานต่อการดูดติดผิว

เนื่องจากไคโตซานเป็นสารโพลิเมอร์ชีวภาพที่มีประจุบวก (Cationic biopolymer) โมเลกุลของไคโตซานประกอบด้วยหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมากและจากความ เป็นประจุบวกของไคโตซานจึงสามารถดูดสารที่มีประจุลบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น การดูดซับน้ำมันหรือแม้กระทั่งโปรตีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ โดยทำให้ประจุลบเกิดการสูญเสียเสถียรภาพโดยอาศัยกลไกการสะเทินประจุ (Neutralize)

ในระบบบำบัดน้ำเสียมีการใช้ไคโตซานในการกำจัดโลหะหนักและสารพิษ โดยเฉพาะสารกัมมันตรังสี เช่นพวก พลูโตเนียม ยูเรเนียม เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติในการจับสารแขวนลอยได้ดีและยังสามารถจับกับอะตอมของโลหะหนัก เช่น โปรท ตะกั่ว แคดเมียม โดยประจุบวกของโลหะหนักจะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่าพันธะเชิงซ้อนขึ้นมา นอกจากนี้ไคโตซานยังหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน โดยจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยๆ ในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นๆ และตะกอนลงมาและยังไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ได้สนับสนุนงานวิจัยเรื่องโครงการการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นผลงานของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ พบว่าเกลือไฮโดรโบรไมด์ของไคโตซานและไคโตซาน-พอลิอะคริลาไมด์สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการได้โดยสีที่ถูกกำจัดได้ดีที่สุดคือ สีไคเร็กซ์ ส่วนสีที่จำกัดได้น้อยคือ สีดีสเปอร์ส สีเอซิด และสีรีแอคทีฟ ซึ่งหากมีการใช้ไคโตซานร่วมกับสารส้มจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีสเปอร์ส สีเอซิดและสีรีแอคทีฟ ได้ดียิ่งขึ้น

2.6 กากตะกอนเยื่อกระดาษ

เป็นเศษเยื่อที่หลุดออกมาคับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตสู่ระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งส่วนมากนิยมใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ เช่น ระบบตะกอนเร่งหรือที่เรียกว่าระบบแอกติเวทเต็ดสลัดจ์ โดย

เมื่อน้ำที่ผ่านถังตกตะกอนชั้นต้นและชั้นที่สองจะได้ตะกอนเยื่อกระดาษที่ปนเปื้อนด้วยตะกอนจุลินทรีย์จากนั้นจะถูกนำไปผ่านขบวนการรีดตะกอนซึ่งโรงงานผลิตเยื่อกระดาษจะนำไปเป็นส่วนผสมของปุ๋ยปกคลุมดินต่อไป

2.6.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ

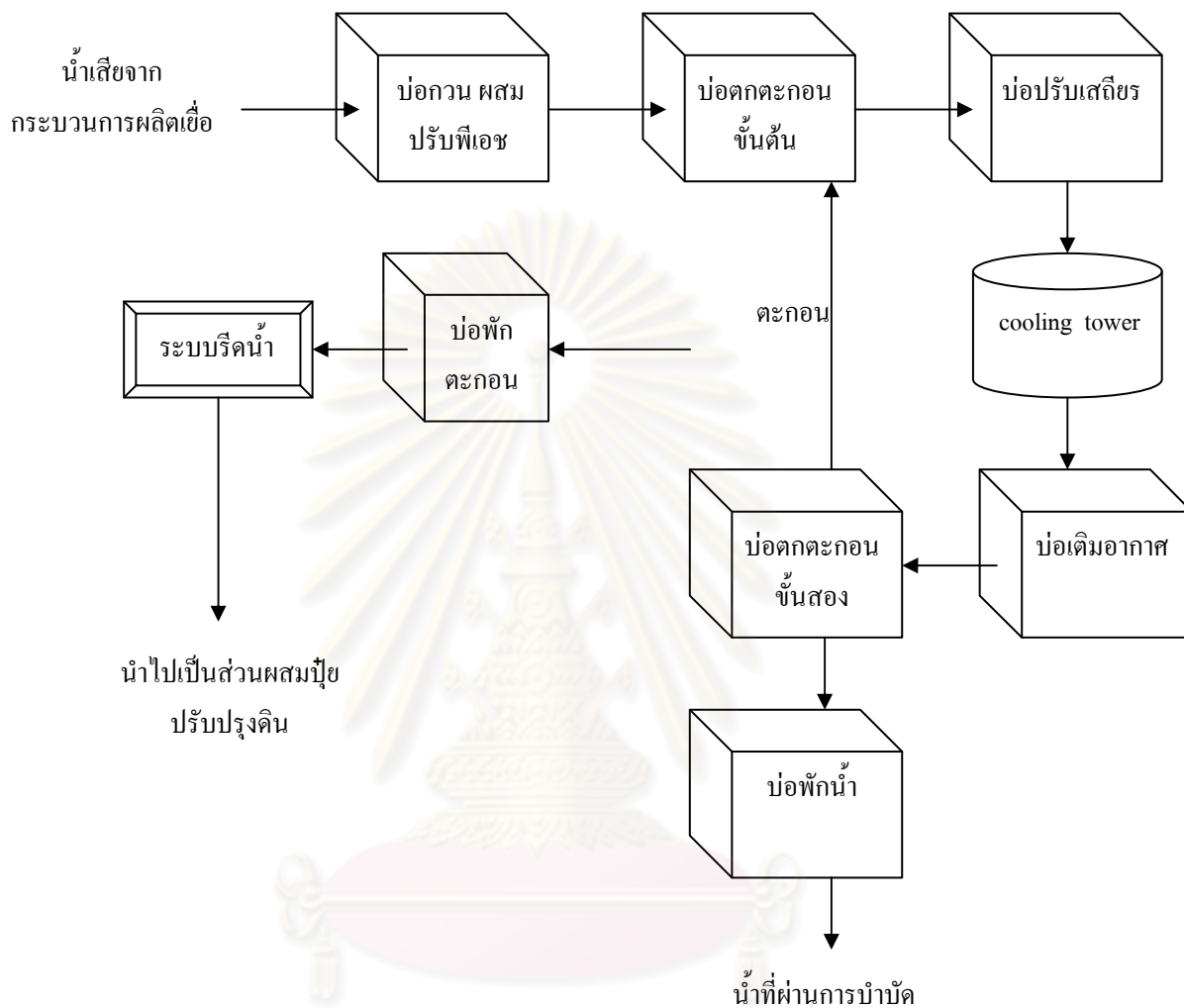
การเลือกวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษนอกจากต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของเส้นใยที่ว่าพืชที่มีเส้นใยแข็งแรงเท่านั้นจึงจะสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษได้ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาความเหมาะสมในทางธุรกิจ ได้แก่ ปริมาณต้องเพียงพอ หาง่าย ราคาไม่แพง การขนส่งไม่ยุ่งยากและการจัดเก็บ ซึ่งโดยทั่วไปพืชที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ไม้ยืนต้น (Wood) เป็นพืชที่มีลำต้นแข็งแรง อายุยืน แยกย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ
 - 1.1) ไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) เป็นไม้ที่มีเส้นใยลักษณะหยวนมีความแข็งแรงสูง ลักษณะความยาวเส้นใยประมาณ 3 mm ไม้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ สน ซึ่งเยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยวิธีทางเคมีจากไม้เนื้ออ่อนจะเรียกว่า ใยเยื่อยาว
 - 1.2) ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) เส้นใยมีลักษณะเล็กมีความละเอียดและมีความแข็งแรงต่ำ ลักษณะความยาวเส้นใยประมาณ 0.01-0.1mm ไม้กลุ่มนี้ ได้แก่ กระจิงเทพา (Acacia) ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) แอสเพน (Aspen) เบิร์ช (Birch) ซึ่งเยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยวิธีทางเคมีจากไม้เนื้อแข็งจะเรียกว่า ใยเยื่อสั้น
2. หญ้าหรือพืชล้มลุก (Glass or annual plant) เป็นพืชอื่นๆ นอกเหนือจากไม้ยืนต้นซึ่งมีเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษได้ ได้แก่ ปอ ใผ่ ฝ้าย หรืออาจเป็นส่วนที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น

เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการย่อยเซลล์พืชเส้นใยจากชั้นส่วนแข็งให้กลายเป็นน้ำเยื่อเพื่อแยกแวกซ์และเพอร์ลูซินซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษมีโครงสร้างเป็นพอลิกลีโนเซลลูโลสซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่นำมาเป็นวัตถุดิบผลิตเยื่อ

2.6.2 ขั้นตอนการผลิต

น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตที่มีเศษเยื่อปนอยู่จะต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ ดังรูป 2.15 เพื่อให้ได้กากตะกอนเยื่อกระดาษและสามารถนำไปกำจัดหรือใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนกระบวนการบำบัดน้ำเสียและจุดเก็บตัวอย่างตะกอนเยื่อกระดาษ

2.6.3 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์

เนื่องจากกากตะกอนเยื่อกระดาษมาจากเศษเยื่อไม้ที่ผ่านการย่อยดัดนั้นองค์ประกอบสำคัญจึงเป็นคาร์บอนเพราะมีส่วนประกอบของอินทรีย์สารซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการเลือกวัตถุดิบมาผลิตถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้การใช้ประโยชน์จากตะกอนเยื่อกระดาษเหลือทิ้งยังไม่แพร่หลายจึงเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆ ที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ เช่น กะลามะพร้าว และการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนานำตะกอนเยื่อกระดาษมาใช้งานด้านการผลิตตัวกลางดูดซับยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำวัสดุประเภทอื่นๆ แต่เนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อเป็นอุตสาหกรรมที่กำลังขยายตัว

ทำให้กากตะกอนเชื้อกระดาษที่เหลือมีปริมาณที่มากต่อวัน ดังนั้นควรมีการศึกษาเพื่อพัฒนานำมาใช้ประโยชน์ให้เกิดการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจเสียวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.7 การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส (สุภาพรณี, 2540)

การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส (Interphase mass transfer) เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระบบประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนสองหรือมากกว่าที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันทำให้มวลสารถูกถ่ายเทไปเพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นในระบบลง โดยองค์ประกอบหนึ่งจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าและในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบ ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารก็จะหยุดลง

กลไกการถ่ายเทมวลสารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การถ่ายเทมวลสารโดยการแพร่ของโมเลกุลหรือเรียกว่า การแพร่โมเลกุล (Molecular diffusion) และการถ่ายเทมวลสารโดยการพาหรือเรียกว่าการพามวลสาร (Convective mass transfer) ซึ่งกลไกแบบแรกนั้นเกิดขึ้นโดยโมเลกุลเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) และตัวกลางของผสมนั้นอยู่นิ่ง (Stagnant) หรือมีการเคลื่อนที่แบบลามินาร์ซึ่งกระบวนการเคลื่อนที่จะดำเนินไปอย่างช้าๆ ส่วนกลไกการเคลื่อนที่แบบที่สองของการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นโดยที่ตัวกลางของผสมนั้นมีการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการกวนทางกลไกใดๆ ซึ่งกลไกทั้งสองอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันโดยที่กลไกแบบหนึ่งอาจมีบทบาทสำคัญมากกว่าอีกแบบหนึ่งก็ได้

การถ่ายเทมวลสารสีในสารละลายไปยังสารดูดซับถ่านกัมมันต์จัดเป็นการดูดซับสารในสารละลายไปยังตัวดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสของเหลวกับของแข็งและเป็นการถ่ายเทมวลสารโดยการพา ในการถ่ายเทระหว่างของไหลเคลื่อนที่กับพื้นที่ผิวจะขึ้นกับคุณสมบัติการเคลื่อนที่และลักษณะทางพลศาสตร์ (Dynamics) ของของไหลเคลื่อนที่ ซึ่งสมการแสดงอัตราการพามวลสารสามารถเขียนจากกฎของนิวตัน (Newton's law) ดังนี้

$$N_A = k_c \Delta C_A \quad (2.12)$$

เมื่อ N_A = ฟลักซ์เชิงโมลของ A เมื่อเทียบกับพิคตที่อยู่นิ่งกับที่

k_c = ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลสาร (Convective mass transfer coefficient)

ΔC_A = ความแตกต่างของความเข้มข้นของ A ระหว่างพื้นที่ผิวกับค่าเฉลี่ยในของไหล

ในการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ลดความเข้มข้นซึ่งจากสมการ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusion substance) และเกรเดียนต์ของความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้น และเนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นชั้น

เกิดขึ้นติดกับผิวที่มีการไหลแบบลาร์มินาร์ส่วนอนุภาคของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแข็งจะอยู่นิ่ง ซึ่งกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างผิวและของไหลจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ของโมเลกุลเข้าไปยังชั้นของไหลที่อยู่นิ่งหรือไหลแบบลาร์มินาร์โดยการถ่ายเทมวลสารนี้จะถูกควบคุมโดยฟิล์มของของไหล ดังนั้นในกรณีนี้ k_c จึงหมายถึงสัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient) ซึ่งโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับรูปร่างของระบบ คุณสมบัติของของไหลและการไหล ซึ่งหลักการพื้นฐานที่ควรทราบเพื่อประกอบการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารมีดังนี้

ฟลักซ์ (Fluxes)

ฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux) หรือ ฟลักซ์เชิงโมล (Molar flux) เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่แสดงถึงจำนวนองค์ประกอบหนึ่งทั้งในหน่วยมวลหรือโมลที่เคลื่อนที่ผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ ซึ่งสามารถนิยามได้ 2 แบบคือ ฟลักซ์เชิงมวลและฟลักซ์เชิงโมล โดยในแต่ละแบบยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ดังนี้

- 1) \vec{J}_A = ฟลักซ์เชิงโมล เทียบกับฟลักซ์ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล = $C_A (\vec{V}_A - \vec{V}^*)$
- 2) \vec{j}_A = ฟลักซ์เชิงมวล เทียบกับฟลักซ์ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล = $C_A \vec{V}_A$
- 3) \vec{N}_A = ฟลักซ์เชิงโมล เทียบกับฟลักซ์ที่เคลื่อนที่อยู่นิ่งกับที่ = $\rho_A (\vec{V}_A - \vec{V})$
- 4) \vec{n}_A = ฟลักซ์เชิงมวล เทียบกับฟลักซ์ที่เคลื่อนที่อยู่นิ่งกับที่ = $\rho_A \vec{V}_A$

เมื่อ ρ_A = ความเข้มข้นเชิงมวลของสาร A
 = น้ำหนักของสาร A ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของผสม
 C_A = ความเข้มข้นเชิงโมลของสาร A
 = จำนวน โมลของสาร A ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของผสม

สมการของฟิค (Fick's rate equation)

เมื่อมีการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นอัตราที่สารหนึ่งในสารละลายเคลื่อนที่ไปจุดต่างๆ ในทิศทางใดๆ ขึ้นอยู่กับเกรเดียนต์ของความเข้มข้นซึ่งอัตรานี้มักอธิบายได้ง่ายในเทอมของฟลักซ์ โดยสมการของฟิคสามารถหาค่าฟลักซ์ทั้งในรูปของ โมลหรือมวล และแสดงความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์และตัวแปรต่างๆ จากกฎข้อแรกของฟิค (Fick's first law) ที่ได้นิยามการแพร่ขององค์ประกอบ A ในทิศทาง Z ในระบบที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ดังนี้

$$J_{A,Z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (2.13)$$

เมื่อ $J_{A,Z}$ = ฟลักซ์เชิงโมลในทิศทาง Z เทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล ($\text{kg-mole/m}^2 \cdot \text{s}$)
 $\frac{dC_A}{dz}$ = เกรเดียนต์ของความเข้มข้นในทิศทาง Z ($\text{kg-mole} \cdot \text{m}^{-3}/\text{m}$)

D_{AB} = สภาพการแพร่มวล หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
ขององค์ประกอบ A ที่แพร่ผ่านองค์ประกอบ B (m^2/s)

ในกรณีฟลักซ์เชิงมวลก็จะได้สมการที่คล้ายกันดังนี้

$$j_{A,z} = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dz} \quad (2.14)$$

2.7.1 การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion)

พลศาสตร์ (Dynamic) ของการดูดซับสารอินทรีย์บนถ่านกัมมันต์ในเฟสของเหลวสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองการแพร่บนพื้นผิว (Homogeneous surface diffusion model, HSDM) ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รวมสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านฟิล์มของเหลวและสัมประสิทธิ์การแพร่บนพื้นผิวไว้ด้วย โดยในกลไกการดูดซับชั้นฟิล์มที่กั้นอยู่จะเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ (Adsorption rate) ซึ่งเป็นขั้นตอนเริ่มแรกที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับในระบบถังปฏิบัติการแบบทีละเท (Batch) โดยในที่สุดการดูดซับสารอินทรีย์ที่เป็นตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับก็จะเป็นปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการดูดซับในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งการแพร่ผ่านเป็นขั้นตอนแรกที่ควบคุมอัตราการดูดซับ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มของเหลวสามารถอธิบายได้โดยเมื่อพิจารณาการถ่ายเทสารตัวถูกดูดซับนอกผิวฟิล์ม (External mass transfer diffusion) หรือที่เรียกว่าขั้นตอน Film diffusion

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer coefficient, K)

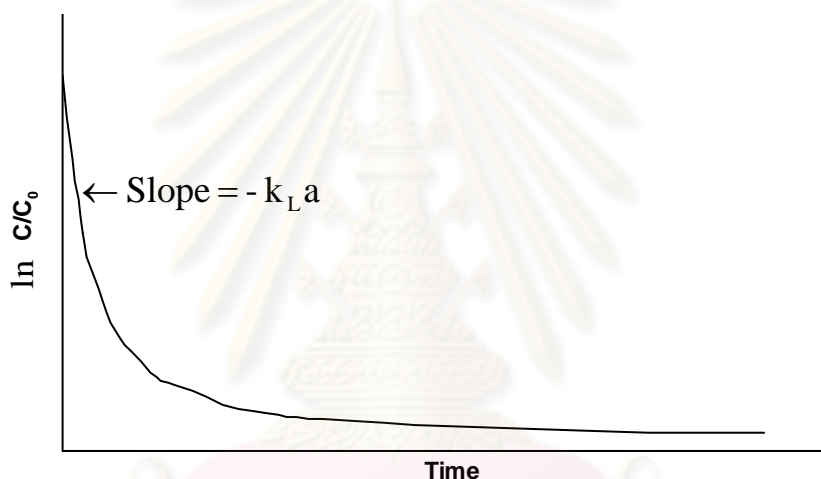
เป็นตัวแปรที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งเมื่อพิจารณาถึงกรณีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสของเหลว-แข็งเช่น การดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียโดยถ่านกัมมันต์อาจเรียกว่าสัมประสิทธิ์การพามวลสาร (K_L) ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์นี้ได้จากกราฟผลการทดลองถึงความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.15 โดยจากการทดลองได้สมมติให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนผิวดูดซับ (C) มีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ซึ่งยังไม่มี การเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับภายในรูของตัวดูดซับ ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการดูดซับเริ่มต้นของตัวดูดซับโดยใช้สมการการถ่ายเทมวลสารดังสมการ 2.15 (ชลธิชา, 2545)

$$\frac{dC_t}{dt} = -k_L a (C_t - C_{st}) \quad (2.15)$$

- เมื่อ C_t = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เวลาใดๆ (mg/dm^3)
 C_{st} = ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับในการแพร่ระหว่างเฟสของแข็ง-ของเหลว (mg/dm^3)
 k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างฟิล์ม (cm/s)
 a = พื้นที่ผิวทั้งหมดที่สามารถเกิดการถ่ายเทอนุภาคสาร (m^2/cm^3)

จากสมการเมื่อพิจารณาที่เวลาเข้าใกล้ศูนย์ ($t \rightarrow 0$) จะทำให้ $C_{st} \rightarrow 0$
 และ $C_t \rightarrow C_0$ ดังนั้นจะได้สมการใหม่ คือ

$$\frac{d(C_t/C_0)}{dt} = -k_L a \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับกับเวลา

จากรูปแบบสมการที่ 2.16 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับกับเวลาดังรูปที่ 2.16 โดยความชันในช่วงเริ่มต้นของกราฟ C_t / C_0 กับเวลา คือ $k_L a$ (1/วินาที) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการดูดซับที่เริ่มต้น (Initial rate หรือที่ $t \rightarrow 0$) โดยค่าอัตราการดูดซับที่เริ่มต้นที่คำนวณได้จากกราฟข้อมูลผลการทดลองนี้อาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยบางประการ เช่น ขนาดของตัวดูดซับและขนาดตัวถูกละลาย ซึ่งปัจจัยทั้งสองเป็นสำคัญในการสร้างแรงต้านการแพร่เข้าหาฟิล์มและการดูดซับตัว ทั้งนี้อัตราการดูดซับที่เริ่มต้นที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้หาขั้นกำหนดอัตรา อาทิเช่น ถ้าค่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลายในสารละลายแสดงว่าการถ่ายเทมวลสารนอกฟิล์ม (External mass transfer diffusion) ไม่ใช่ขั้นกำหนดอัตราแต่เป็นกระบวนการ Pore (Intraparticle) diffusion เป็นขั้นกำหนดอัตรานั่นเอง (ชลธิชา, 2545)

เมื่อพิจารณาในกรณีสมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order equation) สามารถเขียน k_L ดังนี้

$$k_L = - \frac{1}{at} \ln (C_t / C_o) \quad (2.17)$$

พื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area, a)

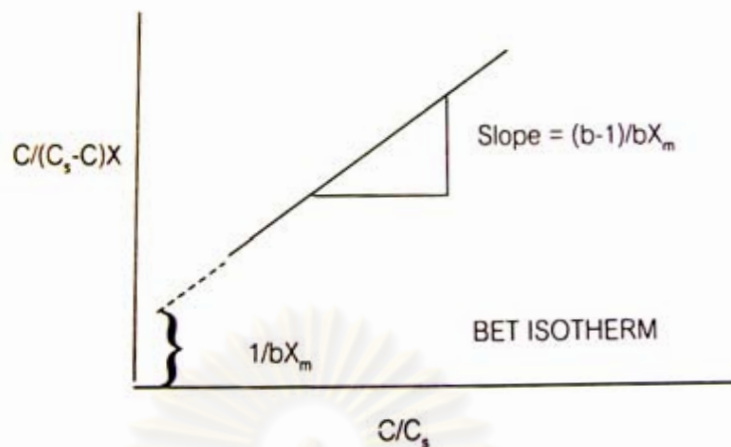
เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทมวลสารระหว่างอนุภาคในสารละลาย และตัวดูดซับเนื่องจากยิ่งตัวดูดซับมีขนาดเล็กพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของตัวดูดซับและของเหลวก็จะยิ่งมากทำให้อัตราการถ่ายเทขององค์ประกอบในสารละลายเพิ่มมากขึ้น แต่บางครั้งในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นสารที่มีอนุภาคละเอียดมากอาจก่อให้เกิดความต้านทานหรือยับยั้งการหมุนเวียนของสารละลายที่จะผ่านชั้นของของแข็งทำให้พื้นที่ผิวของการสัมผัสที่มากขึ้นก็ไม่ได้ช่วยในเรื่องอัตราการถ่ายเทมวล โดยการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (Standard test method for specific surface area of carbon or graphite, ASTM C819-77) สามารถหาได้โดยใช้โดยใช้โดยใช้ทฤษฎีของไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm) ดังความสัมพันธ์ตามสมการ 2.18 ที่เรียกว่า “สมการของ BET” ดังนี้ (ธวัชชัย, 2548)

$$X = (X_m b C) / (C_s - C)(1 + (b - 1)C / C_s) \quad (2.18)$$

เมื่อ X = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (mg/g)
 X_m = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (mg/L)
 C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆชั้น (mg/L)
 b = ค่าคงที่ของการดูดซับ
 จากสมการ 2.18 สามารถเขียนได้เป็น

$$C / X(C_s - C) = (1 / b X_m) + ((b - 1) / b X_m)(C / C_s)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C / X(C_s - C)$ กับ C / C_s จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $(b - 1) / b X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1 / b X_m$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยวิธีนี้อาศัยการดูดซับผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer) ภายใต้อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (-196°C) บนผิวหน้าตัวกลางดูดซับ เนื่องจากการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งจะมีลักษณะเป็น โมเลกุลหลายชั้นภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน โดยแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารดูดซับในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียวและในขณะเดียวกันแก๊สไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็น โมเลกุลหลายชั้น

โดยหลักการการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของตัวกลางดูดซับจะอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊สในขณะที่ยกแก๊สมีการเคลื่อนที่ (Dynamic analysis) โดยแก๊สไนโตรเจนที่เป็นตัวถูกดูดซับจะถูกผสมกับแก๊สเฉื่อย (แก๊สฮีเลียม) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมและในการวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารจะอาศัยความแตกต่างของสมบัติด้านการนำความร้อนของแก๊สแต่ละชนิด ทั้งนี้เพราะปริมาณการนำความร้อนของแก๊สแปรผันโดยตรงกับปริมาณของแก๊สที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

เริ่มทำการวิเคราะห์โดยบรรจุไนโตรเจนเหลวใส่หลอดตัวอย่างซึ่งมีสารตัวอย่างอยู่ภายใต้อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันซึ่งสามารถวัดและคำนวณหาพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรมซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง
 - 1.1) อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 150°C
 - 1.2) ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่างให้ละเอียดถึงทศนิยม

1.3) ใส่วัตถุอย่างประมาณ 0.3 – 0.5 กรัม นำไปล้างโมเลกุลบนเบื่อนที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์(outgas) ที่อุณหภูมิ 150 ° C ภายใต้ความดันสูญญากาศ

1.4) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้หลุดตัวอย่าง เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่างหลังoutgas (W)

2. การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

1.1) กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่สมดุล (P/P_0) ทั้งหมด 10 จุด

1.2) ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่สถานะสมดุลเท่ากับที่กำหนด แล้วบันทึกปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้

3. การคำนวณ

การหาพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ทั้งหมด (a) สามารถหาจากพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบ คือ ความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) และแกนตั้งฉาก คือ ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ ในเทอมของ $[W(P/P_0) - 1]^{-1}$ ซึ่งจะให้เห็นแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ S เมื่อจุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ I ดังนั้นสามารถคำนวณพื้นที่ผิว (S_{BET}) ได้ดังนี้

$$S_{BET} = NA_{CS} / [(S - I) \times (MW)] \quad (2.19)$$

เมื่อ S_{BET} = พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)

N = เลขอาโวการ์โดร (6.023×10^{23})

A_{CS} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน (16.2 \AA^2)

MW = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ทั้งหมด (a) = $\frac{S_{BET} \times W}{V}$

เมื่อ W = น้ำหนักสารดูดซับทั้งหมด (g)

V = ปริมาตรสารดูดซับทั้งหมด (m^3)

2.7.2 ความสัมพันธ์ทางแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Correlation mathematical model)

โดยทั่วไป ตัวแปรที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของระบบการถ่ายเทมวลสารนั้นมักจะอยู่ในรูปของเทอมไร้หน่วยซึ่งสัมพันธ์กับการถ่ายเทมวลสาร สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย โดยตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย

D_{AB} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากองค์ประกอบ A ไปยัง B

U = ความเร็วของไหล

ρ = ความหนาแน่นของมวลในของไหล

μ = ความหนืดของไหล

d = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ของไหลไหลผ่าน

K_m = ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของการพา

โดยในการถ่ายเทมวลสารได้มีการนำตัวแปรเหล่านี้บางตัวมาใช้ร่วมแล้วนิยามเป็นเทอมไร้หน่วยเทอมใหม่ซึ่งตัวแปรไร้หน่วยต่างๆ ประกอบไปด้วย Sherwood number (Sh), Schmidt number (Sc), Reynolds number (Re) ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยทั้งสามค่าเป็นไปตามสมการดังนี้

1. Sherwood Number (Jia และคณะ, 2006)

เป็นอัตราส่วนของเกรเดียนต์ความเข้มข้นที่ผิวต่อเกรเดียนต์ความเข้มข้นทั้งหมดซึ่งก็คืออัตราส่วนของความต้านทานการแพร่มวลต่อความต้านทานการพาวมวล โดยเมื่อมีการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นกับสารที่มีลักษณะทรงกลมจะสามารถหา Sherwood Number (Sh) ดังสมการ

$$Sh = 2.0 + 0.6Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.20)$$

เมื่อ Re = Reynolds Number

Sc = Schmidt Number

จากสมการ Reynolds Number เป็นค่าที่บ่งบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งในการแพร่ของอนุภาคบอกลให้ทราบถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังพื้นผิวที่มีการจับเกาะของอนุภาค อาทิเช่น การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบบราวเนียน โดยในสภาพการแพร่ที่มีความปั่นป่วนหรือ Reynolds Number มีค่ามากกว่า 1000 สามารถหาได้ดังสมการ

$$Re = u_0 \rho dp / \mu \quad (2.21)$$

เมื่อ u_0 = ความเร็วเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลว

p = ความหนาแน่นของของสารละลาย

dp = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

μ = ความหนืดของสารละลาย

ส่วน Schmidt Number (Sc) เป็นอัตราส่วนของสภาพการแพร่โมเมนตัมกับสภาพการแพร่มวลซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

$$Sc = \mu / (\rho D_{AB}) \quad (2.22)$$

เมื่อ D_{AB} = สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ขององค์ประกอบ A ที่แพร่ไป B

สำหรับสารละลายเจือจาง (ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยโมล) สามารถประมาณค่า D_{AB} จากสมการดังนี้

$$D_{AB} = \frac{7.4 \times 10^{-8} \times (\psi_B M_B)^{1/2} T}{\mu V_A^{0.6}} \quad (2.23)$$

เมื่อ ψ_B = ตัวแปรแสดงความสัมพันธ์สำหรับสารตัวทำละลาย (น้ำ $\psi_B = 2.6$)

M_B = มวลโมเลกุลของสารตัวทำละลาย

T = อุณหภูมิ

V_A = ปริมาตรของสารตัวถูกละลาย ที่จุดเดือดของของเหลว

2. การหา k_L จาก Sherwood Number (sh)

ค่า k_L จากการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่า k_L ที่สัมพันธ์กับ Sherwood Number ดังนี้ (Jia และคณะ, 2006)

$$k_L = \frac{Sh D_{AE}}{d_p} \quad (2.24)$$

ดังนั้น
$$Sh = \frac{k_L d_p}{D_{AB}} \quad (2.25)$$

เมื่อ Sh = Sherwood Number

D_{AB} = สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ A ที่แพร่ไป B

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2.8 การกวนผสมและการเติมอากาศโดยอุปกรณ์กำเนิดฟอง (Mixing and Aeration by bubble generation)

2.8.1 การกวนผสม (Mixing)

การกวนเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนให้กับน้ำซึ่งมีบทบาทสำคัญในกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ ในงานด้านการดูดซับการกวนจะมีผลต่อกลไกการดูดซับในสองขั้นตอนแรกคือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารละลายมาสู่สารดูดซับและการแพร่ผ่านฟิล์มที่อยู่รอบๆ ตัวดูดซับ ซึ่งการกวนมีทั้งแบบกวน โดยอุปกรณ์และกวนโดยฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์กำเนิดฟอง โดยในการกวนอุปกรณ์กวนจะเป็นการทำให้ น้ำเกิดการหมุนด้วยตัวเครื่อง เช่น ใบพัด ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกวนประเภทนี้ ได้แก่ ความเร็วแรงแเดียนท์(G) ที่บ่งบอกถึงระดับความปั่นป่วนว่า มากน้อยเพียงใด ซึ่งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเป็นการถ่ายเทพลังงานให้แก่ น้ำในรูปการกวนน้ำ โดยสามารถคำนวณค่าพลังงานนี้ได้ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 2004)

1. กรณีการกวนโดยใบพัด

สามารถนำมาคำนวณพลังงานในรูปของความเร็วแรงแเดียนท์(G) จากสมการของแคมท์และสไตน์ ดังนี้

$$G = (P / \mu V)^{1/2} \quad (2.26)$$

เมื่อ G = ความเร็วแรงแเดียนท์ (s^{-1})

P = พลังงานที่ใช้ (watt)

μ = ความหนืดของน้ำ ($N \cdot s / m^2$)

V = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (m^3)

โดยสามารถหาพลังงาน (P) จาก $P = N_p \rho n^3 d_1^5$ (2.27)

เมื่อ P = พลังงาน (watt)

N_p = จำนวนใบพัด

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)

n = ความเร็วรอบการหมุน (rpm)

d_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (m)

2. กรณีการกวนโดยฟองอากาศ

สามารถคำนวณหาระดับพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนด้วยสมการดังนี้

$$P = P_a V_a \ln(P_c/P_a) \quad (2.28)$$

เมื่อ P = พลังงานที่ใช้ (kw)

P_a = ความดันบรรยากาศ (kN/m^2)

V_a = ปริมาตรของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (m^3/s)

P_c = ความดันของอากาศที่จุดปล่อย (kN/m^2)

โดย P_c สามารถคำนวณได้จากสมการในระบบหน่วย S.I. ได้ดังนี้

$$P_c = KQ_a \ln((h + 10.33)/10.33) \quad (2.29)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ มีค่า 1.689

Q_a = อัตราการไหลของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (m^3/sec)

V_a = ปริมาตรของอากาศที่ความดันบรรยากาศ ($\text{m}^3\text{-sec}$)

h = ความลึกของระดับน้ำ (m)

2.8.2 การเติมอากาศ (Aeration)

การกวนเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนให้กับน้ำซึ่งมีบทบาทสำคัญในกลไกการดูดติดผิวซึ่งฟองอากาศเป็นอีกวิธีหนึ่ง โดยนอกจากจะฟองจะทำให้เกิดการกวนผสมแล้วยังมีการสัมผัสกันระหว่างฟองผิวตัวกลางดูดซับซึ่งอาจมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

2.8.2.1 อุปกรณ์เติมอากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมอากาศหรือที่เรียกว่า แอเรเตอร์ (Aerator) ซึ่งสามารถจำแนกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. แบบตัวกระจายอากาศ (Diffused aerator) อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ในการสร้างฟองอากาศเพื่อใช้ทำแอเรชันและมักใช้กับน้ำเสียมากกว่า นิยมใช้ในการเติมออกซิเจนให้กับน้ำมากกว่าใช้ในกรณีอื่น ซึ่งอุปกรณ์ประเภทฟองอากาศมีอยู่ชนิดเดียวคือเป่าลมผ่านท่อเจาะรูหรือหรือหัวกระจายลม (Diffuser) ซึ่งวางอยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่น การเติมอากาศในตู้เลี้ยงปลาหรือการเติมอากาศให้กับระบบตะกอนเร่ง นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งสำหรับทำแอเรชันที่มักใช้ในการเติมก๊าซออกซิเจนให้กับน้ำนั่นคือแอเรเตอร์แบบใบพัดซึ่งตีน้ำให้กระเด็นเป็นละอองน้ำปลิวขึ้นไป

ในอากาศเพื่อรับออกซิเจนจากอากาศ โดยทั่วไปอุปกรณ์นี้มักใช้กับน้ำเสียมากกว่าน้ำดี เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เปลืองพลังงานมากและในน้ำดีมักไม่ต้องการออกซิเจนมากจนต้องใช้อุปกรณ์นี้

สำหรับแเอเรเตอร์ประเภทฟองอากาศ (Diffused air aerator) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำที่ต้องการเติมอากาศและระบบเป่าอากาศที่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้โดยใช้เครื่องเป่าลม (Air blower) และหัวฉีด (Air diffuser) ซึ่งตัวกระจายอากาศสามารถแบ่งตามขนาดฟองได้ดังนี้

- ขนาดเล็ก (Fine bubble) ตัวกระจายอากาศมีขนาดรูพรุนเล็กมาก อาจมีลักษณะเป็นท่อหรือเป็นหมวกยอคกลม ทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ หรืออลูมิเนียมออกไซด์ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10-30 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 1.2-2.0 kg.O₂/kw-h ขนาดฟองอากาศ 2.0-2.5 mm โดยทั่วไปออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1-0.4 m³ /min ต่อหัว ซึ่งมีข้อดีคือทำให้การกวนน้ำได้ทั่วถึง สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่พ่นเข้าไปในน้ำได้ แต่ข้อเสียคือมีราคาแพงทั้งค่าวัสดุและค่าบำรุงและเสี่ยงต่อการอุดตัน

- ขนาดกลาง (Medium bubble) ตัวกระจายอากาศมีขนาดรูพรุนกลาง โดยมากมีลักษณะเป็นท่อทำจากเหล็กไร้สนิมเจาะเป็นรูและหุ้มด้วยถุงผ้า ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6-15 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1.0-1.6 kg.O₂/kw-h ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 mm เล็กน้อย ซึ่งมีข้อดีคือทำให้การกวนน้ำได้ทั่วถึง ค่าบำรุงรักษาต่ำ แต่ข้อเสียคือมีราคาแพง และเสี่ยงต่อการอุดตัน

- ขนาดใหญ่ (Coarse bubble) ตัวกระจายอากาศมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าของขนาดกลาง อาจมีลักษณะเป็นท่อหรือเป็นหมวกยอคกลม ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าของขนาดกลางและเล็กประมาณร้อยละ 4-8 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 0.6-1.2 kg.O₂/kw-h ขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 mm ซึ่งมีข้อดีคือไม่ค่อยเจอปัญหาเรื่องการอุดตัน ดังนั้นค่าบำรุงรักษาจึงต่ำ แต่ข้อเสียคือมีราคาแพง

2.8.2.2 จลนศาสตร์ของการเติมอากาศ

1. โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการพิจารณาการเติมอากาศ (มันลีน, 2537)

อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซหรือออกซิเจนจากฟองอากาศไปสู่เฟสน้ำสามารถหาได้โดยสมการดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (2.30)$$

หรือจากกราฟ $k_L a = 2.303 (\log C_1 - \log C_2) / (t_1 - t_2)$ (2.31)

เมื่อ $dC/dt =$ อัตราการเกิดแอเรชัน (Aeration rate, mg/L- hr)

$K_L =$ สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลอากาศผ่านชั้นกลาง (Liquid side mass transfer coefficient) ซึ่งขึ้นกับลักษณะของเฟสน้ำที่มีการเติมอากาศเกิดขึ้น (m/hr)

$a =$ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศกับน้ำ (Interfacial area) โดยเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับขนาดของฟองอากาศที่สัมผัสกับเฟสน้ำ ดังนั้นจึงสัมพันธ์โดยตรงกับการเลือกชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศ (m^{-1})

$C_s, C =$ ความเข้มข้นของก๊าซที่อิ่มตัวในน้ำและที่เวลาใดๆ (mg/L)

เนื่องจากการวัดค่า a ทำได้ยากจึงมักนิยมนรวมค่า K_L และ a ไว้ด้วยกันและเรียก $K_L a$ ว่า สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนย้ายรวมของก๊าซหรือออกซิเจน (Overall mass transfer coefficient) มีหน่วย $ชม^{-1}$ ค่า $K_L a$ ขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศ ลักษณะของน้ำ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปจะหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือในสนามจริงและใช้เป็นค่าอ้างอิงที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเติมอากาศโดยรวม

2.8.2.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศกับน้ำ

พื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area, a) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาถ่ายเทออกซิเจนระหว่างอากาศกับน้ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาฟองอากาศมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมแล้วสามารถหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัส (a) จากจำนวนฟองอากาศ (N_B) คูณด้วยพื้นที่ผิวของฟองอากาศ (S_B) แล้วหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรน้ำ รวมกับปริมาตรอากาศ (V_{total})

สำหรับจำนวนฟองอากาศ (N_B) สามารถคำนวณได้จากความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) คูณกับระยะเวลาที่ฟองอากาศหนึ่งๆอยู่ในถังปฏิกรณ์ (T_B) ดังสมการ

$$N_B = f_B \times T_B = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \quad (2.32)$$

เมื่อ $N_B =$ จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น

$f_B =$ ความถี่ในการเกิดฟอง (s^{-1})

$T_B =$ ระยะเวลาที่ฟองอากาศหนึ่งๆ อยู่ในถังปฏิกรณ์

$H_L =$ ความสูงของของเหลว (m)

$U_B =$ ความเร็วที่เกิดฟอง (m/s)

ดังนั้นสามารถคำนวณ a จากสมการ

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{\text{total}}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{\sqrt{D_B^2}}{A H_L + N_B V_B} \quad (2.33)$$

เมื่อ a = พื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทออกซิเจน

S_B = พื้นที่ผิวของฟองทั้งหมด (m^2)

V_{total} = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (m^3)

U_B = ความเร็วที่เกิดฟอง (m/s)

D_B = เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกรณ์ (m)

V_B = ปริมาตรฟอง (m^3)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษาถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับ

Al-Degs และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลทางเคมีที่พื้นผิวของคาร์บอนในการกำจัดสีรีแอกทีฟจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยจากการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด F-400 ซึ่งผลิตจากถ่านหินบิทูมินัส นำถ่านมาปรับสภาพให้อยู่ในสถานะ Surface acidity และสภาพ Surface basicity ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถทำให้พื้นผิวถ่านกัมมันต์จากเดิมที่ไม่มีขั้วกลายเป็นมีขั้วเล็กน้อยได้จากกระบวนการออกซิเดชันและยังพบอีกว่าถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติค่อนข้างเป็น Hydrophobic และ Organophilic ซึ่งจากการทดลองดูดซับสีรีแอกทีฟทั้งสามชนิดคือ Romazol Golden Yellow, Remazol Red และ Remazol Black พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดติดผิวสีรีแอกทีฟ สีเหลืองได้ปริมาณมากและน้อยลงในสีดำและแดงตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดติดผิวที่สูงนั้นจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีประจุสุทธิเป็นบวก ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสีรีแอกทีฟที่สูงนั้น pH_{ZPC} ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ต้องการใช้ในการทำให้ประจุสุทธิที่พื้นผิวถ่านกัมมันต์เป็นศูนย์ควรมีค่าสูงกว่า 7

Punyapalukul และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการเลือกกระบวนการดูดซับสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุใน Hexagonal mesoporous silicates (HMSs) ที่อยู่ในสีย้อมมีประจุโดยใช้สาร Hexagonal mesoporous silicates (HMSs) เป็นตัวดูดซับ Alkylphenol polyethoxylates (APnEOs) ที่อยู่ในน้ำเสียสีย้อม โดยในการทดลองนี้ใช้ตัวถูกดูดซับสามชนิดคือ Triton X-100 ซึ่งเป็นตัวแทน

ของ APnEOs และใช้สีย้อมเบสิก Basic Yellow 1 และเอซิด Acid Blue 45 ซึ่งเป็นสีย้อมมีประจุ พร้อมทั้งศึกษาการดูดซับ Triton X-100 ที่ผสมกับ Basic Yellow 1 หรือ Acid Blue 45 เทียบกับ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้าโดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง เกรดการค้า Shirasagi S-10 (PAC) ซึ่งจากการวิจัยพบว่าการดูดซับสีที่มีคุณสมบัติแสดงประจุลบ คือ สีเบสิกจะถูกดูดซับด้วย Shirasagi S-10 ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยจากการทดลองที่ค่าพีเอช 5-7 จะมีความสามารถในการดูดซับสีเบสิกที่สถานะสมดุลประมาณ 280 mg/g และสีเอซิดมีค่าประมาณ 95 mg/g ทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์ชนิด Shirasagi S-10 มีประจุที่พื้นผิว เป็นบวกซึ่งทำให้มีความสามารถในการดูดซับสีเอซิดน้อยเนื่องจากเป็นสีซึ่งมีประจุบวกเหมือนกัน

2.9.2 การศึกษาผลของไคโตซานต่อการดูดซับ

อัญญา ไตรบำรุงสุข (2542) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ประเภทสีน้ำเงินและสีแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยไคโตซานและไคโตซาน ซึ่งใช้น้ำสีที่ ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 , 0.02 และ 0.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทดสอบการดูดซับสีของถ่าน กัมมันต์ที่เคลือบไคโตซานเป็นเวลานาน 1, 2 และ 3 นาที เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ เคลือบและไคโตซานผง โดยใส่ตัวดูดซับในอัตราส่วนตัวดูดซับ 1 กรัมต่อสารละลายสีย้อม 25 มิลลิลิตร ที่สถานะอุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 , 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์เคลือบ ด้วยไคโตซานนาน 1 นาที จะให้ผลการดูดซับสีย้อมสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นยกเว้นไคโตซานผง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ความเข้มข้นเดียวกันและเมื่อพิจารณาภาพรวมแล้วก็ยังให้ผลร้อยละการดูดซับ ที่สูงทุกความเข้มข้นโดยใช้ระยะเวลาที่สถานะสมดุลของทุกความเข้มข้นและทุกสีประมาณ 7 ชั่วโมง โดยสีน้ำเงินที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะให้ผลการดูดซับดีที่สุด ประมาณร้อยละ 98 ในขณะที่สีแดงที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะมีร้อยละ การดูดซับต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาไอโซเทอมแล้วพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ ไคโตซานเป็นเวลา 1 นาที จะดูดซับสีย้อมผ้าได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่เคลือบ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำๆ นั้นไคโตซานผงยังคงมีความสามารถในการดูดซับดีกว่า และสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์เคลือบไคโตซาน เป็นเวลา 1 นาที มีความสามารถในการดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซานทำให้รูพรุนของผิวถ่านที่ถูกเคลือบมีความสม่ำเสมอและหนา ขึ้นตามเวลาเคลือบที่เพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองที่เวลาการเคลือบ 1-2 นาที คาดว่าน่าจะให้ผลการ ดูดซับสีที่ดีเพราะถ้าเคลือบนานเกินไปจะทำให้ผิวถ่านหนาและพื้นที่ผิวในการดูดซับสีของ ถ่านกัมมันต์ลดลงด้วย

Wu และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีและกรดอิมิกในน้ำด้วย ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยไคโตซาน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดทำการศึกษาที่สถานะอุณหภูมิ

30 °C ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ใช้เตรียมโดยการผสมกับไคโตซานจากกระดองหมีกในสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่ต่างๆ กัน ได้แก่ ร้อยละ 100, 80, 67 และ 55 และใช้ถ่านกัมมันต์จากเกลบ ซึ่งการติดตามผลการทดลองการดูดซับผิวแสดงโดยโมเดลทางจลนศาสตร์ Pseudo-first-order equation, Pseudo-second-order equation, Intraparticle diffusion model และ Elovich equation ซึ่งจากการศึกษาพบว่าจาก Elovich equation จะให้ผลอธิบายว่าการดูดซับผิวจะเกิดขึ้นที่เร็วที่สุดแต่จาก Intraparticle diffusion model จะอธิบายว่าการดูดซับผิวจะเกิดขึ้นที่เร็วที่สุดและพบว่าความสามารถในการดูดซับผิวจะมีอัตราที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบไคโตซานและมีความสามารถในการดูดซับผิวดีกว่าการใช้เม็ดไคโตซาน

2.9.3 การศึกษาผลของการเติมอากาศต่อการดูดซับ

ชลธิชา ไม่ล้อมสุข (2545) ได้ทำการศึกษาผลของภาวะออกซิเจนต่อการดูดซับผิวสีรีแอกทีฟบนถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับผิวสีสองชนิด ได้แก่ Reactive Red 141 และ Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์สองชนิด ได้แก่ ถ่านบิโทมินัสและถ่านกะลามะพร้าว ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างกัน คือ Oxidic (7.2 mg/L) และ Anoxic (1.0 mg/L) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ภายใต้สภาวะ Oxidic การดูดซับสี Reactive Red 141 ของถ่านบิโทมินัสและถ่านกะลามะพร้าวมีระยะเวลาสมดุลที่ 15 และ 10 วันตามลำดับและสี Reactive Blue 19 มีระยะเวลาสมดุลที่ 5 และ 14 วันตามลำดับ ส่วนสภาวะ Anoxic การดูดซับสี Reactive Red 141 มีระยะเวลาสมดุลที่ 14 และ 8 วันตามลำดับและสี Reactive Blue 19 มีระยะเวลาสมดุลที่ 4 และ 14 วันตามลำดับ ซึ่งสรุปประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้ดังนี้ คือ ถ่านบิโทมินัสดูดซับสี Reactive Blue 19 > ถ่านกะลามะพร้าวดูดซับสี Reactive Blue 19 > ถ่านบิโทมินัสดูดซับสี Reactive Red 141 > ถ่านกะลามะพร้าวดูดซับสี Reactive Red 141 ซึ่งพบว่าระยะเวลาสมดุลของการดูดซับผิวสีภายใต้สภาวะ Anoxic จะเร็วกว่าสภาวะ Oxidic เล็กน้อย แต่จากผลไอโซเทอมของการดูดซับผิวพบว่าที่สภาวะ Oxidic จะสูงกว่าสภาวะ Anoxic และเมื่อพิจารณาผลของค่าพีเอชในช่วง 8-10 พบว่าการดูดซับผิวสีจะสูงสุดที่พีเอช 8 แล้วลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9 และ 10 ตามลำดับและจากการศึกษาที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 °C พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นถ่านกัมมันต์จะสามารถดูดซับสีได้มากขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่าการดูดซับผิวเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน

Zeid และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ในสภาพแวดล้อมที่มีตัวออกซิไดซ์ โดยได้อ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาของ Prober และคณะ ที่ว่าโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้เกิดสภาพความเป็นกรดที่บริเวณพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Acidic surface oxides) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับผิวเบสเพิ่มขึ้น ซึ่งจากข้อมูลนี้เป็นแนวคิดให้ Zeid และคณะ นำมาเป็นประเด็นการศึกษาในงานวิจัย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการดูดซับผิว

สารประกอบอะโรมาติกและสารประกอบอะลิฟาติก 4 ชนิด ได้แก่ Trichloromethane (chloroform), Tribromomethane, 1, 1, 1-trichloromethane และ 1, 1, 2, 2-tetrachloromethane ซึ่งพบว่าชนิดของตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับมีความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยความสามารถในการดูดซับ Phenol, Cresol และ Nitrophenol กำหนดความเข้มข้นที่ 1 mg/L พบว่าภายใต้สภาวะ Oxidic มีความสามารถในการดูดซับสารเหล่านี้สูงกว่าที่สภาวะ Anoxic คิดเป็นร้อยละ 163, 115 และ 18 ตามลำดับ โดยอธิบายได้ว่าในสภาวะที่มีออกซิเจนจะทำให้เกิดDimers และ Trimer ขึ้นบนพื้นผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น

Warta และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาผลของโมเลกุลออกซิเจนต่อการดูดซับ NOM (Natural organic matter) ในน้ำจากแม่น้ำไอโฮบนถ่านกัมมันต์ โดยจากการวิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำไอโฮโดยเก็บทุกๆ สัปดาห์แรกของแต่ละเดือนตลอดปี 1992 นำมาทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับ NOM ซึ่งพบว่าในสภาวะที่มีโมเลกุลออกซิเจนในน้ำความสามารถในการดูดซับ NOM มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในสภาวะ Oxidic ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลออกซิเจนในสารละลายของเหลวมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ NOM ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าโมเลกุลออกซิเจนเป็นตัวชักนำให้มีกระบวนการ Polymerization เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการศึกษายังพบอีกว่าความสามารถในการดูดซับ NOM ของถ่านกัมมันต์ไม่ขึ้นกับขนาดของถ่าน แต่ขนาดของถ่านที่ใหญ่ขึ้นก็จะมีเวลาของการเกิดสมดุลในการดูดซับที่มากขึ้น

Jia และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาผลจากฟองอากาศต่อการดูดซับอาหารซิน (Atrazine) ในของเหลวด้วยถ่านกัมมันต์แบบผงโดยการทดลองได้ทำการฉีดฟองอากาศที่อัตราต่างๆ กันลงไปในการทดสอบผลของฟองอากาศต่อการดูดซับสารอินทรีย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ อาหารซินในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงทดลองในระบบถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทเพื่อทดสอบผลทางจลนศาสตร์ ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลจลนศาสตร์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ผลเปรียบเทียบการเติมฟองจากก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่มีผลต่อการดูดซับ ประสิทธิภาพการกวนและการปนเปื้อนที่ลดลงจากประสิทธิภาพการดูดซับที่เปลี่ยนไปที่เกิดขึ้นจากการเติมฟองอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากการเติมฟองอากาศ โดยจากผลการทดลองพบว่าในสภาวะที่อัตราการเติมฟองอากาศที่ 0.5, 1.5, 2.7 L/min จะมีความสามารถในการดูดซับดีใกล้เคียงกันแต่ดีที่สุดที่ 2.7 L/min ซึ่งจากการทดสอบผลกระทบบของค่าพีเอชที่อัตราการเติมฟองอากาศ 2.7 L/min จะมีผลทำให้ค่าพีเอชสูงที่สุดคือจาก 5.5 เป็น 7.6 ส่วนอัตราการเติมฟองอากาศอื่นๆ ก็ลดต่ำลงมาด้วยค่าใกล้เคียงกันยกเว้นการกวน

ด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กด้วยอัตรา 62 rpm ซึ่งเมื่อเทียบค่าทางพลังงานแล้วอยู่ระหว่างอัตราการเติมฟองอากาศที่ 0.5 และ 1.5 L/min แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าพีเอช และผลจากการเติมฟองจากก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่อัตรา 2.7 และ 5.0 L/min พบว่าที่ 2.7 L/min เมื่อพิจารณาที่เวลามากกว่า 30 นาที จะให้ผลการดูดซับสูงกว่าที่อัตรา 5.0 L/min ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับค่อนข้างคงที่โดยมากกว่า 2-3 เท่าตัวตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทดสอบด้วยฟองก๊าซเฉื่อยแล้วจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารทุกสภาวะการเติมอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราการเติมฟอง 5.0 L/min จะเพิ่มขึ้นจากค่าที่ค่อนข้างคงที่เป็นเท่าตัวแต่ก็ยังมีค่าการดูดซับน้อยกว่าที่ 2.7 L/min เป็นเท่าตัวเช่นกัน

Jia และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการดูดซับอะทราซีน (Atrazine) ในของเหลวด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงโดยใช้การกวนด้วยฟองอากาศ โดยในการทดลองการดูดซับในระบบถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเทเพื่อทดสอบผลทางจลน์ศาสตร์การดูดซับของการกวนโดยเติมฟองอากาศและการกวนโดยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) พบว่าการกวนด้วยฟองอากาศในอัตราที่เหมาะสมเป็นการกวนที่ให้ผลที่ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Kc) ผ่านฟิล์มของเหลวรอบสารดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นแต่ก็เพียงช่วงค่าสั้นๆ ซึ่งจากงานวิจัยนี้ใช้อัตราการเติมฟองอากาศที่ 0.5, 1.5, 2.7 และ 5.0 L/min ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีค่า Kc เท่ากับ 1.96, 2.41, 3.50 และ 3.72 cm/min ตามลำดับ โดยจาก Kc ค่าจะเห็นว่าในช่วงอัตราการเติมฟองอากาศมากกว่า 2.7 L/min อัตราการเติมอากาศที่สูงขึ้นแต่ผลของการแพร่ไม่ได้เพิ่มขึ้นเลยหรือเพิ่มน้อยมาก อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากระบบการกวนด้วยฟองอากาศนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกวนด้วยทั้งสองวิธี ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนกัน

เมื่อดูผลจากการทดลองเติมฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่องด้วยอัตราที่ต่างกันต่ออัตราการดูดซับพบว่าการเติมฟองอากาศด้วยอัตราสูงจะมีผลดีต่อประสิทธิภาพการดูดซับบนถ่านกัมมันต์มากกว่าการเติมแบบต่อเนื่องแต่ความรุนแรงต่ำกว่า ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนะให้มีการกวนด้วยฟองอากาศที่ใช้ความรุนแรงหรืออัตราการเติมในอัตราที่สูงแบบมีการเติมไม่ต่อเนื่องซึ่งจะให้ผลดีกว่า ซึ่งผลการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดพลังงานจากการกวนโดยเครื่องกวนเท่านั้น แต่ยังไม่ยืนยันผลที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับ

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลอง (Experiment research) ในระบบการทดลองแบบทีละเท (Batch) ภายใต้การควบคุมสภาวะค่าพีเอช อุณหภูมิและค่าความแรงประจุ ซึ่งทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการน้ำดี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. เตาเผา : CARBOLITE CWF 1200
2. ตู้อบความร้อน : MEMMERT 600
3. ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
4. ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช
5. เครื่องปั่น
6. เครื่องวัดพีเอช : CG840
7. กระดาษกรอง Whatman GF/C
8. เครื่องวัดอัตราการไหลก๊าซ : SIKA TS11500
9. เครื่องเติมอากาศ : NITTO LA-45B
10. หัวฟูกระจายฟองอากาศ
11. สายยางพลาสติก
12. กระจกบอควงขนาด 500 มิลลิเมตร
13. เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : METTLER TOLEDO DRAGON 204
14. เครื่องชั่งน้ำหนัก
15. ตู้ดูดความชื้น
16. เครื่องปั่นกวนแบบใบพัด
17. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
18. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

19. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆ
20. กรดอะซิติก (CH_3COOH)
21. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตบัฟเฟอร์
22. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตบัฟเฟอร์
23. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
24. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
25. โซเดียมคลอไรด์
26. กรดไฮโดรคลอริก
27. น้ำปราศจากไอออน (deionize water)
28. สีย้อมชนิดรีแอคทีฟ ชนิด Reactive Black 5
29. สีย้อมชนิดเบสิก ชนิด Basic Yellow 1
30. ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า : Shirasagi S-10
31. กากตะกอนเยื่อกระดาษจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษแห่งหนึ่งในจังหวัด
ปราจีนบุรี
32. ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสีย้อม

- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV Spectrophotometer)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์

- เครื่องวัดพื้นที่ผิว Surface Area Analyzer : Nitrogen Adsorption 1990
- เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว : FT-IR Spectrometer
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Scanning electron microscope

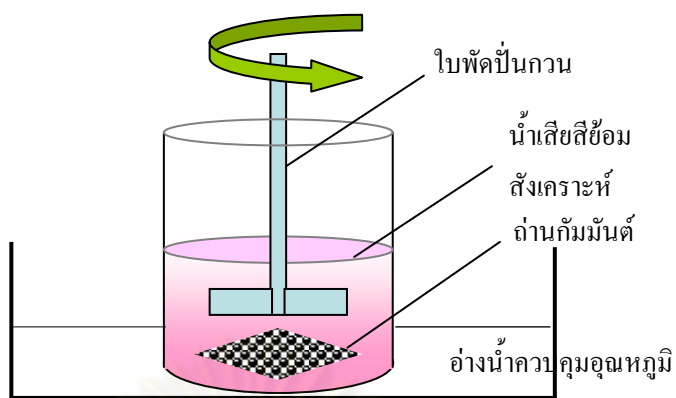
3.2.4 วิธีที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์

- การตรวจวัดประจุบนพื้นผิว (Surface charge) : Acid-Base Titration (ดังแสดง

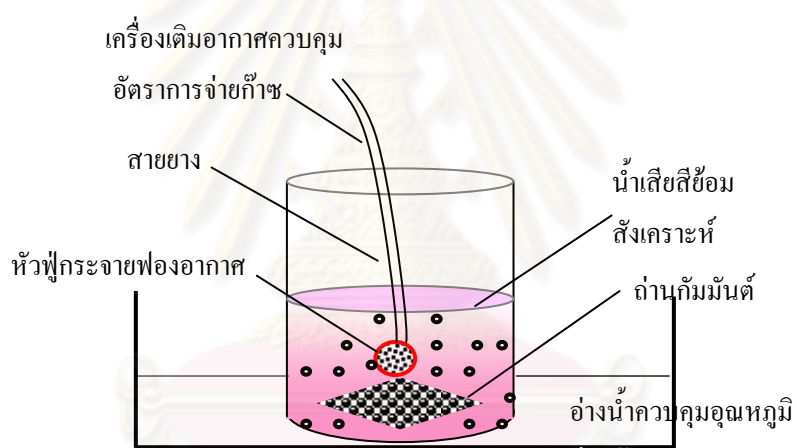
ในหัวข้อ 3.3.4.5)

3.2.5 โมเดลชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

ซึ่งในการวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 รูปแบบชุดการทดลอง ดังรูปที่ 3.1



(1) ชุดการทดลองการกวนผสมด้วยใบพัด



(2) ชุดการทดลองการกวนผสมด้วยฟองเติมอากาศ

รูปที่ 3.1 แสดงโมเดลของชุดการทดลอง(1) ชุดการทดลองการกวนผสมด้วยใบพัด

(2) ชุดการทดลองการกวนผสมด้วยฟองเติมอากาศ

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียที่ย้อมสีจากสีย้อม 2 ประเภทคือ สิริแอคทีฟ ชนิด Reactive Black 5 (RB 5) และสีเบสิกชนิด Basic Yellow 1 (BY 1) เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ชนิดผง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเชื้อกระดาษ (SAC) ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเชื้อกระดาษเคลือบไคโตซาน(CH-SAC) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าชนิด Shirasagi S-10 (PAC) และถ่านกัมมันต์ Shirasagi S-10 เคลือบด้วยไคโตซาน(CH-PAC) โดยทำการทดสอบแบบแบตช์

3.3.1 การกำหนดค่าและประเภทตัวแปร

ตัวแปรที่ต้องทำการศึกษาในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 กำหนดค่าและประเภทตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรคงที่	หมายเหตุ
1. ปริมาณถ่านกัมมันต์	- 0.8 g/L ของน้ำเสีย สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC 0.35 g/L ของน้ำเสีย สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC
2. ความเข้มข้นสีย้อมในน้ำเสีย	- 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC
3. ความเร็วรอบเครื่องปั่นกวนแบบใบพัด	- 200 rpm
4. ค่าความแรงประจุ	- 0.01 โมลาร์
5. เวลาสัมผัส	- ระยะเวลา 180 นาทีสำหรับถ่าน SAC, CH-SAC ระยะเวลา 300 นาทีสำหรับถ่าน PAC, CH-PAC
ตัวแปรอิสระ	หมายเหตุ
1. ตัวกลางดูดซับ	- ใช้ถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด ได้แก่ SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC
2. ชนิดสีย้อม	- สีย้อมที่ใช้ทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ สิริแอคทีฟ Reactive Black 5 (RB5), สีเบสิก Basic Yellow 1 (BY1)
3. ค่าพีเอช	- ที่ค่าพีเอช 5, 7 และ 9
4. อุณหภูมิ	- ที่ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $55 \pm 2^{\circ}\text{C}$
5. อัตราการเติมอากาศ (Qg)	- 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 และ 1.2 L/min

ตารางที่ 3.1(ต่อ) กำหนดค่าและประเภทตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่ศึกษา	วิธีวิเคราะห์
1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ - พื้นที่ผิว - หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว - ลักษณะพื้นที่ผิว - ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวเท่ากับศูนย์ 2. ปริมาณสีข้อมในน้ำเสีย 3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างฟิล์ม($K_L a$) 4. พื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศ (a_B)	- Nitrogen Adsorption - FT-IR Spectrometer - Scanning Electron Microscope - Acid - Base Titration - UV Spectrophotometer - วิเคราะห์ข้อมูลทางจลนศาสตร์การดูดซับ - กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

3.3.2 การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

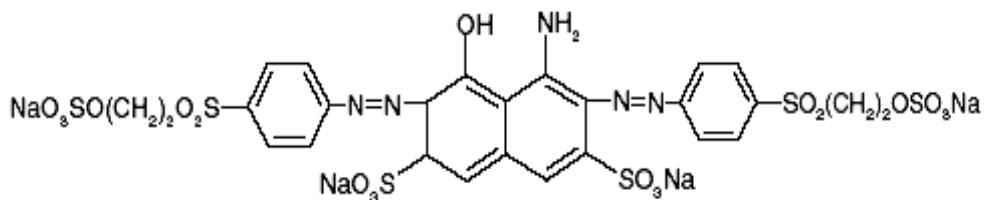
สีข้อมที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 2 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย

1. สีข้อมรีแอคทีฟโทนสีดำ ชื่อทางการค้าคือ Reactive Black 5 (RB5) จาก Dystar textilfarben GmbH & Co. Deutschland ซึ่งสีรีแอคทีฟเป็นสีข้อมผ้าที่ปัจจุบันนิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยเฉพาะชนิด Reactive Black 5 เนื่องจากเป็นสีที่สามารถผสมให้สีอื่น ซึ่งในกระบวนการฟอกย้อมสีข้อมชนิดนี้จะมีการยึดติดกับเส้นใยดำและต้องผ่านการล้างเส้นใยที่ข้อมหลายขั้นตอน ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนของสีมากับน้ำทิ้งสูง โดยโครงสร้างสีชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก)

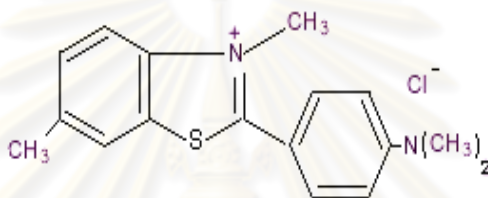
2. สีข้อมเบสิกโทนสีเหลือง ชื่อทางการค้าคือ Basic Yellow 1 (BY 1) จาก Sigma-Aldrich Company Ltd. เป็นสีข้อมที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถผสมให้สีอื่นได้ ซึ่งโดยทั่วไปการยึดติดกับเส้นใยของสีเบสิกค่อนข้างไม่แน่นอนและไม่ทนทานต่อการซักล้าง ดังนั้นโอกาสที่สีชนิดนี้จะเกิดการปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจึงเกิดได้สูง ซึ่งโครงสร้างสีชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข)

ตารางที่ 3.2 มวลโมเลกุลสีข้อมและความยาวคลื่นที่ใช้ตรวจวัด

สีข้อม	Cass No.	มวลโมเลกุล (g/mol)	% Dye content	ความยาวคลื่น (λ_{max}) (นาโนเมตร)
Reactive Black 5	17095-24-8	991.82	55	597
Basic Yellow 1	2390-54-7	318.86	75	412



ก) Reactive Black 5 (RB 5)



ข) Basic Yellow 1 (BY 1)

รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม ก) Reactive Black 5 (RB 5) (ข) Basic Yellow 1 (BY 1)

ความเข้มข้นสีย้อมจากข้อมูลน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็นค่าที่ไม่แน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพเศรษฐกิจ ความต้องการสินค้าของผู้บริโภค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดความเข้มข้นสีย้อมทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นของการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมระหว่างถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกันภายใต้สภาวะเดียวกันได้

การเตรียมสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทำได้โดยผสมสีย้อม Reactive Black 5 (RB 5) หรือ Basic Yellow 1 (BY 1) ปริมาณ 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออนจะได้สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 50 mg/L และ 150 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่จะนำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่พีเอช 5, 7 และ 9 และควบคุมค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตบัฟเฟอร์และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตบัฟเฟอร์) เพื่อให้ได้น้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้สภาวะที่ต้องการศึกษา

3.3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนการนำกากตะกอนเชื้อกระดาษที่แห้งโดยมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์และเคลือบด้วยไคโตซานรวมทั้งการนำถ่านกัมมันต์เกรดการค้า Shirasagi S-10 จาก Japan EnviroChemicals Ltd. มาเคลือบด้วยไคโตซานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยการเตรียมถ่านกัมมันต์มีขั้นตอนดังนี้

3.3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษ

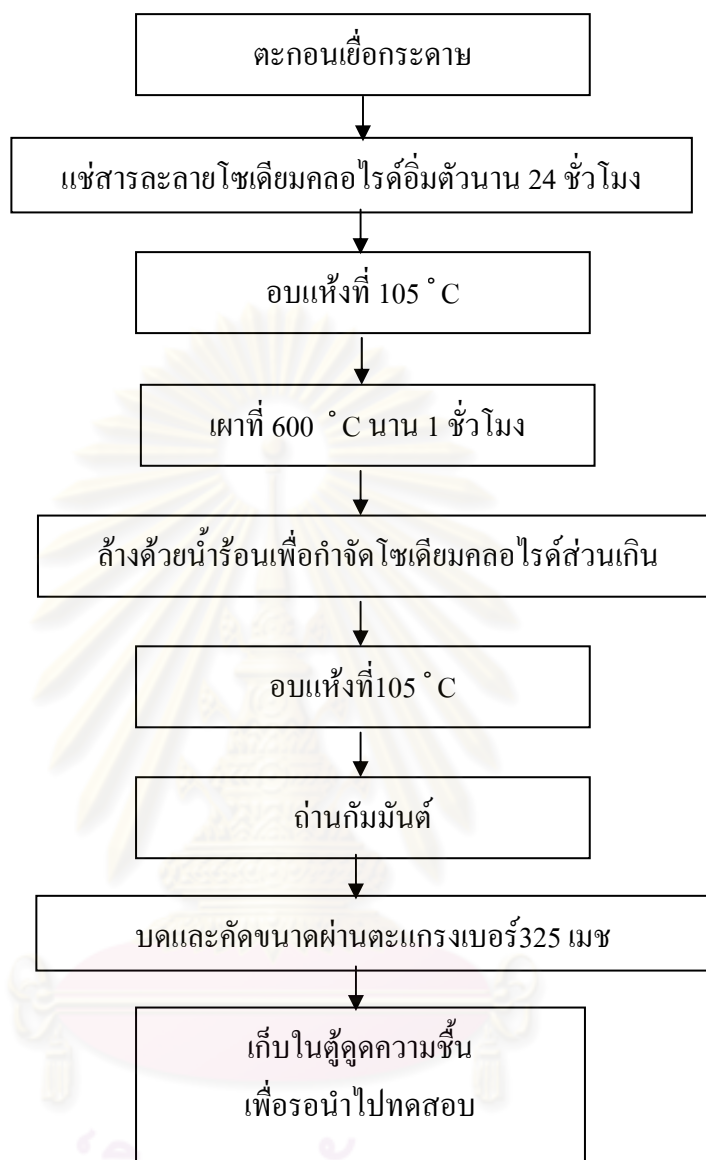
กากตะกอนเชื้อกระดาษที่นำมาเป็นวัตถุดิบผลิตถ่านกัมมันต์นำมาจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียของระบบตะกอนเร่งที่ผ่านกระบวนการรีดน้ำแล้วจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของกากตะกอนเชื้อกระดาษ

ธาตุองค์ประกอบ(% น้ำหนักแห้ง)			โซเดียม (mg/kg)
C	H	N	
40.34	6.126	0.648	3427.28

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษสามารถสรุปขั้นตอนดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (ภาณุ และคณะ, 2547)

1. นำกากตะกอนเชื้อกระดาษแห้งมาแช่ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง
2. นำตะกอนเชื้อกระดาษที่ผ่านการแช่สารละลายเสร็จแล้วมากรองเอาตะกอนเชื้อกระดาษและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงโดยปริมาณความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
3. บรรจุตะกอนเชื้อกระดาษในภาชนะดินเผาปิดฝา แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง
4. นำถ่านที่ผ่านการเผาแล้วล้างสารกระตุ้นออกโดยแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืน แล้วล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดโซเดียมคลอไรด์ส่วนเกินออกไปจนมีค่าพีเอชคงที่
5. นำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงและนำไปบดละเอียดและคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช (0.044 mm) จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเชื้อกระดาษเก็บไว้ในตู้สุญญากาศ



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนเยื่อกระดาษ

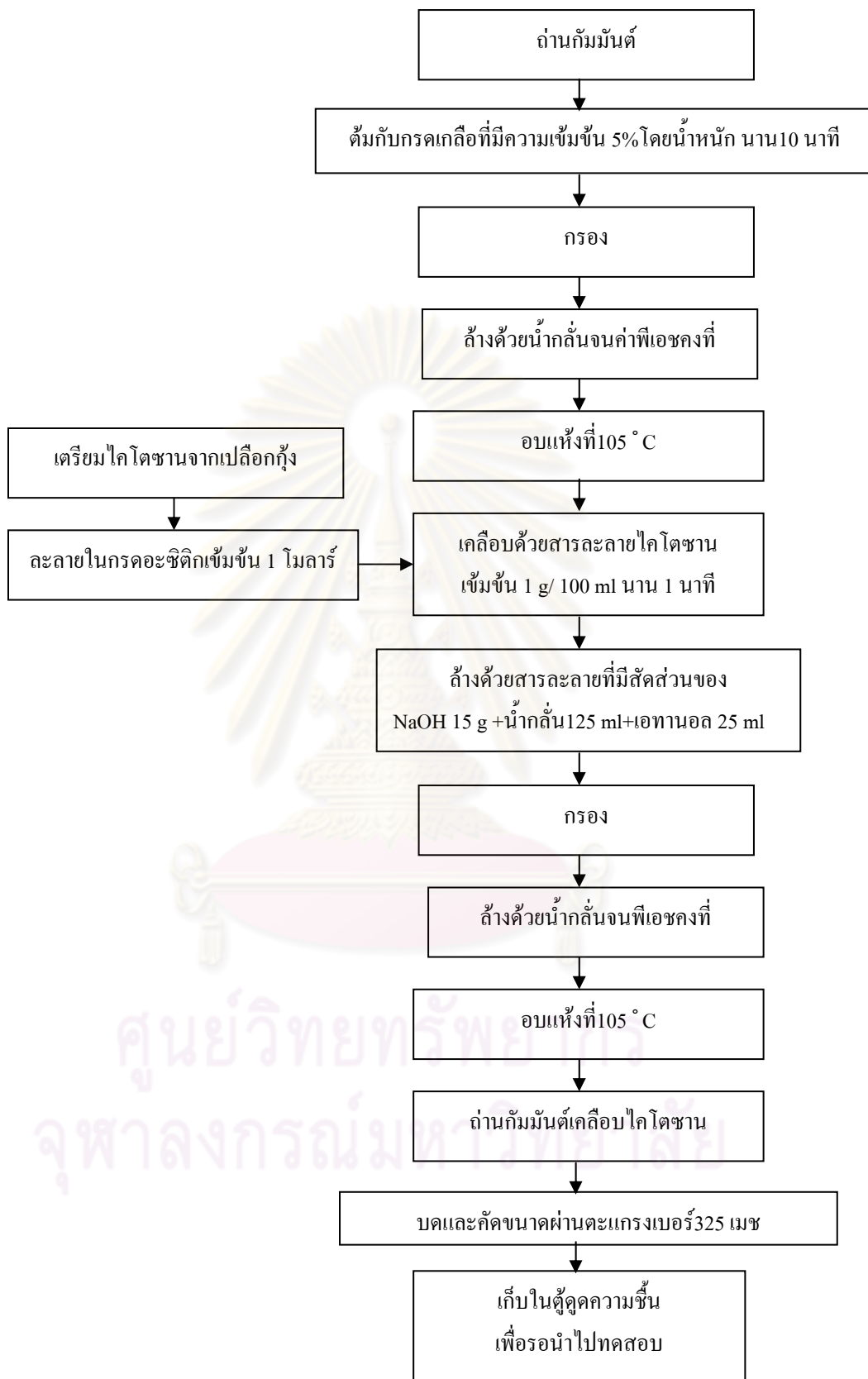
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3.2 การเตรียมน้ำถ่านกัมมันต์เคลือบไคโตซาน

การนำถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกันที่ใช้ในการศึกษามาเคลือบด้วยไคโตซานเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมซึ่งถ่านกัมมันต์ที่นำมาเคลือบด้วยไคโตซานมี 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านชนิด SAC และ PAC ซึ่งเมื่อเคลือบด้วยไคโตซานแล้วทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ชนิด CH-SAC และ CH-PAC ตามลำดับ โดยไคโตซานที่ใช้ในการเคลือบเป็นไคโตซานผงจากเปลือกกุ้งมีดัชนีการกำจัดหมู่อะซิติล 85-90% จาก Seafresh Chitosan (Lab) Co., Ltd.(Thailand) โดยสามารถสรุปขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (อนัญญา, 2542)

1. นำถ่านกัมมันต์มาต้มกับกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 5 % โดยน้ำหนักเป็นเวลา 10 นาที โดยอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายเป็น 1 : 10 และเริ่มจับเวลาเมื่อน้ำเดือด
2. นำถ่านกัมมันต์มากรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชของที่ อบถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 ° C จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น
3. เตรียมสารละลายไคโตซานโดยการนำผงไคโตซานมาละลายในกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในอัตราส่วน 1 g/ 100 ml ตามลำดับ จะได้สารละลายไคโตซานที่มีความเข้มข้น 1 g/ 100 ml
4. นำถ่านกัมมันต์มาเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานโดยการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปลงในเครื่องปั่นและเติมสารละลายไคโตซานในอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายไคโตซานเป็น 1 g/ 100 ml ตามลำดับ ปั่นด้วยความเร็วสูงเพื่อเคลือบถ่านกัมมันต์เป็นเวลานาน 1 นาที แล้วกรองถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายแล้วล้างด้วยสารละลายซึ่งประกอบไปด้วยสัดส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 g น้ำปราศจากไอออน 125 ml และเอทานอล 25 ml จากนั้นนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 ° C จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซาน

3.3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งคุณสมบัติของกากตะกอนเชื้อกระดาษซึ่งเป็นวัตถุดิบผลิตถ่านกัมมันต์ชนิด SAC โดยคุณสมบัติที่จำเป็นต้องทำการศึกษาในแต่ละตัวอย่างสรุปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางดูดซับ

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว	pH _{ZPC}	หมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิว	ไนโตรเจนทั้งหมด
ถ่าน SAC	✓	✓	✓	✓
ถ่าน CH-SAC	✓	✓	✓	✓
ถ่าน PAC	✓	✓	✓	✓
ถ่าน CH-PAC	✓	✓	✓	✓

ซึ่งการศึกษาคูณสมบัติที่กล่าวไว้ในตารางที่ 3.4 มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคูณสมบัติดังต่อไปนี้

3.3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุองค์ประกอบ (Elemental Analysis)

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบได้แก่ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนในกากตะกอนเชื้อกระดาษโดยใช้เครื่อง Elemental analyzer (อัมพร อึ้งปกรณ์แก้ว, 2540) ที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน วิเคราะห์ปริมาณโซเดียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic absorption spectrophotometer: AAS) และวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Total Kjeldahl Nitrogen

3.3.4.2 การหาพื้นที่ผิว (รวัชชัย, 2548)

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (Standard test method for specific surface area of carbon or graphite, ASTM C819-77) โดยใช้โดยใช้ทฤษฎีของไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption) แบบบีอีที (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm) สามารถคำนวณพื้นที่ผิว (S_{BET}) ได้ดังสมการ

$$S_{\text{BET}} = NA_{\text{CS}} / [(S - I) \times (MW)]$$

เมื่อ S_{BET} = พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)

N = เลขอาโวการ์โดร (6.023×10^{23})

A_{CS} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน (16.2 ตารางอังสตรอม)

MW = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (a) = $\frac{S_{\text{BET}} \times W}{V}$

เมื่อ W = น้ำหนักสารดูดซับทั้งหมด (g)

V = ปริมาตรสารดูดซับทั้งหมด (m^3)

3.3.4.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (Thuy, 2006)

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดักจับสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง IR-Spectrum (Fourier Transform InfraRed Spectrometer : FT-IR Spectrometer)

3.3.4.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิว

สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron Microscope : SEM)

3.3.4.5 การวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH Zero point of charge, pH_{ZPC}) (Al-Ghouti และคณะ, 2003)

การหาประจุบนพื้นผิวโดยวิธีไทเทรตด้วยกรด-ด่าง (Acid-Base titration) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำสารดูดซับผสมกับน้ำปราศจากไอออนจำนวน 10 ml หรือ 1 กรัม ต่อน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.025 mol/L หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 mol/L เพื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ $3, 5, 7, 9$ และ 11
3. เจือจางส่วนผสมให้ได้ปริมาณ 25 ml ด้วยน้ำปราศจากไอออน
4. ปรับค่าความแรงไอออน (Ionic strength) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 mol/L
5. นำตัวอย่างไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ($25 \pm 2^\circ \text{C}$)
6. ทำการวัดค่าพีเอชซึ่งจะบอกความเข้มข้นของโปรตอน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-)

7. คำนวณหาประจุบนพื้นผิวได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อ	$[\text{HCl}]_{\text{add}}$	= ความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกที่เติมลงไป (mol/L)
	$[\text{NaOH}]_{\text{add}}$	= ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป (mol/L)
	$[\text{H}^+]$	= ความเข้มข้นของโปรตอน (mol/L) จำนวนจาก $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$
	$[\text{OH}^-]$	= ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (mol/L) จำนวนจาก $\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$ และ $\text{pOH} = 14 - \text{pH}$
	96500	= ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)
	W	= น้ำหนักของสารดูดซับ (g/L)

จากนั้นนำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างค่าพีเอชและความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเพื่อหาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{zpc})

3.3.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อม

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบที่ละเท้ายใต้การควบคุมสภาวะที่ทำการศึกษาซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 4 กลุ่มตามจุดมุ่งหมายในการศึกษาดังนี้

3.3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์

มีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

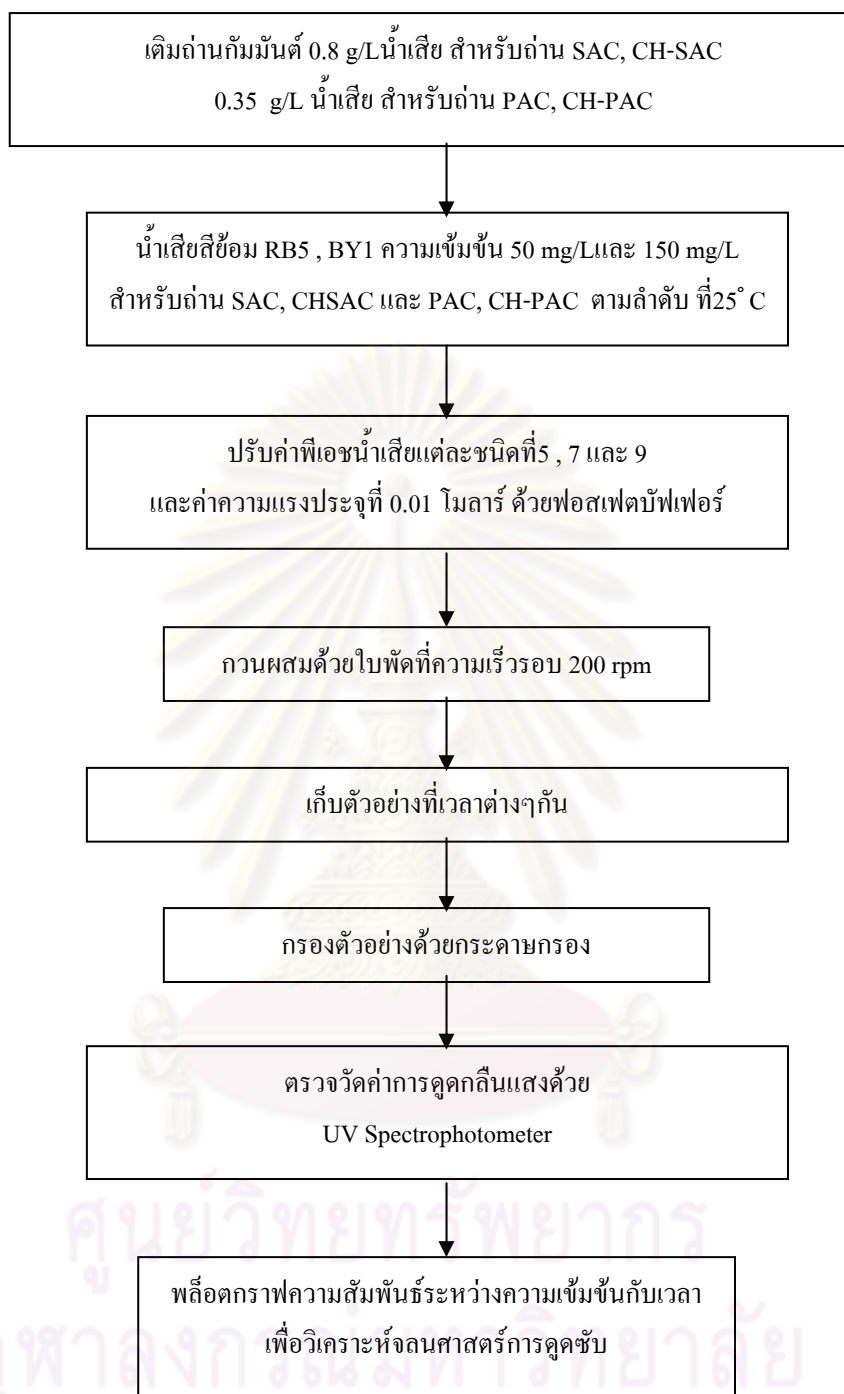
1. เติมถ่านกัมมันต์ลงไปบีกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสียดีย้อมสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอคทีฟ Reactive Black 5 (RB5) สีเบสิก Basic Yellow 1 (BY1) ปริมาณ 250 ml ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC ในสัดส่วนถ่านกัมมันต์ 0.8 mg/L ของน้ำเสียดีย้อม สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 0.35 mg/L ของน้ำเสียดีย้อม สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC
2. ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียดีย้อมสังเคราะห์ที่พีเอช 5, 7 และ 9 และปรับค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
3. กวนด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25° C
4. เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ กันนาน 180 นาที สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และนาน 300 นาทีสำหรับถ่าน PAC, CH-PAC โดยกรองตัวอย่างที่เก็บทันทีด้วยกระดาษกรองและเก็บไว้ในขวดปิดฝา

5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสี ดังตารางที่ 3.4 และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีข้อมจากกราฟมาตรฐาน

6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสีข้อมเพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับสีข้อมซึ่งได้แก่ เวลาสมมูลการดูดซับ อันดับปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างฟิล์ม (k_{La}) บนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดภายใต้สภาวะเดียวกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

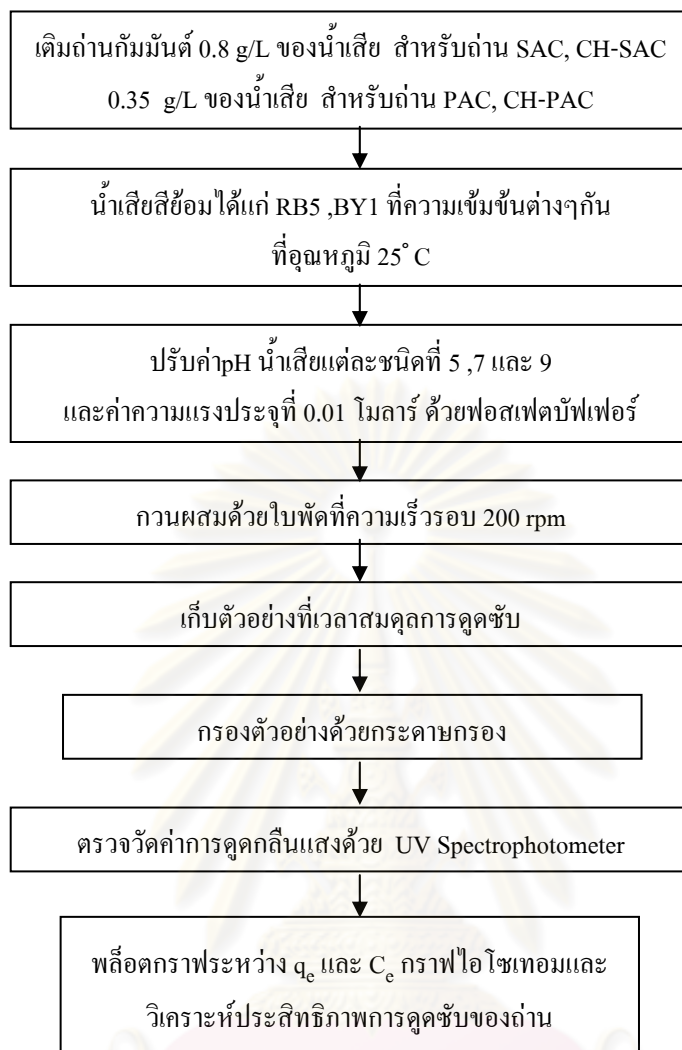


รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์

3.3.5.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

มีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เติมถ่านกัมมันต์ในบีกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสียดี้อยู่ที่ 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอดทีฟ Reactive Black 5 (RB5) และสีเบสิก Basic Yellow 1 (BY1) ปริมาณ 250 ml ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันในสัดส่วนถ่านกัมมันต์ 0.8 g/L ของน้ำเสียดี สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 0.35 g/L ของน้ำเสียดี สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC
2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียดี้อยู่ที่ 5, 7 และ 9 และค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
3. กวนด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C
4. เก็บตัวอย่างที่เวลาสมดุลการดูดซับ ได้แก่ 180 นาทีสำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 300 นาทีสำหรับถ่าน PAC, CH-PAC กรองตัวอย่างทันทีด้วยกระดาษกรองแล้วเก็บไว้ในขวดปิดฝา
5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีจากกราฟมาตรฐาน
6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีที่สถานะสมดุล (C_e) และความสามารถในการดูดซับสี (q_e) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ภายใต้สภาวะเดียวกัน
7. พล็อตกราฟไอโซเทอมการดูดซับเพื่อใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ



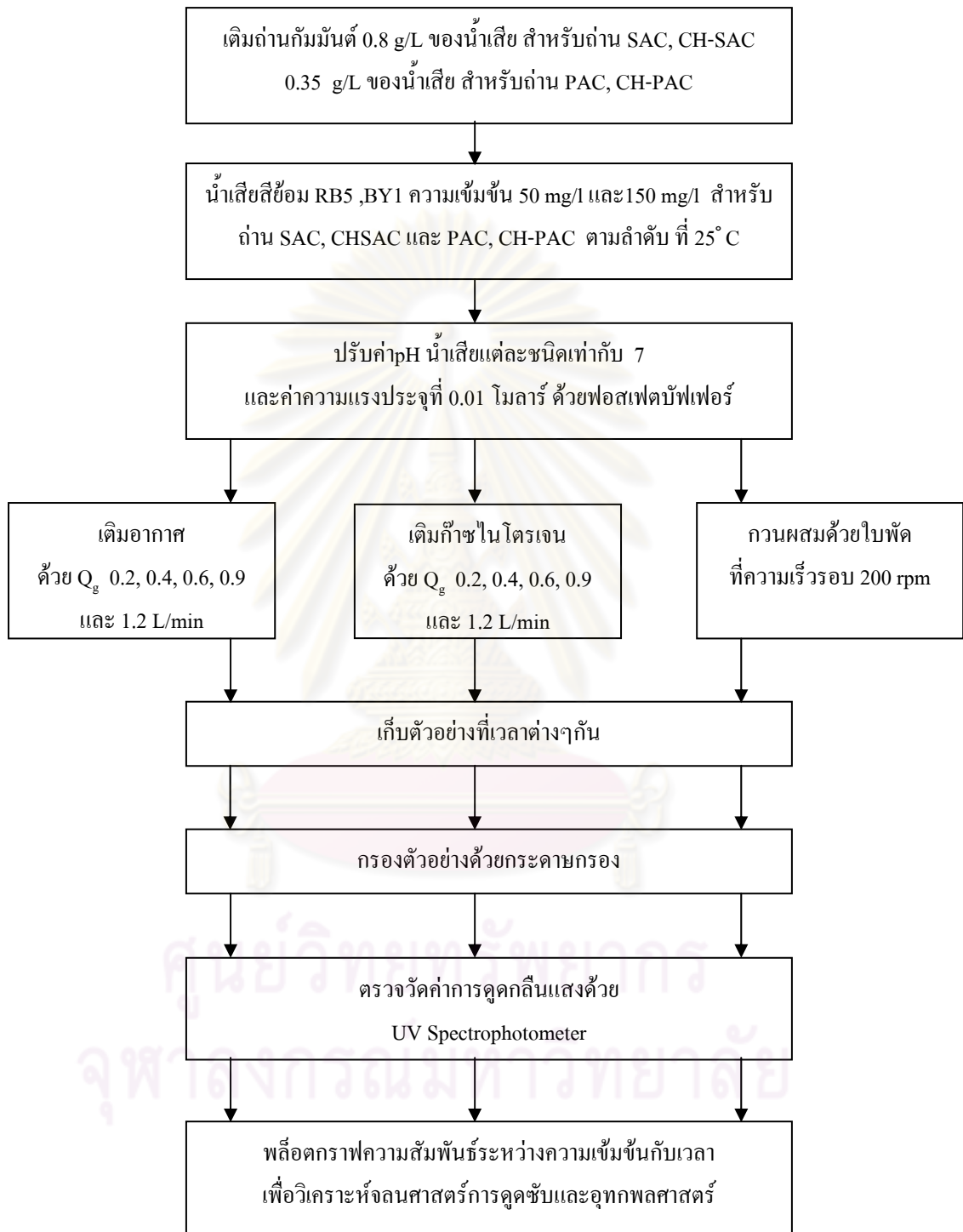
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

3.3.5.3 การศึกษาผลของการเติมอากาศต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากการกวนผสมด้วยฟองอากาศต่อความสามารถในการดูดซับสีขุ่นของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่าน SAC, CH-SAC PAC และ CH-PAC โดยการทดลองจะเปรียบเทียบการกวนผสม 3 รูปแบบคือ การเติมอากาศ การเติมก๊าซไนโตรเจนและการกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัด ทั้งนี้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาซึ่งการเติมก๊าซไนโตรเจนมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อการดูดซับที่อาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของออกซิเจนในน้ำ นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบทางด้านอุทกพลศาสตร์(hydrodynamic) จากการกวนด้วยฟองอากาศด้วยการเปรียบเทียบกับผลจากการกวนผสมด้วยใบพัดซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีขุ่นและ

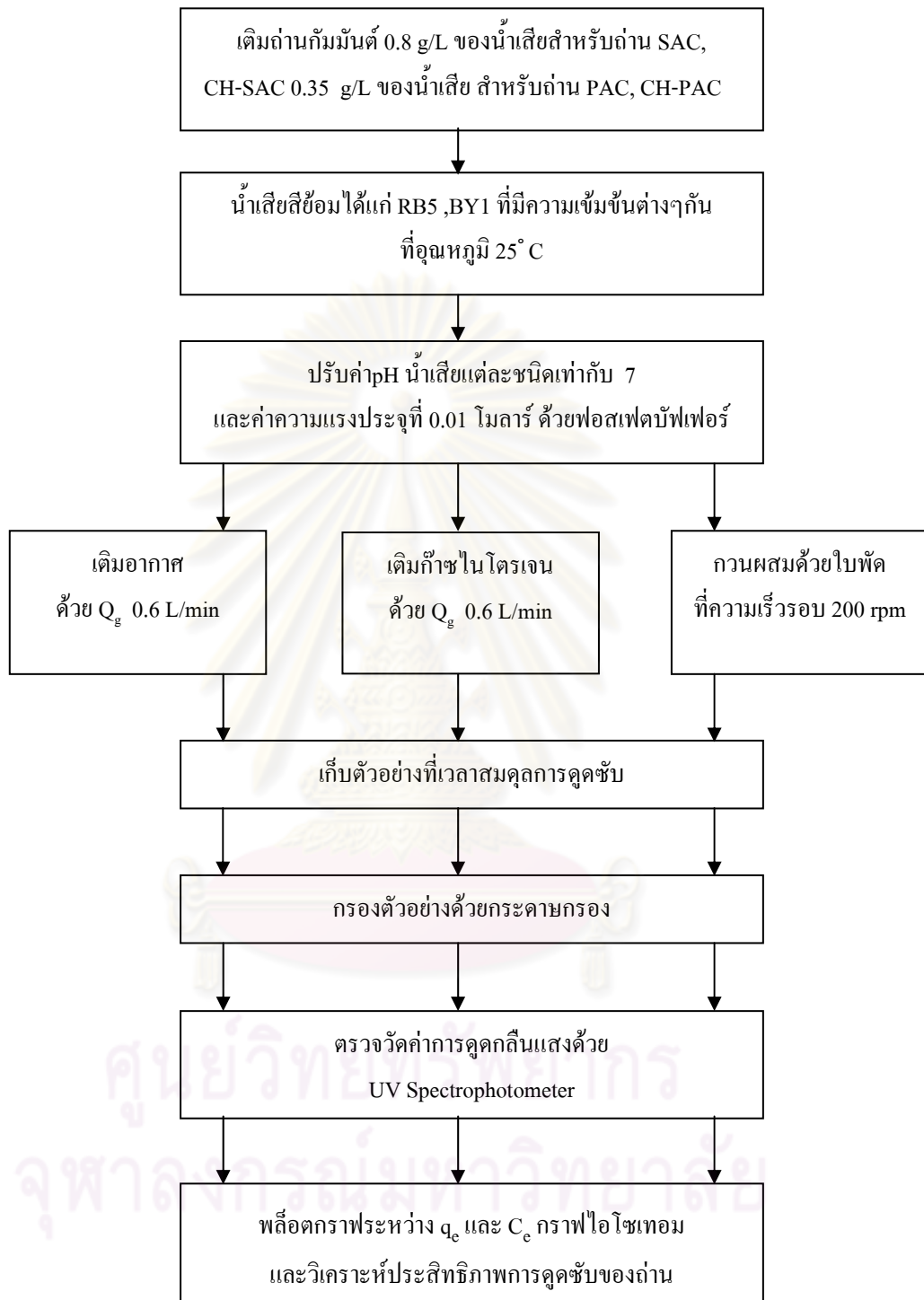
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมของการเติมอากาศ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสี่ข้อมของการเติมอากาศ
 1. เติมน้ำมันถั่วเหลืองลงในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำเสียสี่ข้อม RB5 และ BY 1 ปริมาณ 500 ml สำหรับการกวนผสมด้วยฟองและในบีกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสียสี่ข้อมปริมาณ 250 ml สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด
 2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสี่ข้อมสังเคราะห์ 7 และค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัพเฟอร์ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C
 3. กวนผสมด้วยการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการเติมอากาศ (Q_g) ต่างกัน ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 และ 1.2 L/min สำหรับการกวนผสมด้วยฟองและกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่มีความเร็วรอบ 200 rpm สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด
 4. เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ กันนาน 180 นาทีสำหรับถ่าน SAC, CH- SAC และนาน 300 นาที สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC โดยกรองตัวอย่างที่เก็บทันทีด้วยกระดาษกรองและเก็บไว้ในขวดปิดฝา
 5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสี่ข้อมจากกราฟมาตรฐาน
 6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสี่ข้อมเพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับสี่ข้อมภายใต้สภาวะเดียวกัน
 7. วิเคราะห์ผลทางอุทกพลศาสตร์ของการเติมอากาศที่มีต่อการดูดซับ



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษากลศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมของการเติมอากาศ

- การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมของการเติมอากาศ
 1. เติมถ่านกัมมันต์ลงในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำเสี่ยสี่ข้อม RB5 และ BY 1 ปริมาณ 500 ml สำหรับการกวนผสมด้วยฟองและในบีกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสี่ยสี่ข้อมปริมาณ 250 ml สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด โดยใช้สี่ข้อมที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน
 2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสี่ยสี่ข้อมสังเคราะห์ 7 และค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C
 3. กวนผสมด้วยการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการเติมอากาศ (Q_g) เท่ากับ 0.6 L/min สำหรับการกวนผสมด้วยฟอง (ความเร็วแรงแคเดียนท์เท่ากับการกวนด้วยใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 rpm) และกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่มีความเร็วรอบ 200 rpm สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด
 4. เก็บตัวอย่างที่เวลาสมดุลการดูดซับ ได้แก่ 180 นาทีสำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 300 นาทีสำหรับถ่าน PAC, CH-PAC กรองตัวอย่างทันทีด้วยกระดาษกรองแล้วเก็บไว้ในขวดปิดฝา
 5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสี่ข้อมจากกราฟมาตรฐาน
 6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี่ข้อมที่สภาวะสมดุล (C_e) และความสามารถในการดูดซับสี่ข้อม (q_e) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ข้อมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน
 7. พล็อตกราฟไอโซเทอมการดูดซับเพื่อใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีข้มของการเติมอากาศ

3.3.5.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบบของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่าน SAC, CH-SAC PAC และCH-PAC โดยการทดลองจะเปรียบเทียบผลกระทบบของอุณหภูมิที่มี ต่อการกวนผสม 2 รูปแบบคือ การเติมอากาศและการกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัด ซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 หัวข้อคือ การศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีข้อมและการศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อไอโซเทอมการดูดซับสีข้อม โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ3.10 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีข้อมของถ่านกัมมันต์

1. เติมถ่านกัมมันต์ลงในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำเสียสีข้อม RB5 และ BY 1 ปริมาณ 500 ml สำหรับการกวนผสมด้วยอากาศและในบีกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสียสีข้อมปริมาณ 250 ml สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด

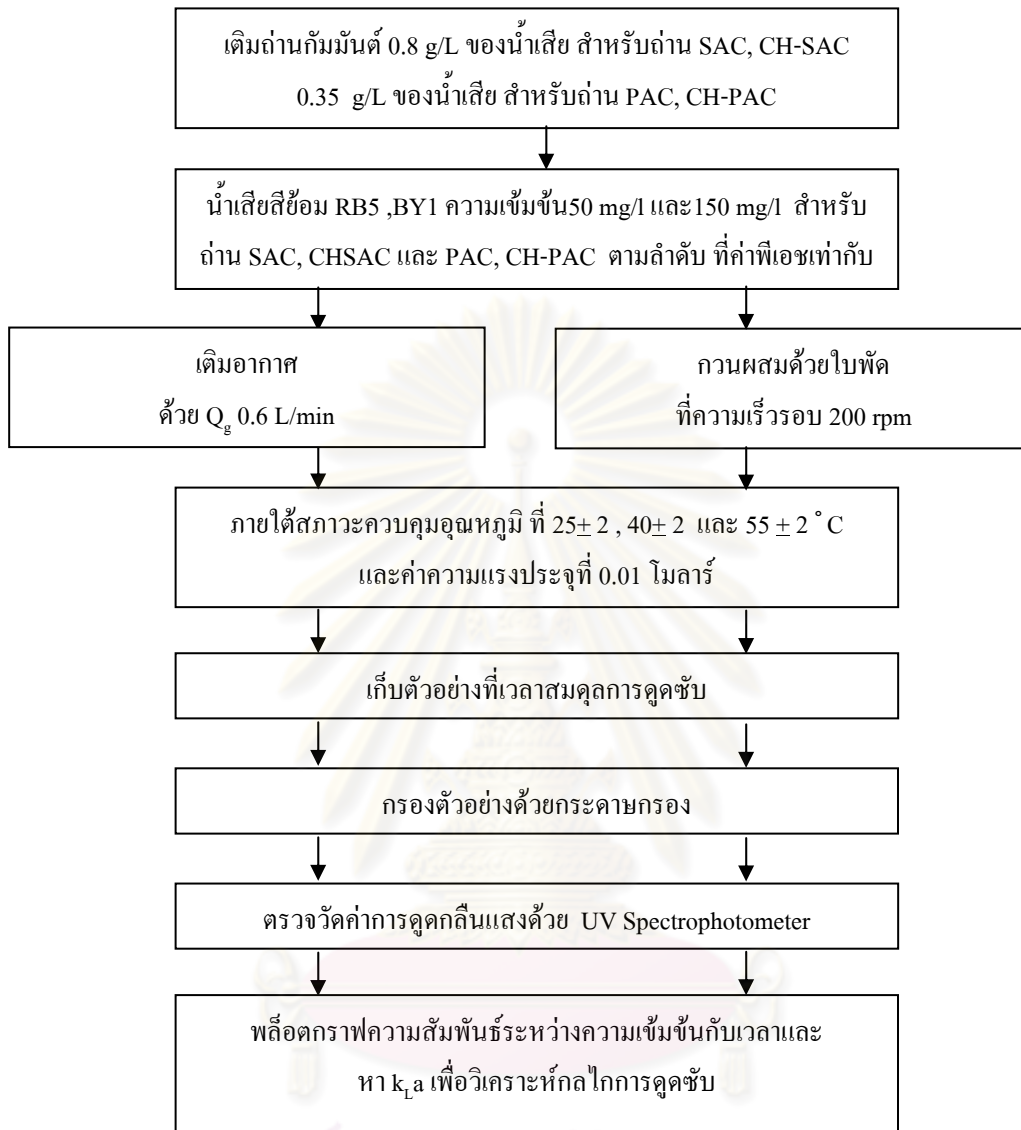
2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสีข้อมสังเคราะห์ 7 และค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์

3. กวนผสมด้วยการเติมอากาศอัตราการเติมอากาศ (Q_g) เท่ากับ 0.6 L/min สำหรับการกวนผสมด้วยอากาศและกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่มีความเร็วรอบ 200 rpm สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด ควบคุมอุณหภูมิต่างๆ กัน ได้แก่ $25 \pm 2^\circ \text{C}$, $40 \pm 2^\circ \text{C}$ และ $55 \pm 2^\circ \text{C}$ ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

4. เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆกันนาน 180 นาทีสำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และนาน 300 นาที สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC โดยกรองตัวอย่างที่เก็บทันทีด้วยกระดาษกรองและเก็บไว้ในขวดปิดฝา

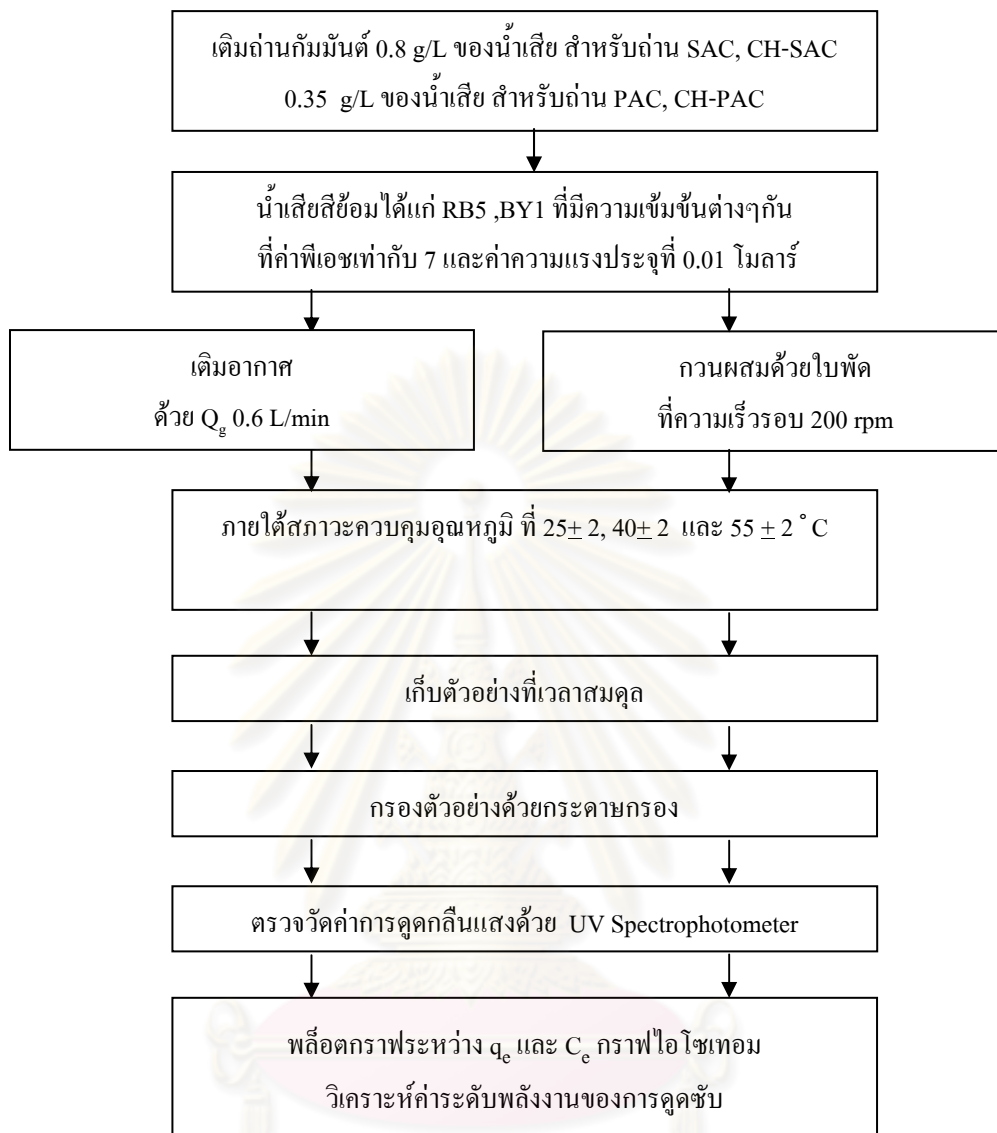
5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีข้อมจากราฟมาตรฐาน

6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสีข้อมเพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับสีข้อมภายใต้สภาวะเดียวกัน



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีข้อมของถ่านกัมมันต์

- การศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์
 1. เติมถ่านกัมมันต์ลงในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำเสียดสี RB5 และ BY 1 ปริมาณ 500 ml สำหรับการกวนผสมด้วยฟองและไนบิกเกอร์ที่บรรจุด้วยน้ำเสียดสีปริมาณ 250 ml สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัด
 2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียดสีสังเคราะห์ 7 และค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
 3. กวนผสมด้วยการเติมอากาศอัตราการเติมอากาศ (Q_g) เท่ากับ 0.6 L/min สำหรับการกวนผสมด้วยอากาศและกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนแบบใบพัดที่มีความเร็วรอบ 200 rpm สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัดและควบคุมอุณหภูมิต่างๆ กัน ได้แก่ $25 \pm 2^\circ\text{C}$, $40 \pm 2^\circ\text{C}$ และ $55 \pm 2^\circ\text{C}$ ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
 4. เก็บตัวอย่างที่เวลาสมดุลการดูดซับ ได้แก่ 180 นาที สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 300 นาที สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC กรองตัวอย่างทันทีด้วยกระดาษกรองแล้วเก็บไว้ในขวดปิดฝา
 5. วัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละสีและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมจากกราฟมาตรฐาน
 6. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (C_e) และความสามารถในการดูดซับสีย้อม (q_e) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ภายใต้สภาวะเดียวกัน
 7. พล็อตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ
 8. วิเคราะห์ค่าความต้องการระดับพลังงานของการดูดซับ



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อไอโซเทอมการดูดซับสีซีย้อมของถ่านกัมมันต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

งานวิจัยได้ใช้ตัวกลางดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเชื้อกระดาษ (SAC) ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเชื้อกระดาษเคลือบไคโตซาน(CH-SAC) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าชนิด Shirasagi S-10(PAC) และถ่านกัมมันต์ Shirasagi S-10 เคลือบด้วยไคโตซาน (CH-PAC) เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อม โดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

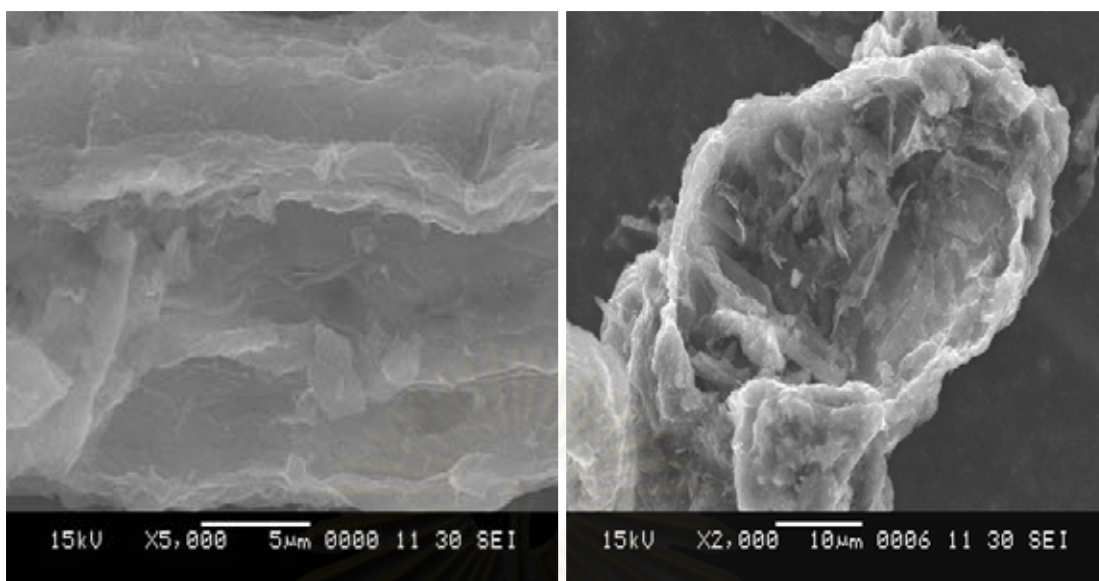
ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	พื้นที่ผิว ภายนอก (m^2/g)	ขนาดโพรง (nm)	ปริมาตร โพรง (mm^3/g)	pH _{ZPC}	หมู่ ฟังก์ชัน บนพื้นผิว	ไนโตรเจน ทั้งหมด (g/100g)
ถ่าน SAC	411.6	231.5	2.2	222.7	7.4	Hydroxy, Aromatic, Phenol และ อื่นๆ	0.94
ถ่าน CH-SAC	44.7	44.7	5.1	5.7	6.7	Alcohol, Amino และ อื่นๆ	3.19
ถ่าน PAC	980.5	416.6	1.9	276.0	7.3	Carboxyl, Phenol และ อื่นๆ	10.09
ถ่าน CH-PAC	929.4	356.0	2.82	65.5	6.9	Alcohol, Amino, Carboxyl, Phenol	21.54

4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาผลของลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ดังตารางที่ 4.1 พบว่าถ่าน SAC จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดน้อยกว่า PAC ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซานพบว่าถ่าน CH-SAC และ CH-PAC มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมก่อนเคลือบไคโตซาน ทั้งนี้เนื่องจากไคโตซานมีไนโตรเจนจากโครงสร้างหมู่อะมิโน ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นสามารถยืนยันว่ามีไคโตซานเคลือบอยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยผลจากการเคลือบไคโตซานบนตัวกลางดูดซับ โดยการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบกับตัวกลางดูดซับที่ยังไม่ได้เคลือบดังรูปที่ 4.1 พบว่าการเคลือบไคโตซานจะเป็นการลดพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ โดยเมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการตรวจวัดพบว่า CH-SAC มีพื้นที่ผิวทั้งหมดและพื้นที่ผิวภายนอกที่เท่ากันคือ $44.7 \text{ m}^2/\text{g}$ จากเดิมถ่าน SAC ที่ไม่ได้เคลือบมีพื้นที่ผิวทั้งหมดและพื้นที่ผิวภายนอกเท่ากับ 411.6 และ $231.5 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าไคโตซานได้บดบังรูพรุนและทำให้ผิวของถ่าน CH-SAC มีความเรียบมากขึ้นโดยสามารถกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับบน CH-SAC ขึ้นอยู่กับความสามารถของไคโตซานเท่านั้น

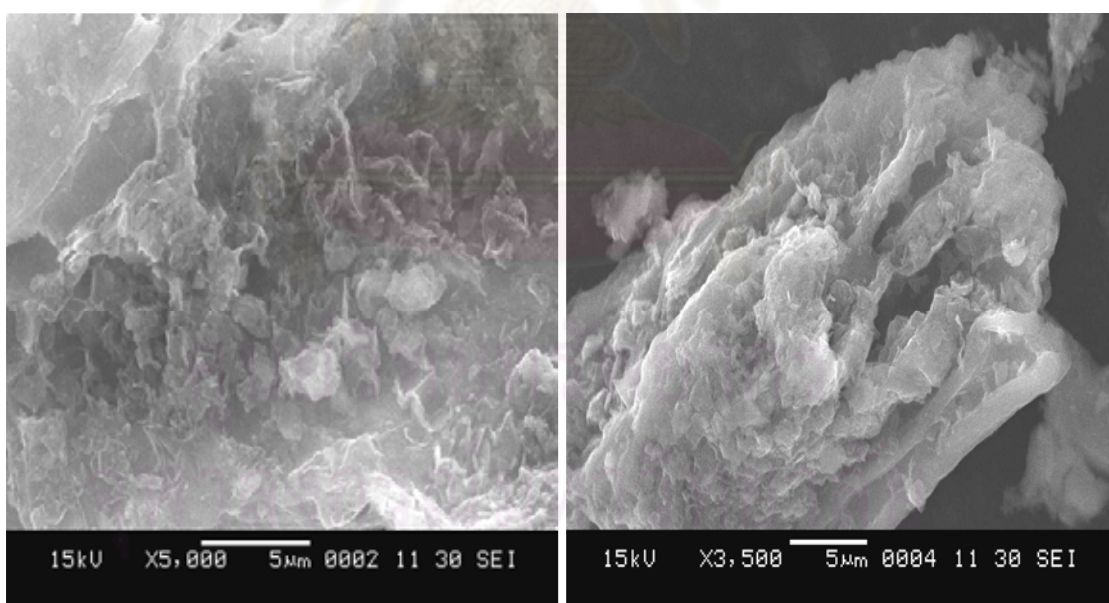
จากลักษณะพื้นผิวของ PAC ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ามีพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอกว่า SAC ซึ่งทำให้ผลการเกาะติดของไคโตซานจากขั้นตอนการเคลือบวัสดุทั้งสองชนิดแตกต่างกันโดยเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของ CH-PAC เท่ากับ $929.4 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งไม่แตกต่างจาก PAC ที่มีพื้นที่ $980.5 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการยึดเกาะของไคโตซานบนพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอเกิดขึ้นได้น้อย อีกทั้งไคโตซานยังถูกชะล้างได้ง่ายจากขั้นตอนการล้างไคโตซานส่วนเกิน แต่สามารถยืนยันได้ว่ามีการเคลือบติดของไคโตซานบนพื้นผิวของถ่าน CH-PAC จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากถ่าน PAC ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวถ่าน PAC และ CH-PAC จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับจะเห็นว่าพื้นผิว CH-PAC มีไคโตซานเคลือบเกาะเพียงเล็กน้อยและมีความเป็นไปได้ที่ไคโตซานจะอุดตันรูพรุนส่งผลให้ปริมาตรโพรงของ CH-PAC ที่มีค่าเท่ากับ $65.5 \text{ mm}^3/\text{g}$ น้อยกว่า PAC ที่มีค่าเท่ากับ $276.00 \text{ mm}^3/\text{g}$ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่แตกต่างกันระหว่างตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับบน CH-PAC ขึ้นอยู่กับความสามารถของรูพรุนและพื้นที่ผิวซึ่งน้อยกว่า PAC เพียงเล็กน้อย



(ก)

(ข)

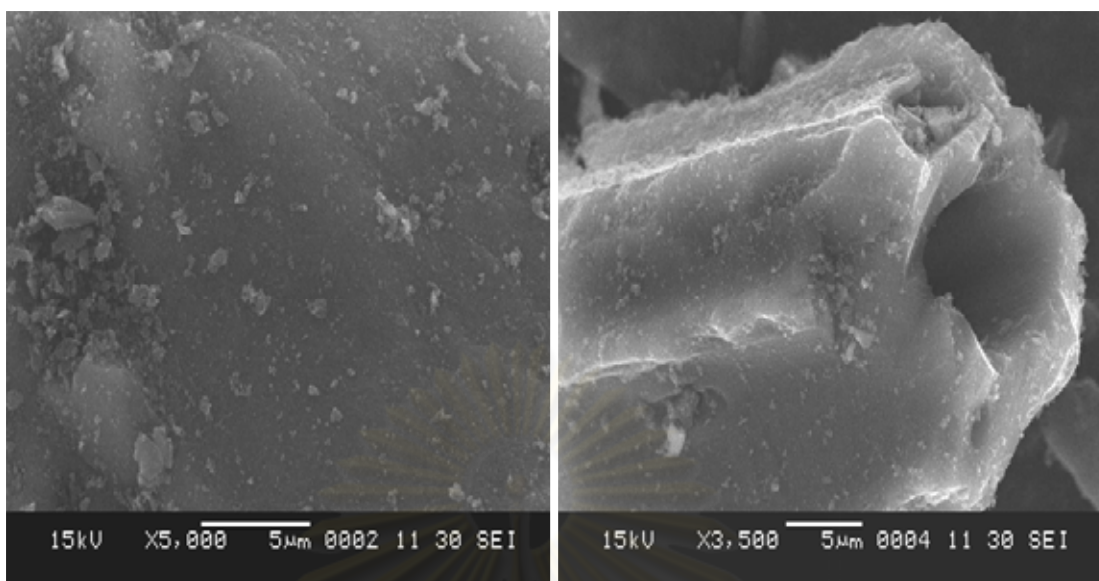
รูปที่ 4.1 ถ่านกัมมันต์ที่ไม่เคลือบสารไลโดซาน(SAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า
(ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 2,000 เท่า



(ก)

(ข)

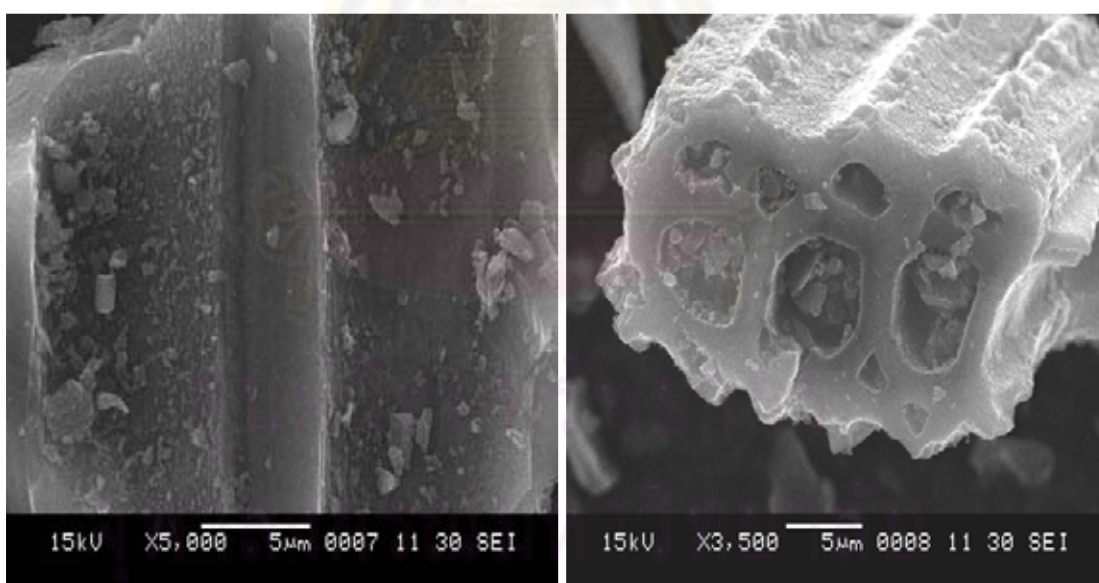
รูปที่ 4.2 ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบสารไลโดซาน (CH-SAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า
(ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 3,500 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า(PAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 3,500 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าเคลือบสารไคโตซาน (CH-PAC) (ก) พื้นที่ผิวกำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ภาพตัดขวางกำลังขยาย 3,500 เท่า

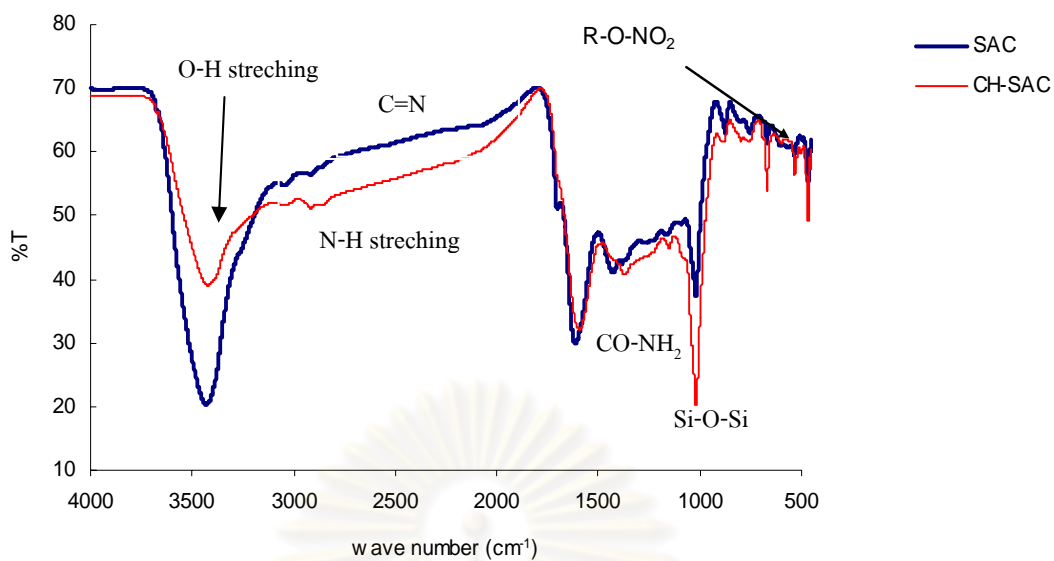
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า pH_{ZPC} พบว่าถ่าน CH-SAC และ CH-PAC มีค่าลดลงกว่าถ่าน SAC และ PAC ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารไคโตซานที่นำมาเคลือบผิวถ่านกัมมันต์มีส่วนผสมของสารละลายกรดอะซิติกส่งผลให้ค่า pH_{ZPC} ของถ่านที่ผ่านการเคลือบไคโตซานลดลง (ชนิสสา, 2548)

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

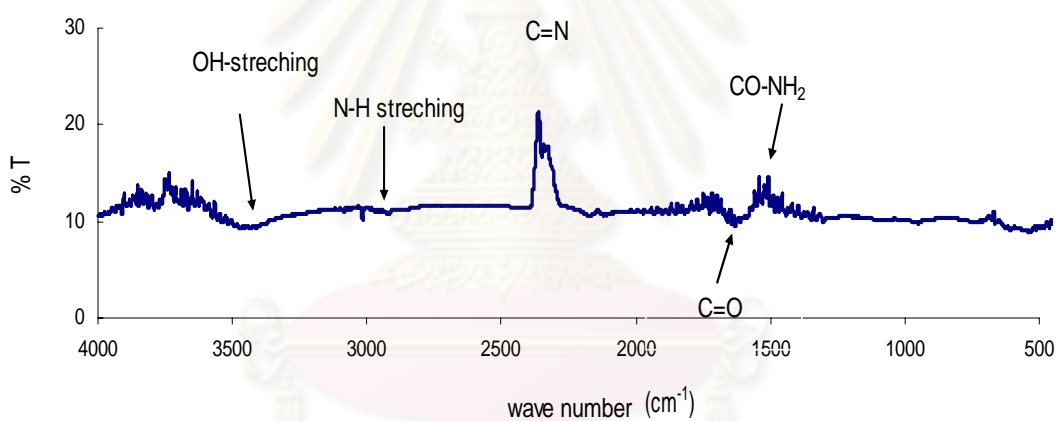
จากการทดสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง IR-Spectrum ของถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่เคลือบและที่เคลือบด้วยไคโตซานดังรูปที่ 4.5 พบว่ามี Spectrum ของหมู่ฟังก์ชันของ OH- Stretching ที่ตำแหน่ง $3,600-3,400\text{ cm}^{-1}$ มีหมู่ $C \equiv N$ ที่ตำแหน่ง $2,400-2,200\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O-Si ที่ตำแหน่ง $1,200-1,000\text{ cm}^{-1}$ หมู่ฟังก์ชันของ N-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3,500-3,000\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ R- O-NO₂ ที่ตำแหน่ง $650-450\text{ cm}^{-1}$ และจากหมู่ฟังก์ชัน Carboxylic และ phenolic บนถ่าน SAC และ PAC เป็นหมู่ที่แสดงประจุลบ

การเคลือบไคโตซานของถ่าน CH-SAC เนื่องจากไคโตซานมีไนโตรเจนทำให้หมู่ฟังก์ชัน R-O-NO₂ เพิ่มขึ้นมายังยืนยันได้จากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้หมู่ $C \equiv N$ หมู่ CO-NH₂ และหมู่ N-H Stretching เพิ่มขึ้นมาจากหมู่อะมิโนหรือเอมีน (-NH₂) ในไคโตซานที่เคลือบผิวตรงตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มประจุบวกทำให้สามารถดูดซับสารที่มีประจุลบได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีหมู่ฟังก์ชันของ OH-Stretching ที่เพิ่มขึ้นมาจากหมู่แอลกอฮอล์ (CH₂OH) ตรงตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 ของไคโตซานซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้สามารถดูดซับกับอนุภาคที่มีประจุบวกได้อีกทางหนึ่งด้วย (ชนิสสา, 2548) ซึ่งจากผลการตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ CH-SAC สามารถคาดคะเนผลการตรวจวัด CH-PAC ได้ในทำนองเดียวกันซึ่งยืนยันได้จากผลการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันหลังจากผ่านการเคลือบด้วยไคโตซาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



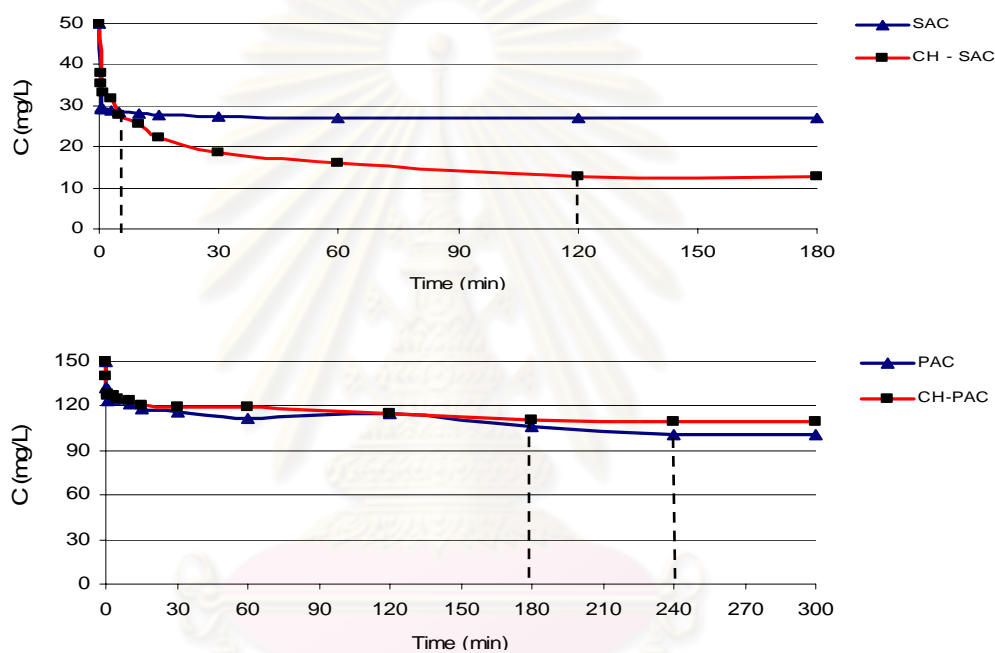
(ข)

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) ของถ่านกัมมันต์ (ก) SAC และ CH-SAC

(ข) PAC

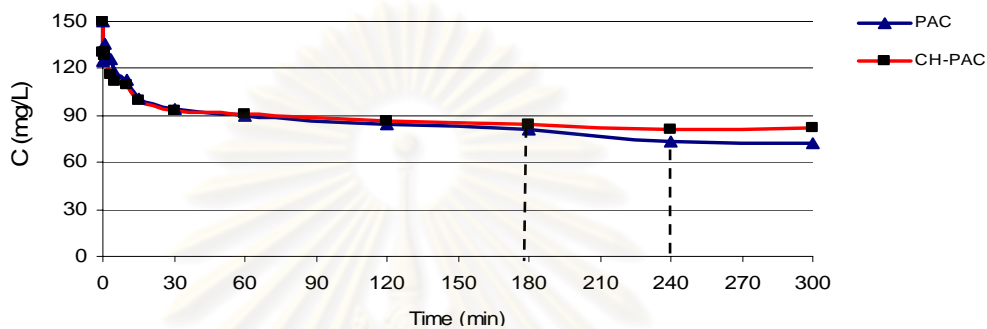
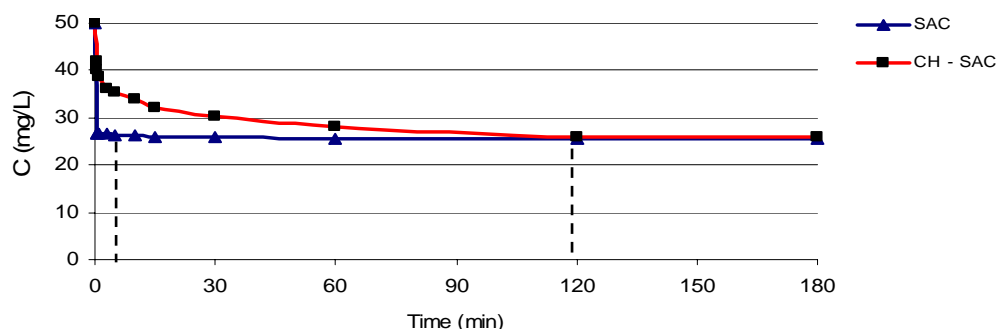
4.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับบนถ่านกัมมันต์

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ Reactive Black 5 (RB5) และ Basic Yellow 1 (BY1) บนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ภายใต้อุณหภูมิ 25°C และควบคุมค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC และ CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC และ CH-PAC โดยผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี RB 5 และสี BY 1 ต่อเวลาแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

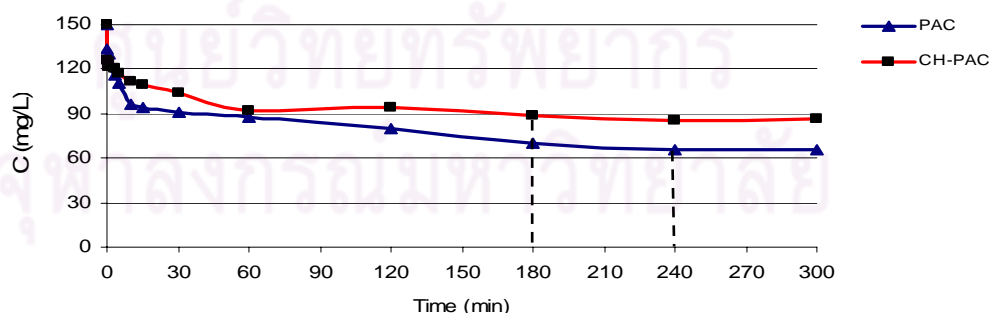
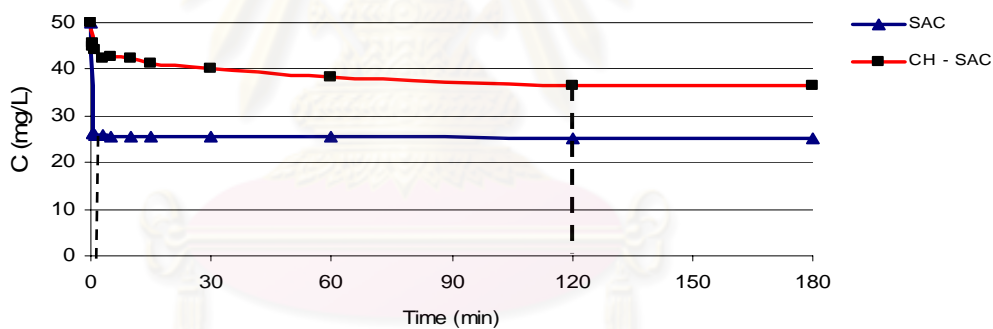


(ก) พีเอช 5

รูปที่ 4.6 จลนศาสตร์การดูดซับสี RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25°C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9



(ข) พีเอช 7



(ค) พีเอช 9

รูปที่ 4.6 (ต่อ) จลนศาสตร์การดูดซับดี RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค)พีเอช 9

จากผลการเคลือบไคโตซานที่มีต่ออัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี RB 5 ดังรูปที่ 4.6 อธิบายได้ดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาสมดุลการดูดซับ (t_c) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นดังรูปที่ 4.6 โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีค่า t_c ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และ พีเอช 9 แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญ

- ผลจากการเคลือบไคโตซานบนถ่านที่ CH-SAC ที่มีต่อ t_c พบว่าการเคลือบไคโตซานทำให้ถ่าน CH-SAC มี t_c สูงสุดประมาณ 120 นาที ซึ่งมากกว่า SAC ที่มี t_c สูงสุดประมาณ 5 นาที ซึ่งค่า t_c ไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับว่ามากหรือน้อยแต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางดูดซับนั้นว่าดูดได้เร็วหรือช้า ดังนั้นจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า SAC ดูดซับสี RB 5 ได้เร็วกว่า CH-SAC เนื่องจาก SAC มีพื้นที่ผิวมากกว่า CH-SAC ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ ประกอบกับมีปริมาตรโพรงสูงทำให้เกิดแรงดึงดูดอนุภาคเข้าสู่รูขนาดเล็ก (Capillary force) ในขณะที่ CH-SAC มีเพียงแรงดึงดูดของประจุบวกจากหมู่อะมิโนในไคโตซานที่ปกคลุมผิวตัวกลางดูดซับ ซึ่งอัตราการเร็วในดูดซึมของสีเข้าไปในชั้นไคโตซานดำเนินไปโดยมีระยะเวลาเท่าๆ กันทำให้ t_c ที่ได้แต่ละพีเอช มีค่า t_c ไม่ต่างกัน

- ผลจากการเคลือบไคโตซานบนถ่านที่ CH-PAC ที่มีต่อ t_c พบว่าถ่าน CH-PAC มีค่า t_c สูงสุดประมาณ 180 นาที ในขณะที่จากเดิม PAC มีค่า t_c สูงสุดประมาณ 240 นาที เนื่องจากการเคลือบไคโตซานส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของ CH-PAC ลดลงจาก PAC เพียงเล็กน้อย และยังมีปริมาตรโพรงที่สูงพอที่จะเกิด Capillary force ดังนั้นค่า t_c ของถ่านทั้งสองชนิดจึงไม่ต่างกันมากเนื่องจากมีอัตราเร็วการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดดังกล่าวมาข้างต้นที่ไม่ต่างกัน ซึ่งจากพื้นที่ผิวของ CH-PAC ที่น้อยกว่า PAC ทำให้ความจุในการดูดซับสี RB 5 ของ CH-PAC หดลงเร็ว ส่งผลให้ t_c ของ CH-PAC น้อยกว่า PAC เล็กน้อย

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี RB 5 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (k_L) จากตารางที่ 4.2 ซึ่งได้มาจากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{d(C_t/C_0)}{dt} = -k_L a \quad (4.1)$$

หรือ

$$\text{Log}(C_t/C_0) = -\frac{k_L a}{2.303} \cdot t \quad (4.2)$$

เมื่อ

$$a = \frac{\text{พื้นที่ผิวภายนอก}(m^2/g) \cdot \text{ปริมาณถ่านกัมมันต์}(g)}{1 \text{ ลิตรน้ำเสีย (l)}}$$

สัดส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ SAC และ CH-SAC = 0.8 g/l ของน้ำเสีย
 สัดส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ SAC และ CH-SAC = 0.35 g/l ของน้ำเสีย

และจากการศึกษาอันดับปฏิกิริยาจากปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

$$\log(C) = \log C_0 - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4.3)$$

สมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

$$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

ตัวกลางดูดซับ	Pseudo First-order		Pseudo Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		k _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC							
5	-7.0x10 ⁻³	0.113	2.0x10 ⁻⁵	0.636	1.0x10 ⁻⁵	0.153	0.049
7	-6.0x10 ⁻³	0.075	1.0x10 ⁻⁵	0.646	2.0x10 ⁻⁵	0.177	0.057
9	-6.0x10 ⁻³	0.058	7.0x10 ⁻⁶	0.674	2.0x10 ⁻⁵	0.183	0.059
CH - SAC							
5	-4.1x10 ⁻³	0.732	3.0x10 ⁻⁴	0.846	3.0x10 ⁻⁴	0.140	0.236
7	-7.1x10 ⁻³	0.624	8.0x10 ⁻⁵	0.764	8.0x10 ⁻⁵	0.088	0.147
9	-8.0x10 ⁻⁴	0.672	3.0x10 ⁻⁵	0.803	3.0x10 ⁻⁵	0.041	0.070
PAC							
5	-5.0x10 ⁻⁴	0.643	7.0x10 ⁻⁶	0.846	7.0x10 ⁻⁶	0.049	0.020
7	-1.1x10 ⁻³	0.737	2.0x10 ⁻⁵	0.842	2.0x10 ⁻⁵	0.055	0.023
9	-1.2x10 ⁻³	0.736	2.0x10 ⁻⁵	0.854	2.0x10 ⁻⁵	0.073	0.030
CH - PAC							
5	-4.0x10 ⁻⁴	0.557	1.0x10 ⁻⁵	0.714	5.0x10 ⁻⁶	0.047	0.023
7	-8.0x10 ⁻⁴	0.617	1.0x10 ⁻⁵	0.792	1.0x10 ⁻⁵	0.070	0.034
9	-7.0x10 ⁻⁴	0.683	5.0x10 ⁻⁶	0.749	1.0x10 ⁻⁵	0.063	0.030

จากผลการศึกษาอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.2 อธิบายได้ดังนี้

- จากค่า k_La เป็นความเร็วในการดูดซับที่ช่วงเวลาเริ่มต้นซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 0- 5 นาที จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า SAC มีค่า k_La

อยู่ในช่วง $0.153-0.183 \text{ min}^{-1}$ ซึ่งมากกว่า CH-SAC ที่มีค่า k_{La} อยู่ในช่วง $0.047-0.070 \text{ min}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าถ่าน SAC มีความเร็วในการดูดซับสูงกว่า CH-SAC ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นดังรูปที่ 4.6 โดยปัจจัยทางจลนศาสตร์นี้สามารถใช้ทำนายเบรคทรู (Breakthrough) ของการทดลองระบบคอลัมน์ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ได้ ซึ่งจะเห็นว่า SAC มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในระบบการดูดซับแบบไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง (Continuous flow) ที่ใช้เวลาสัมผัสสั้น ในขณะที่ CH-PAC มีค่า k_{La} อยู่ในช่วง $0.047-0.070 \text{ min}^{-1}$ ซึ่งไม่ต่างจาก PAC ที่มีค่าอยู่ในช่วง $0.049-0.073 \text{ min}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการดูดซับของถ่านทั้งสองชนิดไม่ต่างกัน

- จากค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าข้อมูลจากการทดลองเข้ากับสมการแบบใด โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดแสดงว่าการดูดซับที่ RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ในขณะที่หากเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือนนั้นการแพร่ผ่านฟิล์มรอบตัวกลางดูดซับเป็นตัวควบคุมการดูดซับโดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (Zhang and Bai, 2003)

- จากค่า k ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนซึ่งบ่งบอกถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นสีย้อมซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วย โดยจากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่ออัตราการดูดซับที่ RB 5 ของถ่าน SAC เพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และ Capillary force เป็นหลักซึ่งประจุบนพื้นผิวที่เหมาะสมจะเป็นตัวชักนำให้อนุภาคสีให้มีโอกาสสัมผัสเคลื่อนที่มาสัมผัสฟิล์มตัวกลางดูดซับมากขึ้นแต่ RB 5 จากมวลโมเลกุลที่สูงบ่งบอกถึงขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ทำให้การเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนเกิดได้ยากส่งผลให้ความจุถูกจำกัด ถึงแม้จะมีแรงดึงดูดมาก

- สำหรับถ่าน CH-SAC พบว่าค่า k มีค่าลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นซึ่งบ่งบอกว่าอัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำสอดคล้องกับแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นจากประจุบวกของตัวกลางดูดซับที่เพิ่มขึ้นและประจุลบของสี RB 5 ทั้งนี้เนื่องจาก CH-SAC มีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อยประกอบกับข้อมูลวิเคราะห์พื้นที่ผิวซึ่งมีพื้นที่ผิวภายนอกเท่ากับพื้นที่ผิวภายในแสดงว่าถูกปกคลุมด้วยไคโตซาน ดังนั้นแรงดึงดูดที่ทำให้เกิดดูดซับของ CH-SAC จึงเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุเป็นหลักซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ย่อมมีผลต่ออัตราการดูดซับอย่างแน่นอน

- สำหรับ PAC เป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับได้ชัดเจนเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป ซึ่งจากค่า k เพิ่มขึ้นจาก $7 \times 10^{-6} \text{ L/mg.min}$ ที่พีเอช 5 และเป็น $2 \times 10^{-5} \text{ L/mg.min}$ ที่พีเอช 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากที่พีเอช 5 น้ำแตกตัวให้ H^+ มากซึ่งจะไปจับเกาะกับพื้นผิวตัวกลางดูดซับซึ่งมีหมู่ Carboxyl และ phenol ของพื้นผิว PAC ได้ดี รวมทั้งไฮโดรเนียม (H_3O^+) ไลออนจากน้ำที่มีมากในสามารถละลายที่

มีสถานะเป็นกรดจะล้อมรอบสี RB 5 ที่มีประจุลบซึ่งเป็นการขัดขวางการสัมผัสกันระหว่างสีและตัวกลางดูดซับ ในขณะที่เมื่อพีเอชสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนลดน้อยลงซึ่งจากค่า pH_{zpc} ที่มีค่าเท่ากับ 7.3 บ่งบอกว่าที่พีเอช 5 เกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากกว่าพีเอช 7 และเกิดน้อยที่สุดที่พีเอช 9 นอกจากนี้สี RB 5 จะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) กับหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีบนถ่านทั้ง 4 ชนิด (วราญา ประทุมแก้ว, 2543) ดังนั้นที่พีเอช 9 จึงมีอัตราการดูดซับสูงที่สุด

- สำหรับ CH-PAC ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า PAC เพียงเล็กน้อยทำให้ผลการศึกษาไม่ต่างกันรวมทั้งมี pH_{zpc} ที่มีค่าเท่ากับ 6.9 ดังนั้นผลกระทบจากพันธะไฮโดรเจนจึงเกิดที่พีเอช 5 เท่านั้น ในขณะที่พีเอช 7 และพีเอช 9 มีอัตราการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับค่า k ที่พีเอช 5 เท่ากับ 5×10^{-6} L/mg.min ในขณะที่พีเอช 7 และ พีเอช 9 มีค่าเท่ากับ 1×10^{-5}

- จากค่า k_L ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของตัวกลางดูดซับโดยคิดเทียบกับหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่า k_L ของ SAC มีค่าอยู่ในช่วง 0.049-0.059 L/m².hr ซึ่งมีค่าน้อยกว่า CH-SAC มีค่าอยู่ในช่วง 0.070-0.236 L/m².hr แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่เท่ากัน CH-SAC มีความชอบที่จะดูดซับสี RB 5 มากกว่า ในขณะที่ PAC และ CH-PAC มีค่า k ไม่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองใช้น้ำหนักตัวกลางดูดซับเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อความสะดวก

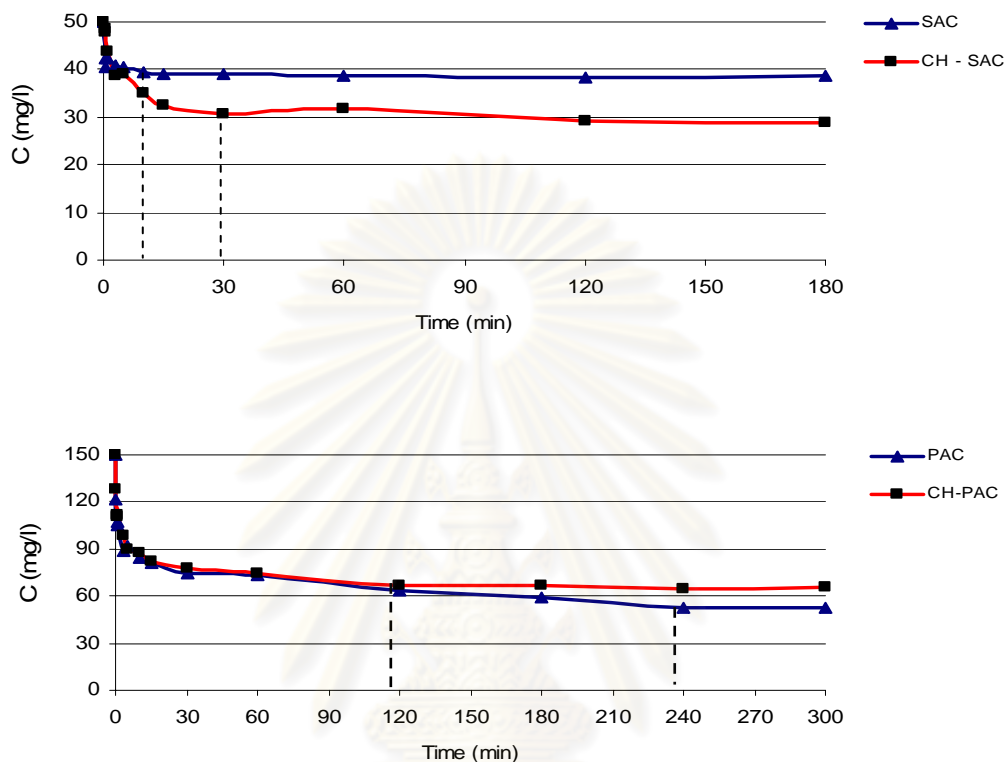
จากผลการเคลือบไคโตซานที่มีต่ออัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสี BY 1 ดังรูปที่ 4.7 อธิบายได้ดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่มีผลต่อ t_c ของถ่าน SAC ที่มี t_c สูงสุดประมาณ 10 นาที และ CH-SAC ที่มี t_c สูงสุดประมาณ 30 นาที ซึ่งจะเห็นว่า CH-SAC มีค่า t_c สูงสุดที่น้อยกว่าสี RB 5 ซึ่งมีค่า 120 นาที เนื่องจากสี BY 5 มีมวลโมเลกุลที่น้อยกว่าสี RB 5 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ามีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าซึ่งทำให้การแทรกซึมเข้าสู่ชั้นไคโตซานใน CH-SAC เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าทำให้ t_c สั้นกว่า

- การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ไม่มีผลต่อ t_c ของถ่าน PAC ที่มี t_c สูงสุดประมาณ 240 นาที ที่พีเอช 5 และลดลงมาเป็น 180 นาที ที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ซึ่งถือว่าแตกต่างกันเล็กน้อยและไม่มีความสำคัญและเมื่อเปรียบเทียบกับสี RB 5 แล้วมี t_c ไม่ต่างกันเนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และ Capillary force เป็นหลักเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในกรณีการดูดซับสี RB 5

- ที่พีเอช 5 และพีเอช 7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่มีผลต่อ t_c ของถ่าน CH-PAC ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านด้วยเวลาคงที่ ในขณะที่พีเอช 9 พบว่ามี t_c ลดลงเป็น 30 นาที

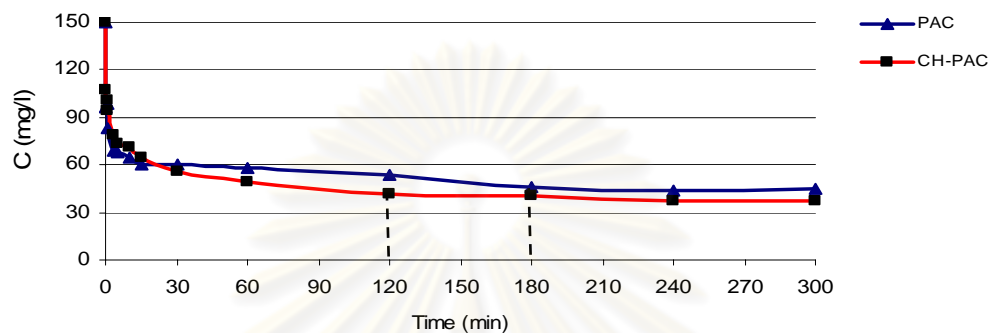
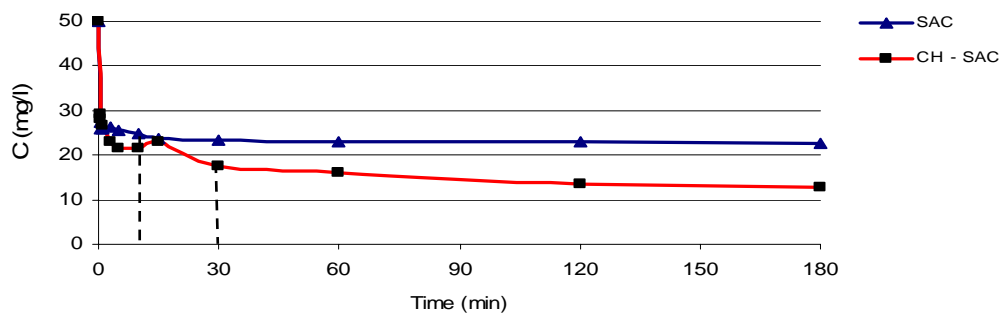
ทั้งนี้เนื่องจาก pH_{ZPC} ของ CH-PAC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.9 ดังนั้นที่พีเอช 9 จะเพิ่มประจุลบบนพื้นผิวเป็นการเพิ่มแรงดึงดูดในการดูดซับสี BY 1 ในขณะที่ความจุมิจำกัดจึงส่งผลให้การดูดซับถึงจุดสมดุลเร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่า t_c ที่ลดลง



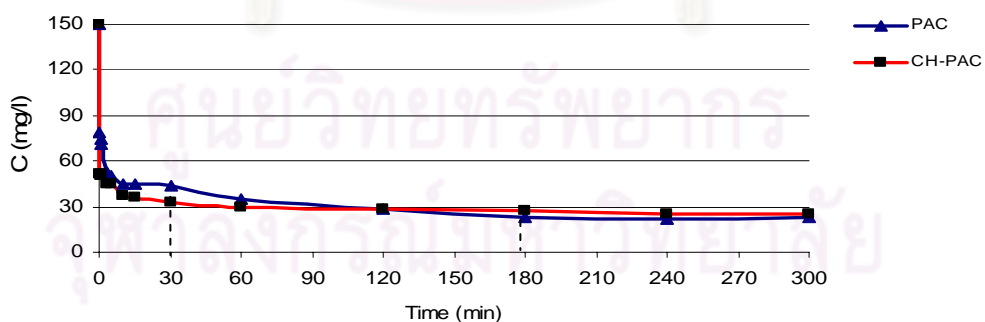
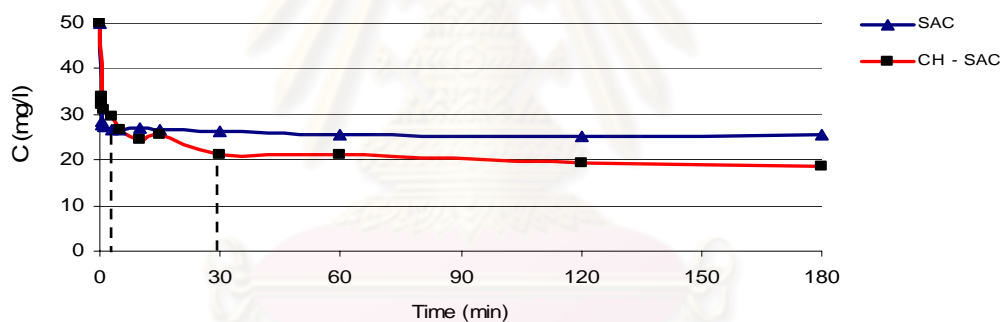
(ก) พีเอช 5

รูปที่ 4.7 จลนศาสตร์การดูดซับสี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25°C กวนด้วย ความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) พีเอช 7



(ค) พีเอช 9

รูปที่ 4.7 (ต่อ) จลนศาสตร์การดูดซับสปี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

ตัวกลางดูดซับ	Pseudo First-order		Pseudo Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร		
	slope	R ²	slope	R ²		k _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)	
SAC	5	-4.0x10 ⁻⁴	0.235	1.0x10 ⁻⁵	0.465	1.0x10 ⁻⁵	0.056	0.018
	7	-1.0x10 ⁻³	0.155	3.0x10 ⁻⁵	0.578	3.0x10 ⁻⁵	0.180	0.058
	9	-7.0x10 ⁻⁴	0.108	2.0x10 ⁻⁵	0.598	2.0x10 ⁻⁵	0.172	0.056
CH - SAC	5	-1.6x10 ⁻³	0.512	7.0x10 ⁻⁵	0.563	7.0x10 ⁻⁵	0.062	0.104
	7	-3.0x10 ⁻³	0.545	2.0x10 ⁻⁴	0.871	2.0x10 ⁻⁴	0.215	0.360
	9	-2.1x10 ⁻³	0.467	1.0x10 ⁻⁴	0.733	1.0x10 ⁻⁴	0.157	0.263
PAC	5	-1.3x10 ⁻³	0.668	3.0x10 ⁻⁵	0.873	3.0x10 ⁻⁵	0.130	0.054
	7	-1.3x10 ⁻³	0.504	4.0x10 ⁻⁵	0.776	4.0x10 ⁻⁵	0.204	0.084
	9	-2.3x10 ⁻³	0.632	1.0x10 ⁻⁴	0.882	1.0x10 ⁻⁴	0.279	0.115
CH - PAC	5	-1.1x10 ⁻³	0.547	2.0x10 ⁻⁵	0.680	2.0x10 ⁻⁵	0.123	0.059
	7	-1.9x10 ⁻³	0.644	6.0x10 ⁻⁵	0.818	5.0x10 ⁻⁵	0.178	0.086
	9	-1.5x10 ⁻³	0.364	6.0x10 ⁻⁵	0.754	6.0x10 ⁻⁵	0.325	0.157

จากผลการศึกษาระดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ดังตารางที่ 4.3 อธิบายได้ดังนี้

- จากค่า k_La พบว่าที่พีเอช 5 และพีเอช 7 ถ่าน SAC มีค่า k_La เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับประจุลบบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้มีแรงดึงดูดมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.056-0.180 min⁻¹ ซึ่งน้อยกว่า CH-SAC ที่มีค่า k_La อยู่ในช่วง 0.062-0.215 min⁻¹ แสดงให้เห็นว่า ถ่าน CH-SAC มีความเร็วในการดูดซับสี BY 1 สูงกว่า SAC เนื่องจากการแทรกซึมของ BY 1 ที่มีขนาดเล็กเข้าไปในชั้นโกลโคซานของ CH-SAC เกิดได้ง่ายขึ้น ในขณะที่พีเอช 9 พบว่า k_La ของ CH-SAC มีค่า 0.157 min⁻¹ ซึ่งน้อยกว่าที่พีเอช 9 ที่มีค่า 0.215 min⁻¹ เนื่องจากที่สภาพความเป็นด่างสูงการแตกตัวให้ OH⁻ ของน้ำมากขึ้นเกิดการล้อมรอบอนุภาคสี BY 1 ซึ่งมีประจุบวกซึ่งเป็นการขัดขวางการสัมผัสกันระหว่างสีกับพื้นผิวตัวกลางดูดซับ แต่กรณี CH-PAC และ PAC พบว่า k_La ที่พีเอช 7 น้อยกว่า พีเอช 9 ซึ่งแตกต่างจาก SAC และ CH-SAC ที่มี k_La ที่พีเอช 7 มากกว่าพีเอช 9 เนื่องจาก CH-PAC และ PAC เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีแรงแวนเดอร์วาลส์และ Capillary force ที่สูง ซึ่งยึดยั้งได้จากพื้นที่ผิวทั้งหมดและพื้นที่ผิวภายในที่สูงซึ่งแรงดึงดูดทั้งสองนี้จะช่วยลดผลกระทบจากการถูกขัดขวางด้วยผลกระทบอื่น ๆ ที่มีต่อการดูดซับได้

- จากค่า k_La ของ PAC ที่เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช ซึ่งเท่ากับ 0.130 min⁻¹ ที่พีเอช 5 และเท่ากับ 0.279 min⁻¹ ที่พีเอช 9 เนื่องจากแรงดึงดูดจากประจุลบที่เพิ่มขึ้น ส่วน CH-PAC มีค่า k_La ที่พีเอช 5 และพีเอช 7 มีค่าน้อยกว่า PAC เล็กน้อยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงที่น้อยกว่า ในขณะที่ CH-PAC ที่พีเอช 9 ซึ่งมีความเป็นด่างหรือ OH⁻ สูงจะเสริมให้หมู่ฟังก์ชันของ

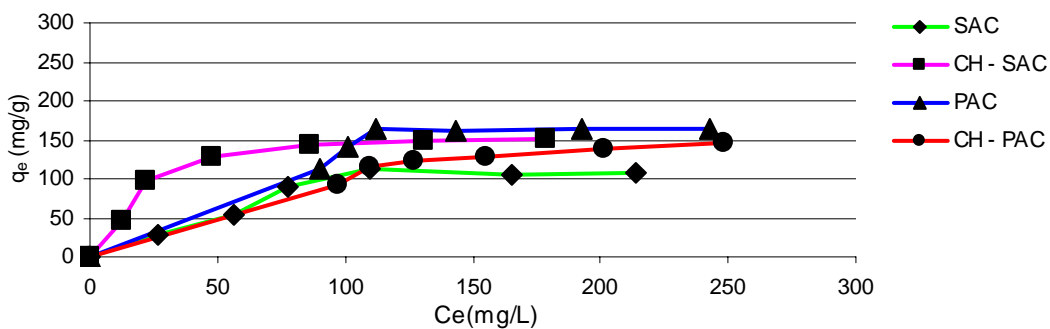
OH- Stretching ที่มาจากหมู่แอลกอฮอล์ ในไคโตซานเด่นขึ้นมาเกิดแรงดึงดูด BY 1 เพิ่มขึ้นจากแรง แวนเดอร์วาลส์และ Capillary force ทำให้ CH-PAC ที่พีเอช 9 มี k_{La} เท่ากับ 0.325 min^{-1} ซึ่งมากกว่า PAC ที่มี k_{La} เท่ากับ 0.279 min^{-1} บ่งบอกว่า CH-PAC ดูดได้เร็วกว่า PAC

- จากค่า R^2 พบว่าการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเหมือนกรณี RB 5 ซึ่งจากค่า k พบว่าอัตราการดูดซับสี BY 1 ของถ่าน SAC ที่พีเอช 7 > พีเอช 9 > พีเอช 5 โดยที่พีเอช 7 > พีเอช 5 เนื่องจากประจุลบบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงดึงดูดจากประจุต่อสี BY 1 มากขึ้น ส่วนที่พีเอช 7 > พีเอช 9 ซึ่งอธิบายได้ทำนองเดียวกันกับกรณี k_{La} ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

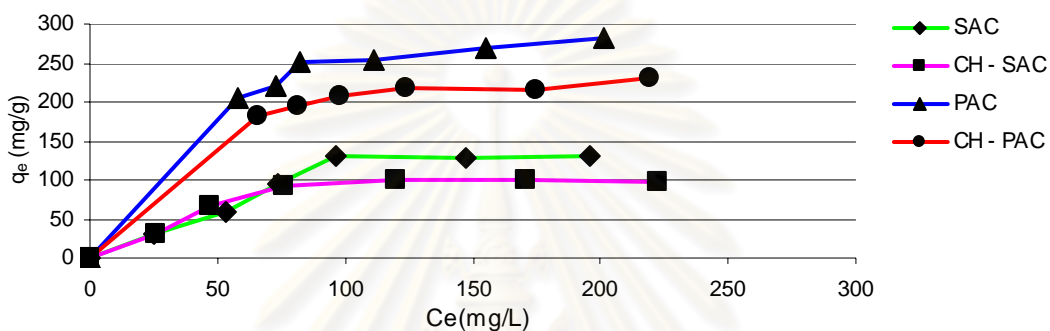
- จากค่า k_L ของการดูดซับ BY 1 จะเห็นว่า k_L ของ SAC มีค่าอยู่ในช่วง $0.018-0.058 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ ซึ่งมีย่านน้อยกว่า CH-SAC ที่มีค่าอยู่ในช่วง $0.104-0.360 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ และมากกว่ากรณีสี RB 5 ที่มีค่าในช่วง $0.070-0.236 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ สอดคล้องกับขนาดอนุภาคสี BY 1 ที่เล็กกว่า RB 5 ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารง่ายกว่า นอกจากนี้ CH-SAC ยังคงมีความชอบที่จะดูดซับสี BY 1 มากกว่า SAC ในขณะที่พีเอช 5 และพีเอช 7 ถ่าน PAC และ CH-PAC มีค่า k ไม่แตกต่างกันเพราะดูดซับด้วยแรงประเภทเดียวกัน ในขณะที่พีเอช 9 ถ่าน CH-PAC มีแรงดึงดูดจากหมู่ OH^- บนพื้นผิวไคโตซานทำให้ความชอบในการดูดสี BY 1 สูงกว่า PAC

4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

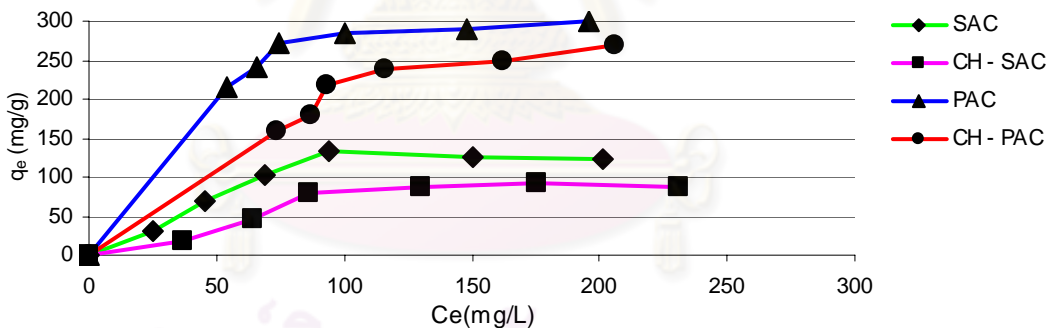
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ภายใต้อุณหภูมิ 25°C และควบคุมค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และพีเอช 9 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ กันคือ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 mg/L สำหรับ SAC และ CH-SAC โดยกำหนดให้มีเวลาสมดุลการดูดซับ 180 นาที และที่ความเข้มข้น 130, 150, 180, 210, 250 และ 300 mg/L สำหรับ PAC และ CH-PAC โดยมีเวลาสมดุลการดูดซับ 300 นาที สำหรับซึ่งผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 และสี BY 1 แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



(ก)พีเอช 5



(ข)พีเอช 7



(ค)พีเอช 9

รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับสี่ RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 7 (ค) พีเอช 9

จากผลการไอโซเทอมการดูดซับสี่ RB 5 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดดังรูปที่ 4.8 อธิบายได้ดังนี้

- จากผลการเคลือบผิวถ่านด้วยไคโตซานที่มีต่อปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่านกัมมันต์ที่สมดุล (q_e) พบว่าที่พีเอช 5 ถ่าน CH-SAC มี q_e สูงกว่า SAC ทุกความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ที่

ต่างกันซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่าสภาพแวดล้อมที่เป็นกรคน้ำแตกตัวให้ H_3O^+ มากซึ่งจะไปจับกับหมู่ OH ในไลโคซานทำให้การทำงานของประจุบวกในไลโคซานเด่นขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่าพีเอช 7 และพีเอช 9 โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารในสองบริเวณ (Concentration gradient, ΔC) เป็นแรงกระทำให้เกิดการเคลื่อนตัว (Driving force) ของอนุภาคเข้าสู่รูพรุนหรือพื้นผิวมีผลให้การซึมผ่านชั้นฟิล์มไลโคซานได้มากขึ้นและเข้าสู่สมดุลที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งบ่งบอกถึงความจุในการดูดซับ

- การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชส่งผลให้ q_c ของถ่าน SAC, PAC และ CH-PAC เพิ่มขึ้นซึ่งโดยจากผลการทดลองที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ของถ่าน CH-SAC มี q_c ต่ำกว่า SAC เพราะแรงผลักจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นทำให้การดูดซับสี RB 5 ลดลง ในขณะที่ SAC มีค่า q_c เพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับ PAC และ CH-PAC เนื่องจากผลพันธะไฮโดรเจนที่ลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าผลจาก pH_{zpc} รวมทั้งพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นที่พีเอช 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากลศาสตร์การดูดซับ

- เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวพบว่า $PAC > CH-PAC > SAC$ ซึ่งพื้นที่ผิวบ่งบอกถึงความจุในการดูดซับสีดังนั้นจึงมีผลต่อค่า q_c โดยจากผลการทดลองจะพบว่า q_c ของ $PAC > CH-PAC > SAC$ ซึ่งสอดคล้องกันกับพื้นที่ผิว ซึ่งที่พีเอช 9 จะพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ 4 จุดแรกมีความแตกต่างระหว่าง q_c ของ PAC และ CH-PAC มากขึ้นเนื่องจาก ΔC ของระบบยังต่ำอยู่ซึ่งทำให้ผลจากพื้นที่ผิวและปริมาตรที่ลดลงกว่า PAC มีต่อการดูดซับแต่เมื่อค่าพีเอช สูงขึ้น ΔC ส่งผลให้ PAC และ CH-PAC มี q_c ที่ใกล้เคียงกันเพราะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ใกล้เคียงกัน

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตามแบบจำลองของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

Langmuir Isotherm

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{bq_m}\right)\left(\frac{1}{C_e}\right) \quad (4.5)$$

Freundlich Isotherm

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ของตัวกลางดูดซับในการดูดซับสี RB 5 ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และพีเอช 9 ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C และกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

ตัวกลางดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	b (L/mg)	R ²	K (mg/g)	1/n (L/g)	R ²
SAC	5	107.44	0.963	3.994	0.657	0.841
	7	130.02	0.973	3.186	0.748	0.880
	9	123.73	0.932	5.091	0.653	0.798
CH - SAC	5	151.6	0.915	22.475	0.398	0.801
	7	97.13	0.905	7.842	0.507	0.755
	9	86.15	0.892	1.069	0.870	0.775
PAC	5	162.86	0.563	41.352	0.261	0.472
	7	282.46	0.919	82.186	0.237	0.879
	9	298.76	0.865	95.543	0.224	0.775
CH - PAC	5	146.80	0.843	16.504	0.402	0.828
	7	230.69	0.923	93.154	0.168	0.871
	9	269.31	0.865	23.939	0.464	0.824

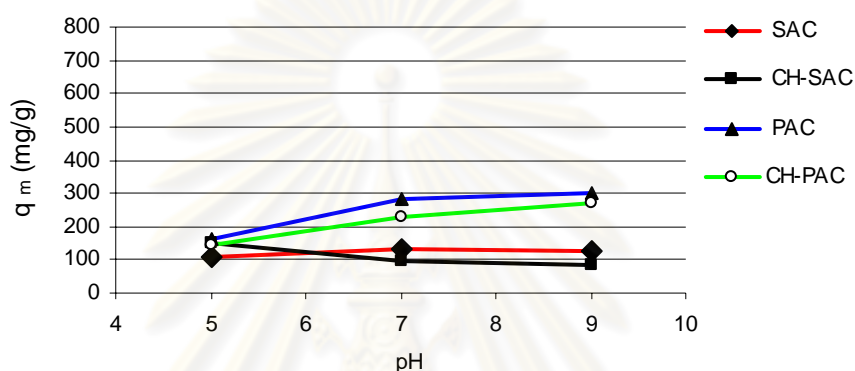
จากผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.4 อธิบายได้ดังนี้

- จากข้อมูลค่า R² ในตารางพบว่าสมการ Langmuir Isotherm จะให้ค่า R² ที่สูงกว่า Freundlich Isotherm แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมีโดยสีย้อมจะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันและมีลักษณะการดูดซับอนุภาคสีย้อมแบบเรียงตัวชั้นเดียว โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ในการดูดซับสีย้อมที่แน่นอนจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งโมเลกุลของสีย้อมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว ในขณะที่ถ้าเป็น Freundlich Isotherm ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพรวมทั้งมีลักษณะการดูดซับอนุภาคสีย้อมแบบหลายชั้น ซึ่งจากค่าคงที่ที่ได้จาก Freundlich Isotherm ได้แก่ค่า K เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ ถ้า K มีค่าสูงแสดงว่าตัวกลางดูดซับมีประสิทธิภาพสูง ส่วน 1/n บ่งบอกความจุในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ ถ้า 1/n มีค่ามากแสดงว่าความจุในการดูดซับของตัวกลางดูดซับจะมีค่าสูง (ชนิสสา, 2548)

- จากค่าคงที่สมการ Langmuir Isotherm ทำให้ทราบปริมาณสี RB 5 ที่สามารถดูดซับได้มากที่สุดต่อถ่านกัมมันต์ 1 กรัม (q_m) จากค่า q_m ซึ่งจากตารางเมื่อพิจารณาจาก q_m แล้วพบว่าถ่านทั้ง 4 ชนิดมีการดูดซับสี RB5 ได้มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นเนื่องจากที่พีเอชต่ำมีโอกาสเกิดผลกระทบบจากการที่สี RB 5 จะถูกล้อมรอบด้วย H₃O⁺ ซึ่งขัดขวางการดูดซับ ยกเว้นกรณี CH-SAC ที่พีเอช 5 เนื่องจากโคโคซานที่เคลือบผิวมีปริมาณมาก ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของโคโคซานต่อสี RB 5 ที่พีเอช 5 ซึ่งเพิ่มความเป็นบวกแก่พื้นผิวจึงมีค่าสูงและส่งผลให้เกิดการกำจัดสี

RB 5 ได้ดี ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับสี RB 5 ของ PAC ที่มีค่าในช่วง 162.86 -298.76 mg/g และ CH-PAC มีค่าในช่วง 146.80-269.31 mg/g ซึ่งไม่ต่างกันมากเนื่องจากไคโตซานที่เคลือบติดผิว CH-PAC มีเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลต่อการดูดซับแต่ทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมลดลงซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของ CH-PAC น้อยกว่า PAC

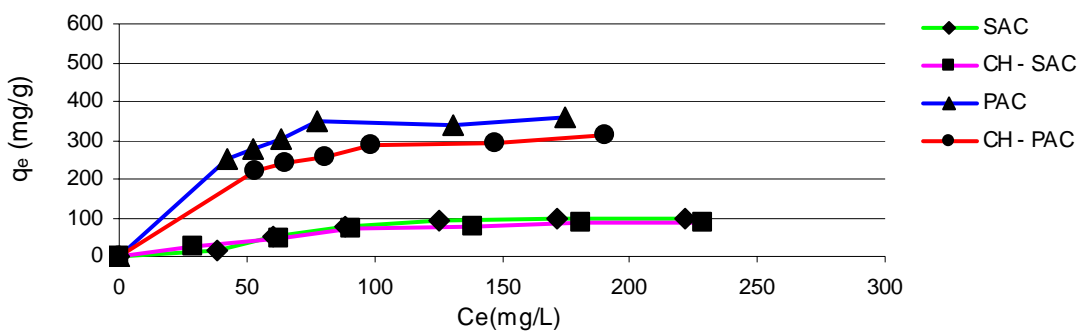
ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี RB5 โดยพิจารณาจาก q_m สรุปได้ดังรูปที่ 4.9



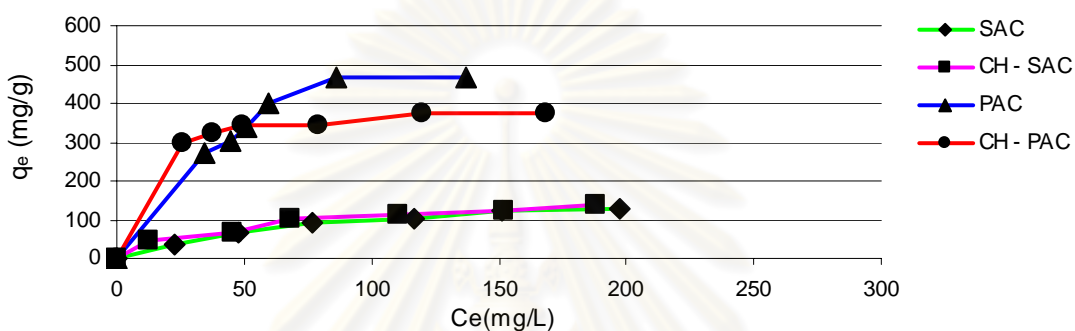
รูปที่ 4.9 ผลกระทบจากค่าพีเอช (pH) ต่อการดูดซับสี RB 5 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชต่อการดูดซับสี RB 5 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังนี้

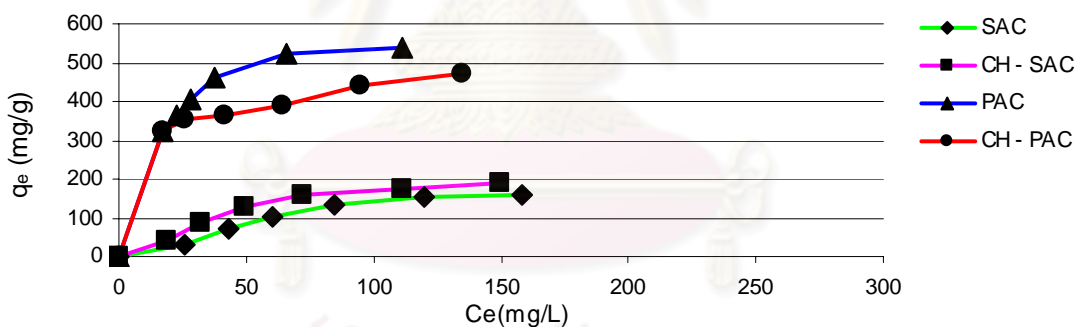
- ถ่าน SAC, PAC และ CH-PAC มีความสามารถในการดูดซับสี RB 5 เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนที่ลดลงและพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น
- CH-SAC มีความสามารถในการดูดซับสี RB 5 ลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นเพราะแรงผลักจากประจุลบที่เพิ่มขึ้นและประจุลบจากหมู่ไฮดรอกซิลที่มากกว่าแรงดึงดูดประจุลบของหมู่อะมิโนในไคโตซาน
- การดูดซับสี RB 5 เกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 9 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจากกระบวนการย้อมจริงที่มีความเป็นด่าง (วิมลรัตน์, 2550)



(ก) ฟีเอช 5



(ข) ฟีเอช 7



(ค) ฟีเอช 9

รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับสีย BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (ก) ฟีเอช 5 (ข) ฟีเอช 7 (ค) ฟีเอช 9

จากผลการไอโซเทอมการดูดซับสีย BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดดังรูปที่ 4.10 อธิบายได้ดังนี้

- จากผลการศึกษาการดูดซับสีย BY1 ที่สมมูลพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าฟีเอชมีผลต่อค่า q_m ในการดูดซับสีย BY 1 สูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BY 1 เป็นสียที่มีประจุบวกดังนั้นสถานะแวดล้อมที่มีค่าฟีเอชสูงขึ้นจะเพิ่มประจุลบบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับส่งผลให้การดูดซับสีย BY 1 สูงขึ้น

- เนื่องจากสี BY 1 เป็นสีที่มีมวลโมเลกุลที่น้อยกว่า RB5 ซึ่งแสดงว่ามีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของ BY 1 จึงเกิดขึ้นได้สูงทำให้ PAC ซึ่งมีปริมาตรโพรง และพื้นที่ผิวทั้งหมดสูงกว่า CH-PAC ส่งผลให้ PAC มีความสามารถในการดูดซับได้มากกว่า CH-PAC อย่างเห็นได้ชัด
- ถ่าน CH-SAC ที่พีเอช 9 ให้ผลการดูดซับสี BY 1 มากกว่าถ่าน SAC เล็กน้อยเนื่องจากขนาดอนุภาคสีที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเข้าไปในชั้นฟิล์มโคโคซานได้ง่ายรวมทั้งประจุลบที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นทำให้เกิดการดูดซับสี BY 1 ซึ่งมีประจุบวกได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ของตัวกลางดูดซับในการดูดซับสี BY 1 ที่พีเอช 5 พีเอช 7 และพีเอช 9 ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C และกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

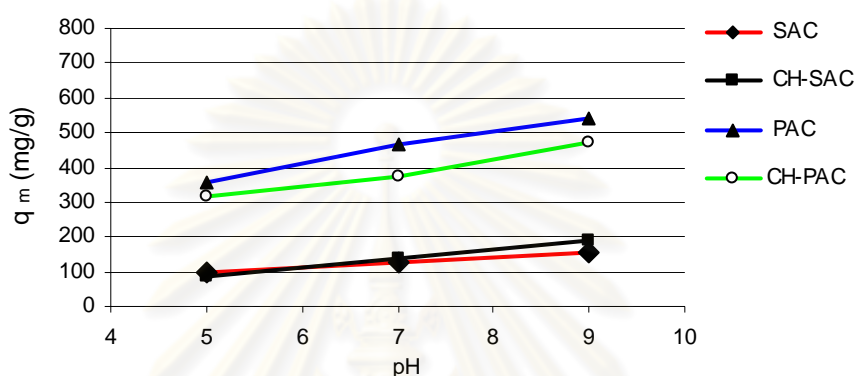
ตัวกลางดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	b	R ²	K(mg/g)	1/n	R ²
SAC						
5	97.60	0.063	0.983	0.559	1.017	0.964
7	128.23	0.009	0.996	5.574	0.615	0.964
9	157.70	0.025	0.941	2.201	0.889	0.901
CH - SAC						
5	88.85	0.012	0.983	3.956	0.597	0.922
7	140.41	0.011	0.974	15.856	0.415	0.968
9	187.98	0.038	0.947	6.283	0.717	0.887
PAC						
5	357.14	0.050	0.873	116.145	0.225	0.758
7	464.46	0.018	0.932	65.283	0.419	0.851
9	538.63	0.057	0.984	155.597	0.279	0.907
CH - PAC						
5	313.81	0.029	0.965	79.268	0.267	0.919
7	375.82	0.121	0.965	207.683	0.119	0.927
9	471.84	0.100	0.962	195.704	0.175	0.955

จากผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี BY 1 ดังตารางที่ 4.5 อธิบายได้ดังนี้

- จากค่า R² พบว่าการดูดซับสี BY 1 เป็นไปตามสมการ Langmuir Isotherm โดยจากค่า q_m พบว่าถ่าน CH-SAC มีความสามารถในการดูดซับสี BY 1 ในช่วง 88.85-187.98 mg/g ซึ่งมากกว่า SAC ที่มีค่า q_m ในช่วง 97.60-157.70 mg/g เนื่องจากโคโคซานมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับประจุบวกของ BY 1 ได้ดีและเมื่อค่าพีเอชของระบบเท่ากับ 7 และ 9 ซึ่งมากกว่า pH_{ZPC} ถ่าน CH-SAC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.7 ทำให้มีประจุลบเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวส่งผลให้ความสามารถในการกำจัด BY 1 สูงขึ้น
- PAC มีค่า q_m ในช่วง 357.14-538.63 mg/g ซึ่งสูงกว่า CH-PAC ที่มีค่า q_m ในช่วง 313.81-471.84 mg/g เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวทั้งหมดและปริมาตร โพรงที่สูงกว่า CH-PAC รวมทั้ง

ขนาดอนุภาคสี BY 1 ที่มีขนาดเล็กทำให้การดูดซับบน PAC เกิดขึ้นได้ง่ายซึ่งยืนยันได้จาก q_m ของ BY 1 ที่มีมวลโมเลกุล 318.86 g/mol มีแนวโน้มที่มากกว่า q_m ของสี RB 5 ซึ่งมีมวลโมเลกุล 991.82 g/mol

จากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี BY 1 โดยพิจารณาจาก q_m สรุปได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลกระทบจากค่าพีเอช (pH) ต่อการดูดซับสี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ชนิด SAC, CH-SAC, PAC และ CH-PAC ภายใต้อุณหภูมิ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm

จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชต่อการดูดซับสี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดสรุปได้ดังนี้

- ถ่านทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับสี BY 1 เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการที่สี BY 1 มีขนาดอนุภาคที่เล็กและที่ค่าพีเอชสูงกว่า pH_{ZPC} ของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มประจุลบบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับทำให้มีการดูดซับประจุลบได้ดีขึ้นในขณะที่พีเอชมีค่าต่ำยังคงมีแรงแวนเดอร์วาลส์และ Capillary force หรือ Driving force ที่เกิดจาก ΔC ทำให้การดูดซับยังเกิดขึ้นได้

- จากผลการทดลองพบว่า q_m ของ SAC น้อยกว่า q_m ของ PAC และ CH-PAC อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากพื้นที่ผิวทั้งหมดและปริมาตรโพรงที่ของ PAC และ CH-PAC ที่มากกว่า SAC

- เมื่อเปรียบเทียบ q_m ของสี BY 1 มีค่ามากกว่า q_m ของสี RB 5 เพราะมวลโมเลกุลสี BY 1 ที่น้อยกว่า สี RB 5 ซึ่งบ่งบอกว่าอนุภาคสี BY 1 มีขนาดเล็กกว่า RB 5 ดังนั้นการแทรกตัวผ่านชั้นฟิล์มรอบผิวตัวกลางดูดซับและแทรกตัวเข้าสู่พรุนของสี BY 1 จึงเคลื่อนที่เข้าได้ดีและง่ายกว่าสี RB 5

4.4 ผลการศึกษาผลกระทบของการเติมอากาศต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การศึกษผลกระทบจากการเติมที่มีต่อการดูดซับสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ภายใต้ อุณหภูมิ 25 °C ที่สภาวะพีเอช 7 เนื่องจากเป็นค่าพีเอชตามธรรมชาติและควบคุมค่าความแรงของ ประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยผลการศึกษาแบ่งเป็น 3 หัวข้อดังนี้

4.4.1 ผลการศึกษาด้านผลของการเติมอากาศ

ผลการศึกษาผลกระทบจากการเติมที่มีต่อจลนศาสตร์การดูดซับ โดยเปรียบเทียบ ระหว่างการกวนผสมด้วยใบพัด (Mixing by stirrer) ด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และการกวนผสม ด้วยการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจน (Mixing by air and nitrogen gas) เพื่อให้ทราบถึงปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดขึ้นจากออกซิเจนรวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการกวนด้วยอัตราการไหลของก๊าซ (Qg) 0.6 L/min ซึ่งมีความปั่นป่วนเทียบเท่าความเร็วรอบ 200 rpm โดยคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดัง สมการ

จากสมการคำนวณพลังงานในรูปของความเร็วแกรเดียนท์(G) ของแคมท์และสไตน์

$$\text{ความปั่นป่วน (G)} = (P / \mu V)^{1/2} \quad (4.7)$$

เมื่อ

$$P = \text{พลังงานที่ใช้ (วัตต์)}$$

$$\mu = 0.00089 \text{ นิวตัน-วินาที / ม.}^2$$

$$V = 0.0005 \text{ ม.}^3$$

$$\text{โดย พลังงานจาก stirrer (p)} = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5 \quad (4.8)$$

เมื่อ

$$N_p = 1 \text{ ใบพัด}$$

$$\rho = 1000 \text{ กิโลกรัม / ม.}^3$$

$$n = 200 \text{ รอบ/วินาที}$$

$$D = 0.055 \text{ เมตร}$$

$$\text{และ พลังงานจากการเติมอากาศ } P = KQ_a \log ((h+10.33)/10.33) \quad (4.9)$$

$$K = \text{ค่าคงที่ในระบบ SI มีค่า 3904}$$

$$Q_a = \text{อัตราการไหลของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (ม.}^3\text{/นาที)}$$

$$h = 0.25 \text{ เมตร}$$

จากค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ได้จากผลการดูดซับสี RB 5 และ สี BY 1 แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C

ตัวกลางดูดซับ วิธีการผสม	Pseudo First-order		Pseudo Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท มวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		K _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC Stirrer Air N2	-6.0x10 ⁻³	0.075	1.0x10 ⁻⁵	0.646	2.0x10 ⁻⁵	0.177	0.057
	-1.0x10 ⁻³	0.188	5.0x10 ⁻⁶	0.192	5.0x10 ⁻⁶	0.026	0.009
	-7.0x10 ⁻⁵	0.073	4.0x10 ⁻⁶	0.076	4.0x10 ⁻⁶	0.032	0.010
CH - SAC Stirrer Air N2	-7.1x10 ⁻³	0.624	8.0x10 ⁻⁵	0.764	8.0x10 ⁻⁵	0.088	0.147
	-1.1x10 ⁻³	0.521	8.0x10 ⁻⁵	0.628	8.0x10 ⁻⁵	0.112	0.189
	-1.2x10 ⁻³	0.488	1.0x10 ⁻⁴	0.586	1.0x10 ⁻⁴	0.125	0.210
PAC Stirrer Air N2	-1.1x10 ⁻³	0.737	2.0x10 ⁻⁵	0.842	2.0x10 ⁻⁵	0.055	0.023
	-6.0x10 ⁻⁴	0.559	2.0x10 ⁻⁵	0.623	2.0x10 ⁻⁵	0.079	0.032
	-6.0x10 ⁻⁴	0.570	1.0x10 ⁻⁵	0.636	1.0x10 ⁻⁵	0.082	0.034
CH - PAC Stirrer Air N2	-8.0x10 ⁻⁴	0.617	1.0x10 ⁻⁵	0.792	1.0x10 ⁻⁵	0.070	0.034
	-4.0x10 ⁻⁴	0.608	7.0x10 ⁻⁶	0.648	7.0x10 ⁻⁶	0.051	0.024
	-3.0x10 ⁻⁴	0.558	6.0x10 ⁻⁶	0.599	6.0x10 ⁻⁶	0.047	0.023

จากค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.6 อธิบายได้ดังนี้

- จากค่า R² การดูดซับที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน เป็นการดูดซับทางเคมีซึ่งบ่งบอกว่าผลทางกายภาพที่เกิดจากการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนไม่ได้ส่งผลต่อการดูดซับ

- เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการดูดซับจากค่าคงที่ k_La และค่า k พบว่าการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนทำให้ถ่าน SAC มีค่า k_La และค่า k น้อยกว่าการกวนด้วย stirrer ซึ่งบ่งบอกว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ช้ากว่าและความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า เนื่องจาก SAC มีรูพรุนขนาดเล็กและความขรุขระบนพื้นผิวมากดังนั้นความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศรอบการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มรอบตัวกลางดูดซับของ RB 5 โดยแรงเฉือนที่เกิดจากฟองอากาศจะไปลดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างถ่านและสีข้อมซึ่งเป็นแรงประเภตรงแรงแวนเดอร์วาลส์ ในขณะที่ถ่าน CH-SAC มีการดูดซับสี RB 5 ที่ผิวของตัวกลางดูดซับซึ่งถูกปกคลุมด้วยไคโตซานที่สามารถเกาะจับอนุภาคได้ดี ดังนั้นการปั่นป่วนด้วยฟองอากาศซึ่งทำให้เกิดการกวนผสมแบบสมบูรณ์ (Completely mixing) ซึ่ง

ส่งผลให้เกิดการสัมผัสระหว่างพื้นผิวตัวกลางดูดซับและสี RB 5 ได้มากทำให้เกิดการกำจัดสี RB 5 ได้มากกว่ากวนด้วย stirrer ซึ่งสอดคล้องกับค่า k_{La} ของการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ $0.112 - 0.125 \text{ min}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จาก stirrer ซึ่งมี k_{La} เท่ากับ 0.088 min^{-1} แต่มีอัตราการดูดซับโดยรวมทั้งสามวิธีไม่ต่างกันซึ่งอยู่ในช่วง $8 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$ เนื่องจากอัตราการซึมผ่านไคโตซานที่ C_0 เท่ากันมีค่าคงที่

- ถ่าน PAC และ CH-PAC ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ต่างกันทำให้การเติมอากาศต่อถ่านทั้งสองชนิดให้ผลไม่ต่างกัน จากค่า k_{La} ในตารางที่ 4.6 พบว่าการเติมอากาศทำให้การเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก PAC เป็นถ่านที่มีขนาดรูพรุนที่เล็กและพื้นที่ผิวภายในรูพรุนที่สูงเมื่อเทียบกับถ่านชนิดอื่น ดังนั้นนอกจากแรงวนเคอร์วาลส์ที่ทำให้เกิดการดึงดูดแล้วยังมี Capillary force ในขณะที่ CH-PAC เนื่องจากมีไคโตซานที่เคลือบผิวเล็กน้อยซึ่งไม่ส่งผลต่อการดูดซับแต่ทำให้เกิดการอุดตันชะงักขวางการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุน หากเกิดความปั่นป่วนในระบบจะรบกวนการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนและชะงักขวางแรง Capillary force ที่จะดึงดูดสีเข้าสู่รูพรุนได้ซึ่งสอดคล้องกับค่า k ของ CH-PAC ที่มีค่า $7 \times 10^{-6} \text{ L/mg.min}$ และ $6 \times 10^{-6} \text{ L/mg.min}$ ซึ่งน้อยกว่า PAC ที่มีค่า $2 \times 10^{-5} \text{ L/mg.min}$ และ $1 \times 10^{-5} \text{ L/mg.min}$ บ่งบอกถึงระบบการดูดซับของ CH-PAC ที่มีความต้านทานมากขึ้น

- การเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนทำให้ k_{La} ของ PAC เพิ่มขึ้นในขณะที่ k_{La} ของ CH-PAC ลดลงเนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวภายในมากบ่งบอกถึงรูพรุนที่มากตามไปด้วยซึ่งการกวนด้วยฟองอากาศจะช่วยลดฟิล์มรอบผิวตัวกลางดูดซับทำให้การเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มง่ายขึ้นการดูดซับเกิดได้เร็วขึ้น ส่วน CH-PAC เนื่องจากปริมาณโพรงที่ลดลงและขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นกว่า PAC อาจเกิดจากมีไคโตซานเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนทำให้การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวภายนอกหรือรูพรุนด้านนอกซึ่งความปั่นป่วนจากการเติมอากาศสามารถส่งผลทำให้ฟิล์มบางลงจนสามารถทำให้เกิดการหลุดออกมาของสีข้อมจากพื้นผิวสู่สารละลายได้ง่ายขึ้นด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25° C

ตัวกลางดูดซับ วิธีกวนผสม	Pseudo First-order		Pseudo Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเท มวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		K _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC Stirrer	-1.0x10 ⁻³	0.155	3.0x10 ⁻⁵	0.578	3.0x10 ⁻⁵	0.180	0.058
	-6.0x10 ⁻⁴	0.148	5.0x10 ⁻⁵	0.202	5.0x10 ⁻⁵	0.194	0.063
	-6.0x10 ⁻⁴	0.234	4.0x10 ⁻⁵	0.294	4.0x10 ⁻⁵	0.127	0.041
CH - SAC Stirrer	-3.0x10 ⁻³	0.545	2.0x10 ⁻⁴	0.871	2.0x10 ⁻⁴	0.215	0.360
	-1.7x10 ⁻³	0.470	2.0x10 ⁻⁴	0.633	2.0x10 ⁻⁴	0.190	0.319
	-2.0x10 ⁻⁴	0.594	2.0x10 ⁻⁴	0.757	2.0x10 ⁻⁴	0.169	0.283
PAC Stirrer	-1.3x10 ⁻³	0.504	4.0x10 ⁻⁵	0.776	4.0x10 ⁻⁵	0.204	0.084
	-1.5x10 ⁻³	0.453	9.0x10 ⁻⁵	0.663	9.0x10 ⁻⁵	0.316	0.130
	-1.7x10 ⁻³	0.503	9.0x10 ⁻⁵	0.744	9.0x10 ⁻⁵	0.326	0.134
CH - PAC Stirrer	-1.9x10 ⁻³	0.644	6.0x10 ⁻⁵	0.818	5.0x10 ⁻⁵	0.178	0.086
	-1.4x10 ⁻³	0.523	7.0x10 ⁻⁵	0.733	7.0x10 ⁻⁵	0.267	0.129
	-1.4x10 ⁻³	0.543	7.0x10 ⁻⁵	0.732	7.0x10 ⁻⁵	0.251	0.121

ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.7 อธิบายได้ดังนี้

- จากค่า R² การดูดซับที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศและเติมก๊าซไนโตรเจนเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน ซึ่งจากค่า k_La ของถ่าน SAC พบว่าการกวนผสมด้วยไนโตรเจนมี k_La เท่ากับ 0.127 min⁻¹ ซึ่งน้อยกว่า stirrer ที่มี k_La เท่ากับ 0.180 min⁻¹ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าฟองทำให้เกิดความปั่นป่วนที่ขัดขวางการผ่านฟิล์มของ BY 1 เพื่อเข้าสู่ผิวตัวกลางดูดซับ ในขณะที่เติมอากาศมีค่า k_La เท่ากับ 0.194 min⁻¹ ซึ่งสูงกว่า stirrer ที่มี k_La เท่ากับ 0.180 min⁻¹ เพียงเล็กน้อยซึ่งมีความเป็นไปได้ที่โมเลกุลออกซิเจนในอากาศจะเหนี่ยวนำให้ประจุบนผิวถ่านมีการดูดซับได้มากขึ้น (ชลธิชา, 2546) ทำให้การกวนด้วย Air มีอัตราเร็วการดูดซับสูงกว่าไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย แต่สำหรับถ่าน CH-SAC การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวภายนอกเท่านั้นซึ่งความปั่นป่วนจากการเติมอากาศอาจทำให้ BY 1 ซึ่งมีน้ำหนักเบาและขนาดเล็กหลุดจากการเกาะติดกับผิว CH-SAC ได้ง่ายทำให้การดูดซับเกิดได้ช้าดังค่า k_La ของการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่น้อยกว่า stirrer ทั้งนี้ค่า k ของระบบไม่ต่างกันเหมือนกรณี RB 5 ซึ่งเป็นการยืนยันอัตราการซึมผ่านชั้นไคโตซานใช้เวลาเท่ากันเมื่อ C₀ เท่ากัน

- กรณีถ่าน PAC พบว่าการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนทำให้มี k_La เท่ากับ 0.316 min⁻¹ และ 0.326 min⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งมีผลให้ความเร็วในการดูดซับสี BY 1 มากกว่า stirrer ที่มี k_La เท่ากับ 0.204 min⁻¹ อีกทั้งจากค่า k ที่มีค่า 9x10⁻⁵ L/mg.min สูงกว่า stirrer ที่มีค่าเท่ากับ 4x10⁻⁵ L/mg.min

ทั้งนี้เนื่องจากสี BY 1 มีอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าสี RB 5 ซึ่งการกวนอย่างสมบูรณ์ที่เกิดจากฟองนอกจากจะลดฟิล์มแล้วยังทำให้สี BY 1 มีโอกาสได้สัมผัสผิวถ่านมากขึ้นอัตราการเร็วดูดซับจึงเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันนี้กับ CH-PAC

- จากค่า k พบว่าชนิดการกวนผสมทั้ง stirrer การเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนไม่แตกต่างกันซึ่งบ่งบอกว่าประเภทของความปั่นป่วนไม่มีผลต่อการแทรกซึมสู่ชั้นไคโตซานและการเติมอากาศไม่มีผลจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนที่กระทบต่อผลการดูดซับของไคโตซานบน CH-SAC

- การเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนมีผลให้อัตราการดูดซับสี BY 1 เพิ่มขึ้นสำหรับถ่าน SAC, PAC และ CH-PAC ซึ่งถ่านทั้ง 3 ชนิดเป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวภายในมากแสดงว่ามีโพรงที่ลึก ซึ่งการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนจะทำให้ฟิล์มเคลือบผิวตัวกลางดูดซับบางลงทำให้การเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงภายในรูพรุนของสีได้มากและลึกเพราะสีมีอนุภาคขนาดเล็กทำให้การหลุดออกจากโพรงเกิดขึ้นน้อย

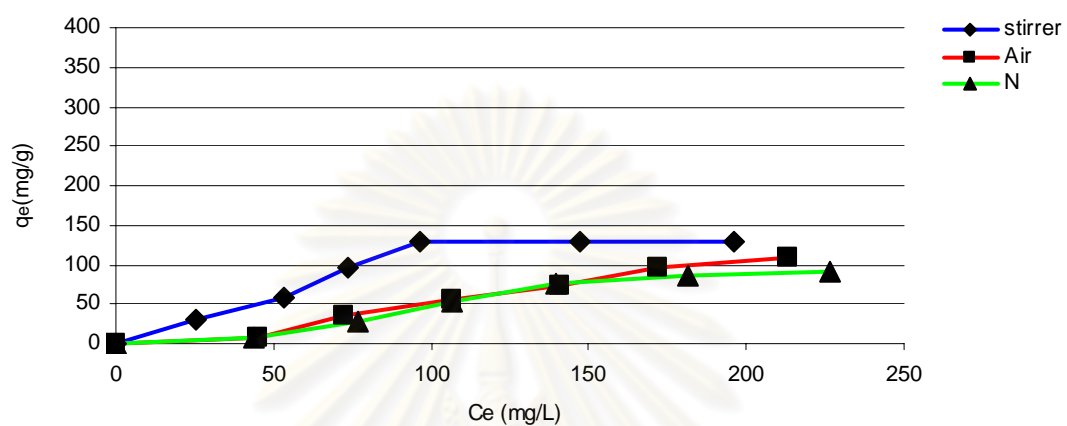
4.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมของการเติมอากาศ

จากผลการศึกษาผลกระทบจากการเติมอากาศที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB 5 ดังรูปที่ 4.12 พบว่าสำหรับถ่านทั้ง 4 ชนิดการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนให้ความสามารถในการดูดซับ q_e ที่ไม่แตกต่างกันแต่สำหรับถ่าน PAC พบว่าที่ความเข้มข้นสี RB 5 เริ่มต้นสูงโมเลกุลออกซิเจนจากอากาศจะช่วยให้ประจุบนผิวถ่านมีการดูดซับได้มากขึ้น (ชลธิชา, 2546) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวภายนอกของ PAC ที่มีค่าสูงถึง $416.6 \text{ m}^2/\text{g}$ ในขณะที่ CH-PAC มีพื้นที่ภายนอก $356.0 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งน้อยกว่า PAC อีกทั้งการมีไคโตซานบนพื้นผิวและปกคลุมรูพรุนยังเป็นการขัดขวางผลจากการเหนี่ยวนำของออกซิเจนจากการเติมอากาศ

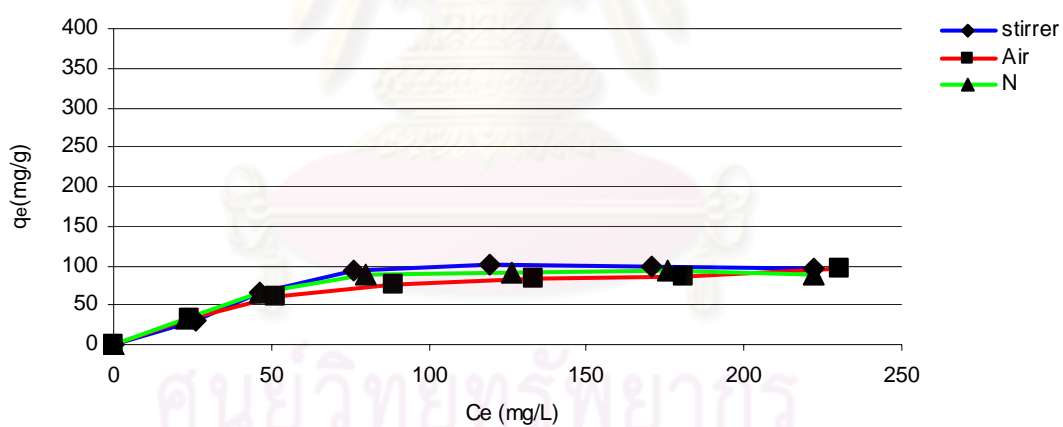
นอกจากนี้ผลจากการเติมอากาศที่มีต่อการดูดซับสี RB 5 ที่ C_0 ต่ำพบว่าถ่าน SAC, PAC และ CH-PAC มีค่า q_e จากการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่น้อยกว่าการกวนด้วย stirrer แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศนอกจากมีผลรบกวนแรงดึงดูดระหว่างตัวกลางดูดซับและสีแล้วยังมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการคายซับ (Desorption) ของอนุภาคสีที่อยู่บนพื้นผิวภายนอกหรือรูพรุนด้านนอกเกิดขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดกับ CH-PAC เมื่อเปรียบเทียบกับ PAC ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการอุดตันของไคโตซานภายในโพรงทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับที่รูพรุนด้านนอก ส่งผลให้อนุภาคมีโอกาสดังกล่าวหลุดออกง่ายโดยเฉพาะในสภาวะที่มีการเติมอากาศซึ่งทำให้ฟิล์มที่เป็นตัวกักอนุภาคที่ดูดซับไว้มีความบางลง

อย่างไรก็ตามไคโตซานบนผิว CH-SAC เป็นสารที่มีความเป็นประจุบวกในตัวสูงรวมทั้งเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นสูงจะมีความหนืดส่งผลให้สีที่ถูกยึดจับด้วยไคโตซานมีการคงสภาพอยู่ได้

เป็นการลดผลกระทบจากการเติมอากาศที่จะทำให้เกิดการคายซับทำให้ค่า q_e ของการเติมอากาศ และ stirrer ไม่ต่างกันเมื่อเทียบกับกรณีของ CH-PAC นอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่า q_e ของการกวนทั้ง 3 ชนิดจะใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบที่เกิดจากการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนลดลงเนื่องจาก ΔC เป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

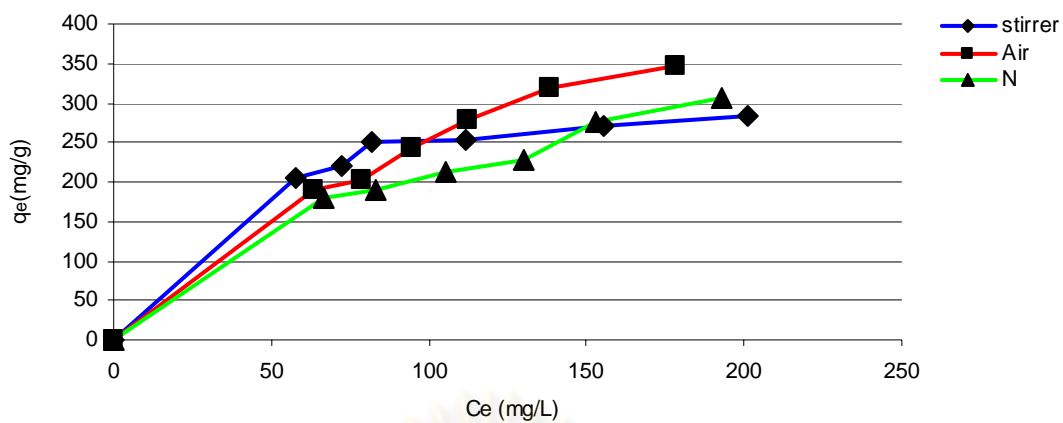


(ก) SAC

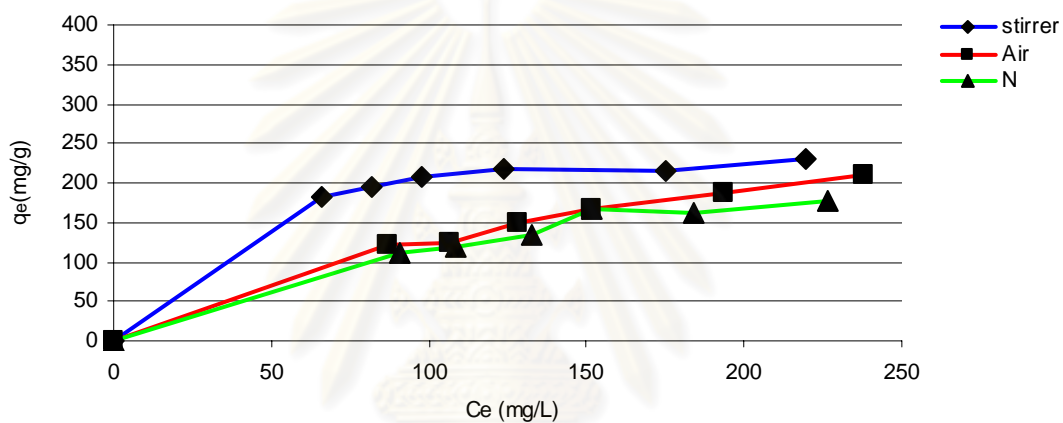


(ข) CH-SAC

รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์
(ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ก) PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์
(ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

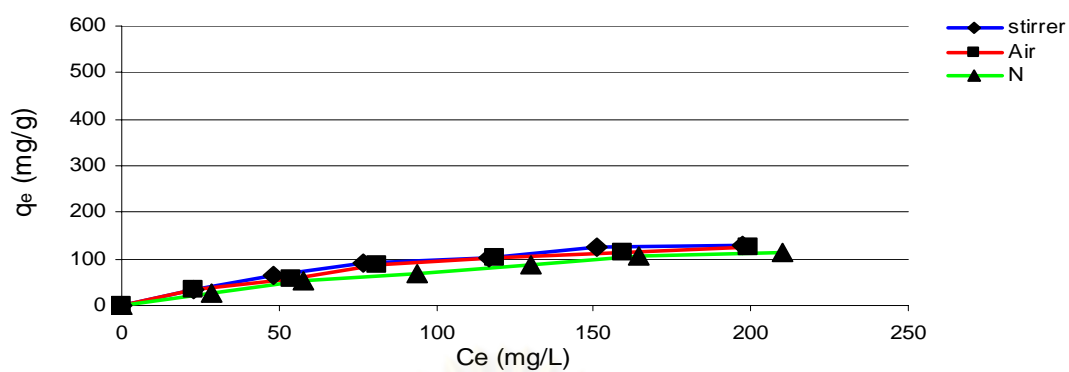
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศมีค่าคงที่ไอโซเทอมแบบ Langmuir และ Freundlich ได้ดังตารางที่ 4.8

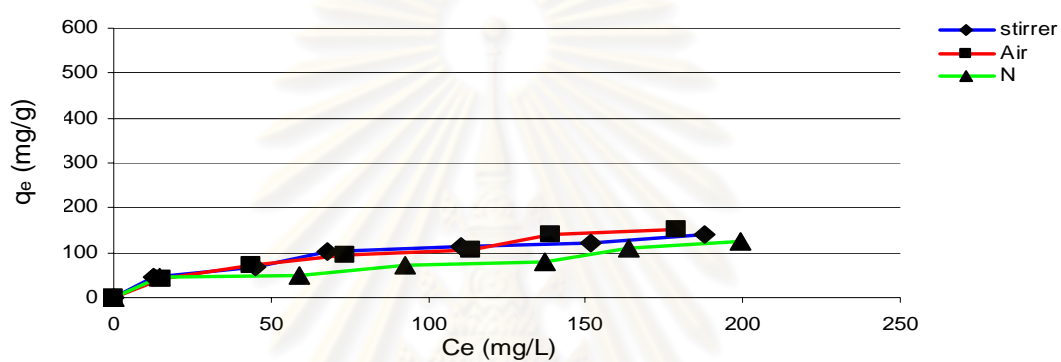
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับที่ RB 5 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศ

ตัวกลางดูดซับ วิธีการผสม	Langmuir			Freundlich		
	q_m	$b(\text{mg/g})$	R^2	$K(\text{mg/L})$	$1/n$	R^2
SAC						
Stirrer	130.02	0.020	0.973	3.186	0.748	0.880
Air	108.76	0.002	0.914	0.014	1.721	0.913
N	91.94	0.011	0.918	0.030	1.541	0.920
CH - SAC						
Stirrer	97.13	0.140	0.905	7.842	0.507	0.755
Air	87.37	0.042	0.979	9.899	0.424	0.884
N	97.41	0.069	0.959	11.013	0.428	0.837
PAC						
Stirrer	282.46	0.034	0.919	82.186	0.237	0.879
Air	347.91	0.007	0.975	13.301	0.637	0.975
N	305.78	0.001	0.966	13.329	0.517	0.957
CH - PAC						
Stirrer	230.69	0.046	0.923	93.154	0.168	0.871
Air	209.40	0.039	0.900	21.984	0.385	0.875
N	176.78	0.001	0.980	3.771	0.744	0.969

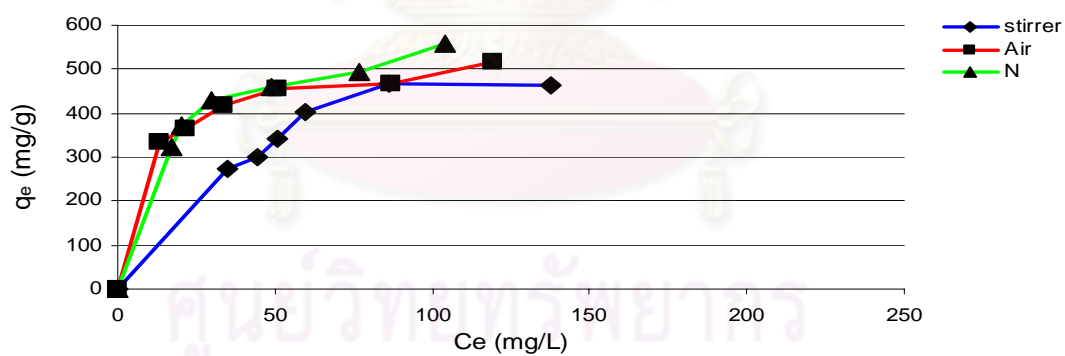
จากค่าคงที่ไอโซเทอมดังตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่า R^2 พบว่าการดูดซับที่ RB 5 ในสภาวะที่มีการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนเป็นไปตามสมการ Langmuir Isotherm แสดงว่าการเติมอากาศและไนโตรเจนไม่ได้เปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ ซึ่งจากค่า q_m เมื่อพิจารณาถ่าน SAC พบว่า stirrer > Air > N₂ โดยมี q_m สูงที่สุดเท่ากับ 130.02 mg/g ซึ่งความแตกต่างของ q_m จาก stirrer และการเติมอากาศบ่งบอกได้ว่ามีผลกระทบจากการกวนด้วยฟองอากาศต่อการดูดซับของถ่าน SAC, PAC และ CH-PAC ยกเว้น CH-SAC ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะเห็นว่า q_m ของ CH-SAC ให้ผลคือ Air \approx N₂ \approx stirrer สำหรับถ่าน PAC นั้นพบว่า Air > N₂ > stirrer โดยมีค่า q_m สูงที่สุดเท่ากับ 347.91 mg/g และสำหรับถ่าน CH-PAC พบว่า stirrer > Air > N₂



(ก) SAC

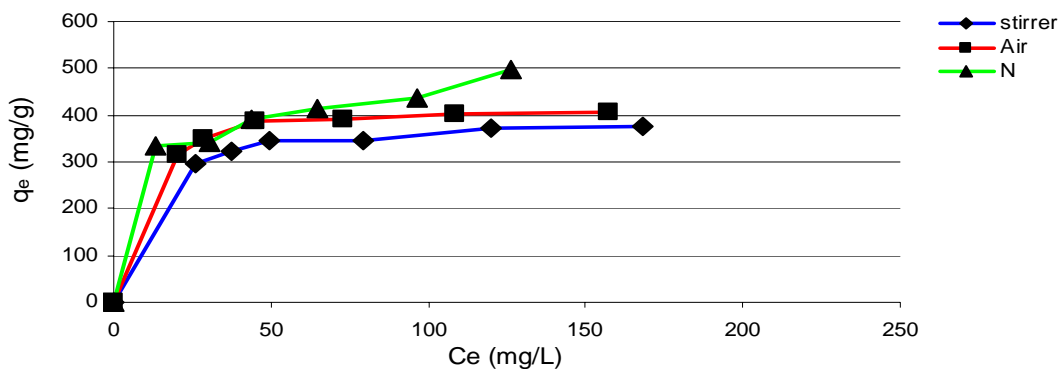


(ข) CH-SAC



(ค) PAC

รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับสี BY 1 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC
(ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ไอโซเทอมการดูดซับสี BY 1 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

จากผลการศึกษาความสามารถในการการดูดซับสี BY 1 ดังรูปที่ 4.13 สำหรับถ่าน SAC และ CH-SAC พบว่าการเติมอากาศมีผลให้ความสามารถในการดูดซับสี BY 1 ไม่แตกต่างจาก stirrer เนื่องจากสี BY 1 มีอนุภาคขนาดเล็กดังนั้นการถูกดูดซับโดย SAC จึงเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้ q_e ที่สมดุลไม่แตกต่างกัน

ในขณะที่ PAC และ CH-PAC พบว่าการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนมีผลทำให้ q_e มากกว่า stirrer อย่างชัดเจนโดยเฉพาะที่ C_0 น้อยกว่า 210 mg/L ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ผลจาก ΔC ยังมีน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศนอกจากลดฟิล์มน้ำที่เกิดขึ้นแล้วยังทำให้สี BY 1 มีโอกาสสัมผัสผิวตัวกลางดูดซับมากขึ้นและเนื่องจาก BY 1 เป็นสีที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่สู่รูพรุนได้ง่าย รวมถึงความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศไม่ส่งผลขัดขวางการดูดซับของ PAC และ CH-PAC และที่ความเข้มข้นมากกว่า 210 mg/L ผลจาก ΔC มีมากพอที่จะเป็นแรงดันที่นำพาสีข้อมไปสู่กลไกการดูดซับทำให้ค่า q_e จากการกวนผสมทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนต่อการดูดซับสี BY1 พบว่าการเติมไนโตรเจนมีแนวโน้มส่งผลให้ q_e สูงกว่าการเติมอากาศ เนื่องจากในอากาศมีก๊าซออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 โดยน้ำหนักแห้ง (ชลธิชา, 2545) ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีจึงมีความเป็นไปได้ที่จะรับอิเล็กตรอนมาจากหมู่ OH^- ที่มีบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทุกชนิดที่นำมาทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง PAC และ CH-PAC ที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งการสูญเสียความเป็นประจุลบไปทำให้พื้นผิวถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีความเป็นประจุบวกมากขึ้นและมีแรงผลักจากประจุที่เหมือนกันกับ BY 1 ซึ่งเป็นผลทำให้การดูดซับในกรณีที่มีการเติมอากาศน้อยกว่าการเติมอากาศไนโตรเจน

และจากเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้การดูดซับที่ RB 5 ของ PAC และ CH-PAC มี q_c กรณีการเติมอากาศสูงกว่าการเติมก๊าซไนโตรเจน

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ BY 1 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศมีค่าคงที่ไอโซเทอมแบบ Langmuir และ Freundlich ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับที่ BY 1 ภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศ

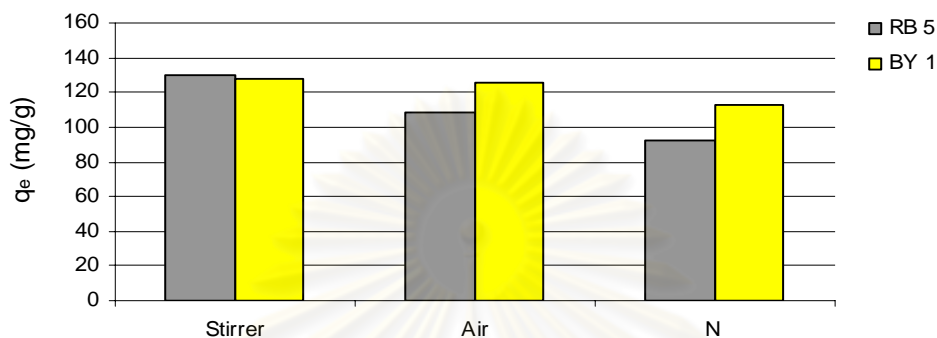
ตัวกลางดูดซับ วิธีการผสม	Langmuir			Freundlich		
	q_m	$b(\text{mg/g})$	R^2	$K(\text{mg/L})$	$1/n$	R^2
SAC						
Stirrer	128.23	0.009	0.996	5.574	0.615	0.964
Air	125.65	0.010	0.990	5.135	0.615	0.983
N	112.74	0.005	0.996	2.633	0.719	0.964
CH - SAC						
Stirrer	140.41	0.011	0.974	15.856	0.415	0.968
Air	151.42	0.011	0.969	10.842	0.504	0.967
N	125.86	0.003	0.872	13.388	0.387	0.818
PAC						
Stirrer	464.46	0.018	0.932	65.283	0.419	0.851
Air	515.54	0.094	0.965	205.258	0.193	0.963
N	559.59	0.083	0.967	162.667	0.265	0.943
CH - PAC						
Stirrer	375.82	0.121	0.965	207.683	0.119	0.927
Air	407.66	0.264	0.97	230.569	0.120	0.853
N	496.05	0.058	0.919	199.159	0.118	0.908

จากค่า R^2 ดังตารางที่ 4.9 พบว่าสมการ Langmuir Isotherm มีความเหมาะสมนำมาใช้อธิบายกลไกการดูดซับที่ BY 1 ในสภาวะที่มีการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด q_m พบว่า ถ่าน SAC และ CH-SAC ซึ่งเป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนน้อยส่วนใหญ่การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกตัวกลางดูดซับซึ่งเกิดได้ง่าย ดังนั้นการเติมอากาศจึงให้ค่า q_m ที่ไม่ต่างจากการกวนด้วย stirrer ซึ่งมีค่าในช่วง 112.74 - 128.23 mg/g สำหรับถ่าน SAC และ 125.86 - 151.42 mg/g สำหรับถ่าน CH- SAC

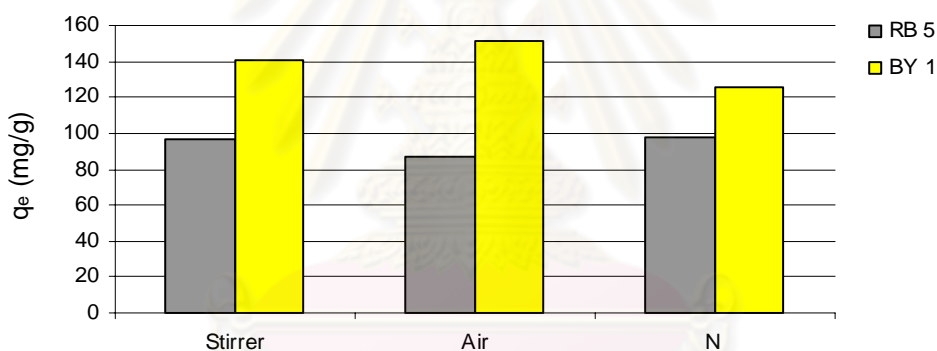
สำหรับถ่าน PAC และ CH-PAC พบว่าการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนส่งผลให้ q_m มีค่าสูงกว่าการกวนด้วย stirrer เนื่องจาก PAC และ CH-PAC มีพื้นที่ผิวภายในรูพรุนที่มากตามลำดับและจากขนาดอนุภาคเล็กของถ่าน BY 1 ซึ่งฟองอากาศจะช่วยให้ถ่าน BY 1 มีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวได้มากขึ้นและเกิดการดูดซับเข้าสู่รูพรุนมากขึ้นด้วย นอกจากนี้การรับอิเล็กตรอนจากพื้นผิวของออกซิเจนจากอากาศทำให้ความแรงของประจุบวกบนพื้นผิวเด่นขึ้นมาเป็นการสร้างสภาวะที่เกิดแรงผลักอนุภาคถ่าน BY 1 ซึ่งมีประจุบวกเหมือนกันทำให้ผลของค่า q_m จากการเติมอากาศของ PAC และ CH-

PAC ซึ่งมีค่า 515.54 mg/g และ 407.66 mg/g ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่าค่า q_m จากการเติมไนโตรเจนซึ่งมีค่า 559.59 mg/g และ 496.05 mg/g ตามลำดับ

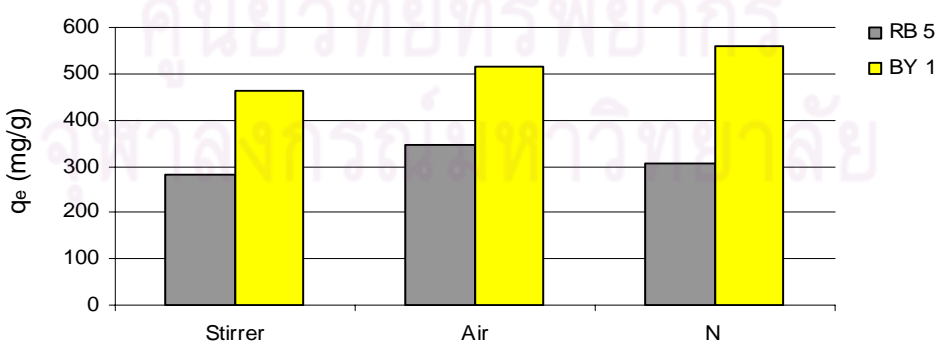
จากการศึกษาผลจากการกวนผสมด้วย stirrer การเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB5 และ BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดสรุปได้ดังรูปที่ 4.14



(ก) SAC

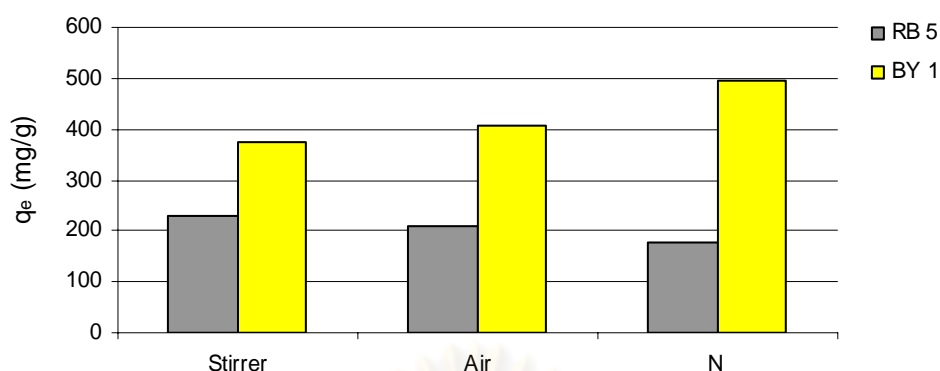


(ข) CH-SAC



(ค) PAC

รูปที่ 4.14 สรุปผลจากชนิดการกวนผสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB5 และ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.14 (ต่อ) สรุปผลจากชนิดการกวนผสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB5 และ BY 1 ด้วย ถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

จากผลการกวนผสมทั้งสามชนิดต่อการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็น ตัวแทนการศึกษาผลจากการเติมอากาศต่อการดูดซับสามารถสรุปได้ดังนี้

- การดูดซับสี BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ให้ผลการดูดซับดีกว่าการดูดซับสี RB 5 เนื่องจากสี BY 1 มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าสี RB 5 ซึ่งบ่งบอกว่ามีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ดังนั้น การเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็ว รวมทั้งการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนภายในเกิดขึ้นได้ง่ายทำให้ q_e ของสี BY 1 มากกว่า q_e ของสี RB 5

- ความสามารถในการดูดซับสีของทั้งสองชนิดของ PAC และ CH-PAC มากกว่า SAC และ CH-SAC เนื่องจาก PAC และ CH-PAC มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่า SAC และ CH-SAC ในขณะเดียวกัน CH-PAC มีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อยกว่า PAC รวมทั้งมีไคโตซานอุดตันโพรงภายในรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวลดลงและ Driving force ลดลง ซึ่งส่งผลให้ q_e ของ CH-PAC น้อยกว่า PAC

- ความสามารถในการดูดซับสีของ BY 1 ของ CH-SAC มากกว่า SAC เนื่องจาก BY 1 มีอนุภาคขนาดเล็กทำให้การแทรกซึมสู่ชั้นไคโตซานเกิดได้ง่ายและเร็ว รวมทั้งไคโตซานมีหมู่ OH^- ซึ่งการทดลองควบคุมสภาพที่พีเอช 7 ซึ่งมากกว่า pH_{ZPC} ของ CH-SAC ที่มีค่าเท่ากับ 6.7 แสดงว่ามีประจุลบเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวทำให้การดูดซับสี BY 1 เกิดได้ดี โดยการเติมอากาศให้ค่า q_e มากที่สุด

- ความสามารถในการดูดซับสีของ RB 5 ของ SAC มากกว่า CH-SAC เนื่องจาก SAC มีพื้นที่ผิวมากกว่า CH-SAC ทำให้แรงดึงดูดแรงแวนเดอร์วาลส์สูงซึ่งมีน้อยใน CH-SAC รวมทั้งมีปริมาตรโพรงต่ำบ่งบอกว่ามี Capillary force มีค่าน้อย ซึ่งแรงขับเคลื่อนนี้มีน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญใน CH-SAC ทำให้ q_e ของ SAC สูงกว่า CH-SAC

- เมื่อพิจารณา SAC พบว่าการกวนผสมทั้งสามชนิดให้ผลการดูดซับสี BY 1 ไม่ต่างกัน เนื่องจาก BY 1 มีอนุภาคเล็กการดูดซับจึงเกิดได้ง่ายและเข้าสู่รูพรุนได้ดี ในขณะที่การดูดซับสี RB 5 ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าการผ่านฟิล์มน้ำเกิดได้ช้ากว่า BY 1 รวมทั้งการเข้าสู่รูพรุนเกิดได้ บริเวณรูพรุนด้านนอกซึ่งการเติมอากาศและไนโตรเจนที่ทำให้ฟิล์มบางลงรวมถึงความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นทำให้สี RB 5 มีโอกาสหลุดออกมาได้มาก ดังนั้นการกวนด้วย stirrer ซึ่งเกิดแรงเฉือนน้อยกว่าฟองก๊าซจึงส่งผลให้ q_m สูงที่สุด

- เมื่อพิจารณา CH-SAC พบว่าชนิดของการกวนผสมไม่มีผลต่อการดูดซับสี RB 5 ในขณะที่การดูดซับสี BY 1 จะดีที่สุดในเมื่อเติมอากาศเนื่องจากการรับอิเล็กตรอนจากโคโคซานที่เคลือบผิว CH-SAC ของออกซิเจน โดยจะรับจากหมู่ OH^- ทำให้ความเป็นบวกของโครงสร้างโคโคซานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นรักษาสภาพสมดุลของโคโคซานจึงการแตกตัวของไนโตรเจนจากหมู่อะมิโนมากขึ้นเพื่อให้เกิดประจุลบในระบบเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การดูดซับสี BY 1 เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอากาศ

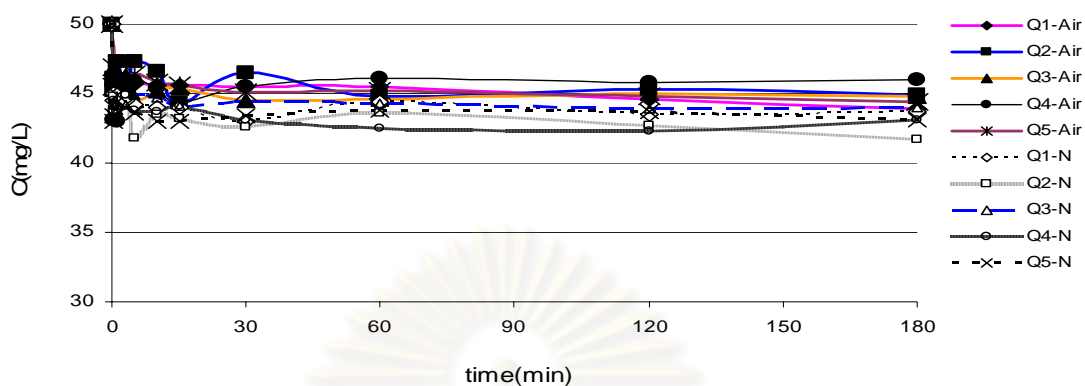
- ผลของออกซิเจนจากการเติมอากาศที่มีต่อการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดโดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นการกวนด้วยฟองอากาศเช่นเดียวกันแต่เนื่องจากไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยจึงไม่มีเกิดปฏิกิริยา สำหรับถ่าน PAC และ CH-PAC ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านชนิดอื่น พบว่าการเติมอากาศทำให้ออกซิเจนในอากาศมีโอกาสรับอิเล็กตรอนจากพื้นผิวของถ่านส่งผลให้ประจุโดยรวมบนพื้นผิวมีความเป็นบวกมากขึ้นซึ่งเป็นแรงดึงดูดประจุลบของสี RB 5 ในขณะที่เดียวกันเกิดแรงผลักประจุบวกซึ่งจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าการเติมอากาศทำให้ q_c ของการดูดซับสี RB 5 มากกว่าการเติมไนโตรเจนและตรงกันข้ามการเติมอากาศทำให้ q_c ของการดูดซับสี BY 1 น้อยกว่าการเติมไนโตรเจนเพราะมีแรงผลักรวมเกิดขึ้น

- จากผลการทดลองทำให้ทราบว่ากรณีเติมอากาศมีผลให้ q_c สูงกว่าหรือเทียบเท่าการกวนด้วย stirrer ในการดูดซับ BY 1 และสี RB 5 บนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงควรมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วยค่า Q_g หลายระดับ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

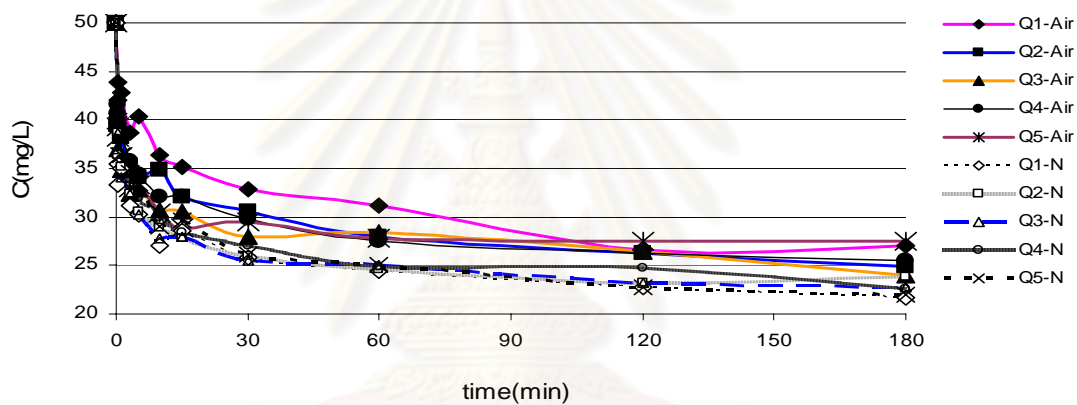
4.4.3 การศึกษาผลทางอุทกพลศาสตร์ของการเติมอากาศต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การศึกษาผลกระทบทางอุทกพลศาสตร์จากการเติมอากาศที่มีอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ต่างๆ กันต่อการดูดซับสีย้อม โดย Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 และ Q_5 มีค่าเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 และ 1.2 L/min ตามลำดับ ซึ่งทำการศึกษาภายใต้อุณหภูมิ 25°C และควบคุมค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ ที่ค่าพีเอช 7 โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC และ

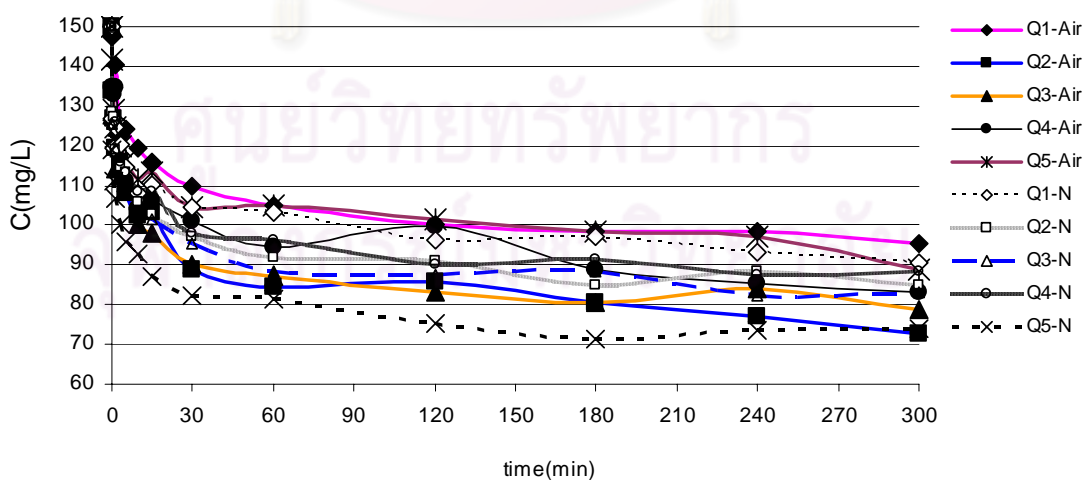
CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC และ CH-PAC โดยผลของการเปลี่ยนแปลง Q_g ต่อการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



(ก) SAC

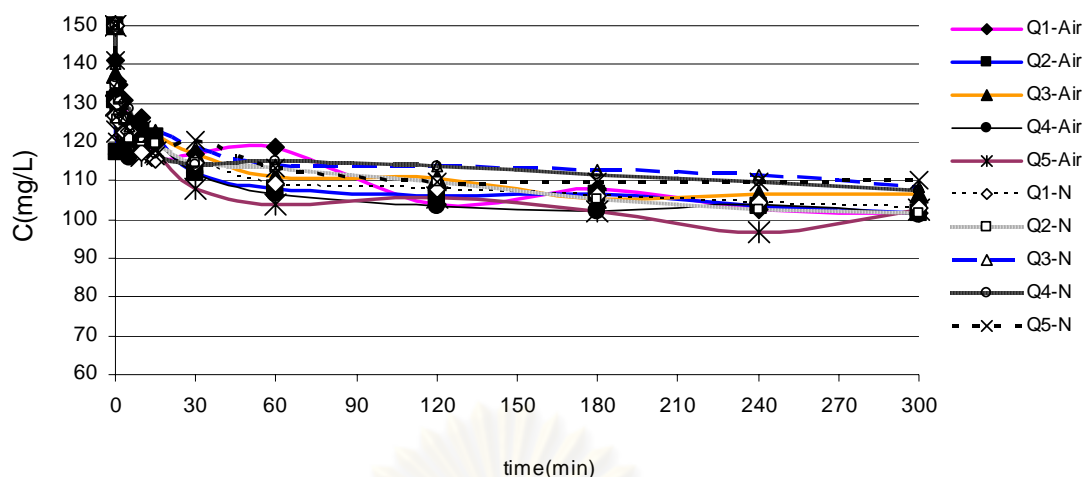


(ข) CH-SAC



(ค) PAC

รูปที่ 4.15 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ(Q_g) ที่มีต่อการดูดซับสีย้อม RB 5 (q_e) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.15 (ต่อ) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีต่อค่าการดูดซับสี่ข้อม RB 5 (q_c) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

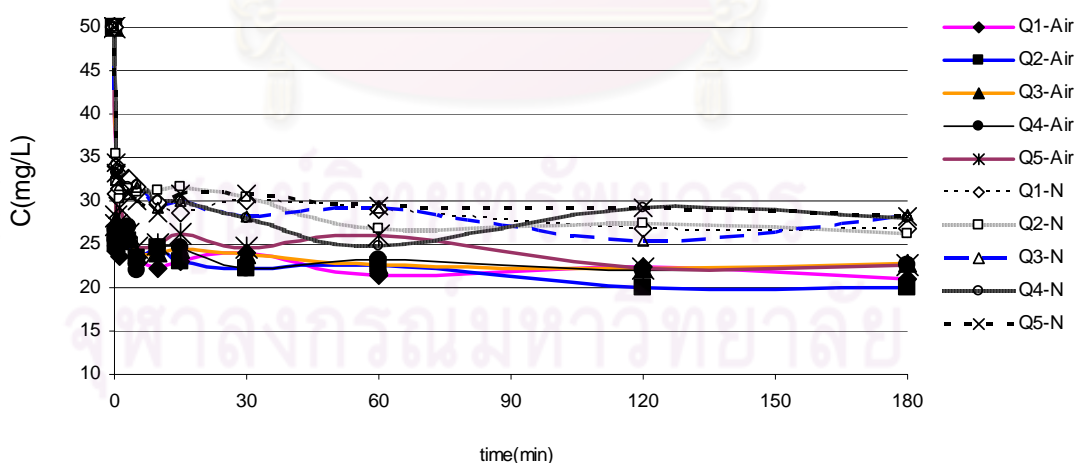
จากการศึกษาผลของการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่มีต่อการดูดซับสี่ RB 5 ดังรูปที่ 4.15 พบว่า

- ถ่าน SAC พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เกิดจากการเติมอากาศที่ Q_g ต่างกันไม่มีผลต่อการดูดซับ ในขณะที่การเติมก๊าซไนโตรเจนที่ Q_g เท่ากับ 0.4 L/min และ 1.2 L/min ให้การดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการเติมอากาศถึงแม้ออกซิเจนจะช่วยเป็นตัวชักนำให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับทำให้การดูดซับสี่ดีขึ้นแต่ในขณะเดียวกันถ่านกัมมันต์ก็สามารถดูดซับก๊าซต่างๆ ได้ดี (ทีปัทสน์, 2552) โดยเฉพาะก๊าซออกซิเจนซึ่งมีการเคลื่อนที่เข้าไปใกล้พื้นผิวเพื่อรับอิเล็กตรอนจึงมีโอกาสที่จะถูกดูดซับหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น แรงผลักดันสูงส่งผลให้ถ่านสูญเสียความจุในการดูดซับ ในขณะที่ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยอยู่แล้วจึงไม่มีปัจจัยใดที่จะเหนี่ยวนำให้ก๊าซไนโตรเจนพยายามแทรกซึมผ่านฟิล์มเหมือนดังออกซิเจนจึงไม่เกิดการสูญเสียพื้นที่ภายในโพรงเกิดขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกันนี้กับการดูดซับของ CH-SAC

- สำหรับถ่าน PAC ซึ่งเป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากพบว่า การเติมอากาศที่ Q_g น้อยคือ 0.4 และ 0.6 L/min ทำให้ได้ค่าการดูดซับสูงสุดที่สูงจากความเข้มข้นที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมอากาศที่ระดับ Q_g สูงพอเหมาะนอกจากจะลดฟิล์มน้ำเพื่อให้สี่ผ่านเข้าไปสัมผัสพื้นผิวง่ายขึ้นแล้ว ออกซิเจนในอากาศยังทำให้พื้นผิวมีความเป็นบวกมากขึ้นส่งผลให้ดูดซับ RB 5 ดีขึ้น ในขณะที่ถ้า Q_g มีค่าสูงเกินไปฟิล์มน้ำรอบพื้นผิวตัวกลางดูดซับที่บางลงจะทำให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศสามารถรบกวนอนุภาคสี่ที่เกาะอยู่โพรงด้านนอกหลุดออกมาได้ง่าย รวมทั้งออกซิเจนมีโอกาสถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนมากขึ้นซึ่งเป็นการลดพื้นที่ภายในโพรง

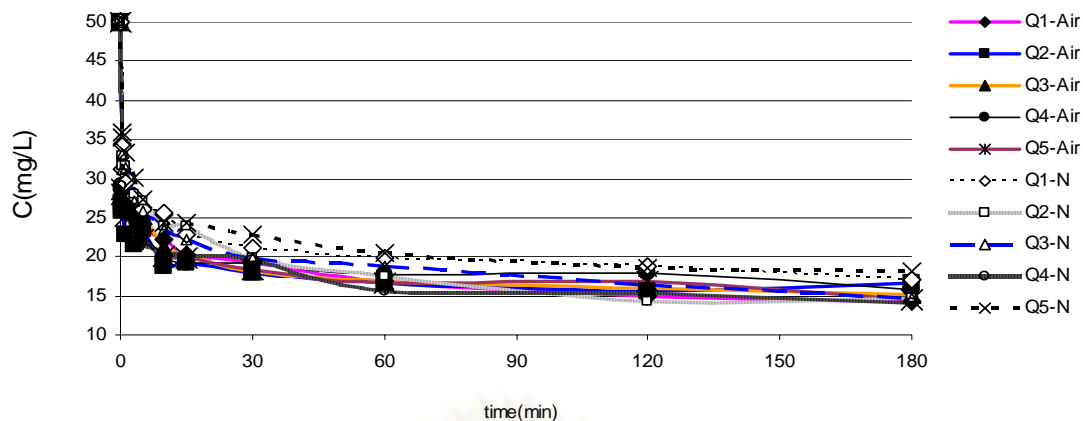
ส่วนเปลี่ยนแปลง Q_g ของการเติมอากาศมีผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันโดย Q_g เท่ากับ 0.4 L/min ให้ค่าการดูดซับที่ $RB 5$ ที่สูงที่สุดเนื่องจากเป็น Q_g ที่ทำให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์และสามารถลดฟิล์มน้ำรอบตัวกลางดูดซับได้มาก อีกทั้งหากเกิดการปั่นป่วนมากขึ้นยังอาจเป็นการกระตุ้นให้ถ่านเกิดการดูดซับก๊าซได้ดีขึ้นซึ่งจะลดความจุในการดูดซับสิ่ง ในขณะทำการเติมไนโตรเจนที่ Q_g สูงสุดคือ 1.2 L/min ให้ค่าการดูดซับสูงที่สุดเพราะการปั่นกวนที่สูงทำให้ฟิล์มน้ำของผิวตัวกลางบางลงและเกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ทำให้ $RB 5$ มีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวได้สูงขึ้น รวมทั้งก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยโอกาสถูกดูดซับจึงน้อยและโอกาสที่ก๊าซจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ไปรอบอนุภาคที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวก็น้อยตามไปด้วยซึ่งจะทำให้เกิดการคายซับของสีน้อยกว่ากรณีออกซิเจน

• สำหรับถ่าน CH-PAC เป็นถ่านที่มีคุณสมบัติทางกายภาพทางด้านพื้นที่ผิวใกล้เคียง PAC เพียงแต่ถูกปกคลุมด้วยไคโตซานเพียงเล็กน้อยทำให้พื้นที่ผิวลดลงและโพรงถูกอุดตันด้วยไคโตซานทำให้การเคลื่อนที่ของสีเข้าสู่โพรงเกิดขึ้นเพียงด้านนอกส่งผลให้โอกาสที่สีจะถูกดูดซับลดลง นอกจากนี้การคายซับของสีที่ถูกดูดซับจะมีโอกาสเกิดได้มากขึ้นส่งผลให้มีค่าการดูดซับที่น้อยกว่า PAC ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศและการเติมไนโตรเจนให้ค่าการดูดซับของ CH-PAC ที่ไม่แตกต่างกันหรือเด่นชัดเหมือนกรณี PAC ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างระหว่างลักษณะโพรงที่ตื้น ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า PAC ทำให้ผลกระทบจากการดูดซับออกซิเจนลดลง รวมทั้งมีไคโตซานที่ยังคงสามารถดูดซับสี $RB 5$ ได้ถึงแม้จะมีการรบกวนจากความปั่นป่วนของการเติมอากาศในระบบ

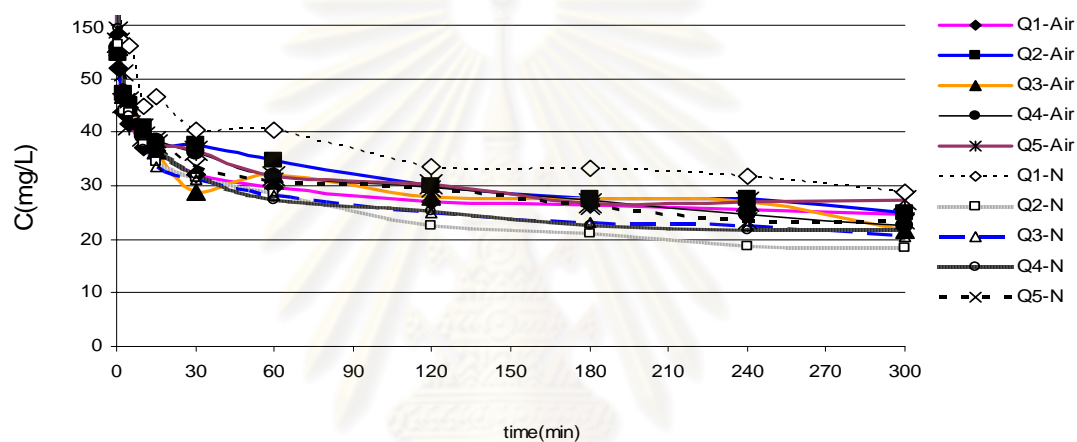


(ก) SAC

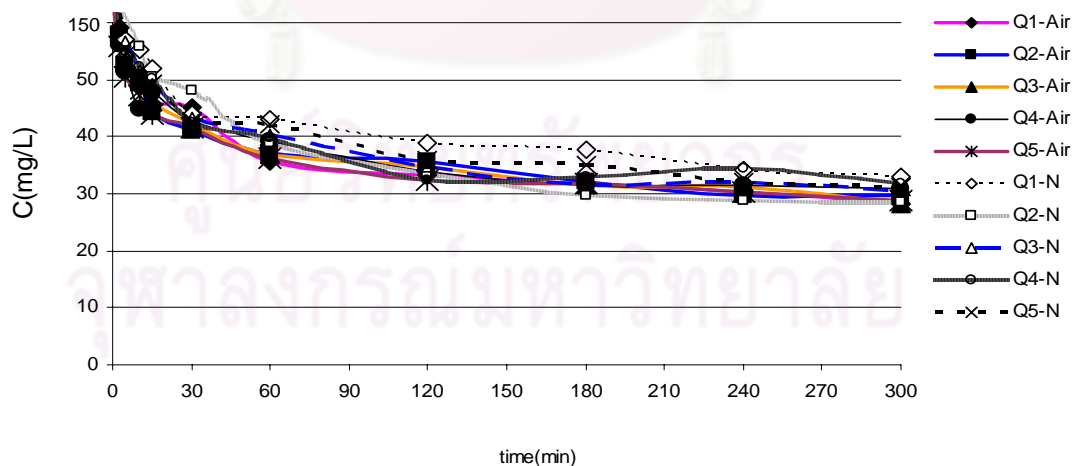
รูปที่ 4.16 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีต่อการดูดซับสีย้อม BY 1 (q_e) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ข) CH-SAC



(ค) PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีต่อค่าการดูดซับสี่ข้อม
BY 1 (q_c) ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

การศึกษาผลของการเติมอากาศและก๊าซไนโตรเจนที่มีต่อการดูดซับสี BY 1 ดังรูปที่ 4.16 พบว่า

- สำหรับถ่าน SAC จะเห็นว่าการเติมอากาศมีแนวโน้มที่ส่งผลให้ค่าการดูดซับ BY 1 สูงกว่าการเติมไนโตรเจน ทั้งนี้เนื่องจากออกซิเจนที่เหนี่ยวนำให้เกิดการดูดซับดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสี BY 1 ซึ่งมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาการเคลื่อนที่สู่รูพรุนจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็วยิ่งขึ้น ส่วนถ่าน CH- SAC ให้ผลการดูดซับที่ไม่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันนี้ โดย Q_g ที่มีค่าสูงทำให้มีโอกาสเกิดการคายซับของสีมากขึ้น
- สำหรับถ่าน PAC และ CH-PAC จะเห็นว่าการเติมไนโตรเจนที่ Q_g มีค่าสูงจะให้ค่าการดูดซับสี BY 1 ต่ำกว่าการเติมอากาศ เนื่องจากถ่าน PAC มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและฟินอลที่มีประจุลบซึ่งจะดึงดูดออกซิเจนเข้ามาจับอิเล็กตรอนทำให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวเด่นขึ้นมาและเกิดแรงผลักสี BY 1 มากขึ้น ดังนั้นผลการเติมอากาศจึงทำให้การดูดซับสี BY 1 น้อยกว่าการเติมไนโตรเจน ในขณะที่ CH-PAC การเติมอากาศมีแนวโน้มการดูดซับน้อยกว่า PAC เล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวที่น้อยกว่าเล็กน้อยและหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างไปจาก PAC

การลดฟิล์มน้ำรอบผิวตัวกลางดูดซับเกิดจากแรงเหนือนที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวดูดซับและฟองก๊าซ ดังนั้นหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการศึกษาถึงความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพที่เกิดจากการเติมอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อ Q_g ของระบบแตกต่างกัน อันได้แก่ ขนาดฟองเส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (d_B) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) ดังข้อมูลในตารางที่ 4.10

การศึกษการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีต่อความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า f_B จากสมการดังนี้

$$f_B = \frac{Q_g}{V_B} \quad (4.10)$$

$$\text{เมื่อ ปริมาตรฟองอากาศ } (V_B) = \pi \cdot d_B^3 / 6 \quad (4.11)$$

d_B = เส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ

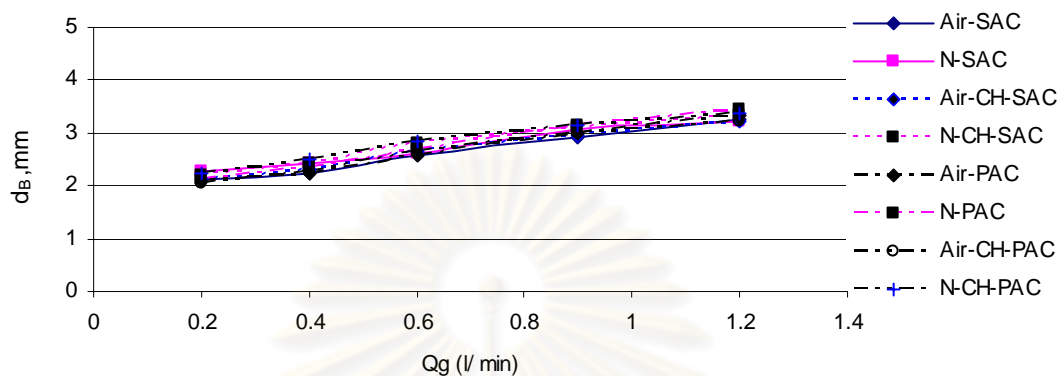
ตารางที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) ที่มีต่อความถี่ในการเกิดฟอง (f_b) ในการดูดซับสี่ RB 5

ตัวกลางดูดซับ Q_g , L/min	อากาศ (Air)			ก๊าซไนโตรเจน(N_2)		
	d_b , mm	V_B , mm ³	f_b , s ⁻¹	d_b , mm	V_B , mm ³	f_b , s ⁻¹
SAC						
0.2	2.140	5.132	649.505	2.260	6.045	551.440
0.4	2.250	5.965	1117.651	2.420	7.422	898.272
0.6	2.580	8.993	1111.952	2.630	9.526	1049.731
0.9	2.920	13.038	1150.503	3.050	14.858	1009.571
1.2	3.250	17.976	1112.564	3.220	17.483	1143.951
CH - SAC						
0.2	2.12	4.990	668.061	2.21	5.652	589.722
0.4	2.32	6.539	1019.506	2.44	7.607	876.364
0.6	2.64	9.635	1037.847	2.81	11.619	860.649
0.9	2.95	13.444	1115.759	3.1	15.601	961.504
1.2	3.23	17.647	1133.359	3.33	19.337	1034.290
PAC						
0.2	2.070	4.645	717.650	2.13	5.061	658.696
0.4	2.22	5.729	1163.576	2.36	6.883	968.541
0.6	2.59	9.098	1099.122	2.68	10.080	992.066
0.9	2.99	13.998	1071.575	3.13	16.058	934.121
1.2	3.34	19.512	1025.028	3.46	21.691	922.034
CH - PAC						
0.2	2.06	4.578	728.152	2.22	5.729	581.788
0.4	2.28	6.207	1074.111	2.51	8.281	805.068
0.6	2.65	9.745	1026.142	2.84	11.995	833.662
0.9	2.98	13.858	1082.399	3.14	16.212	925.225
1.2	3.23	17.647	1133.359	3.37	20.042	997.896

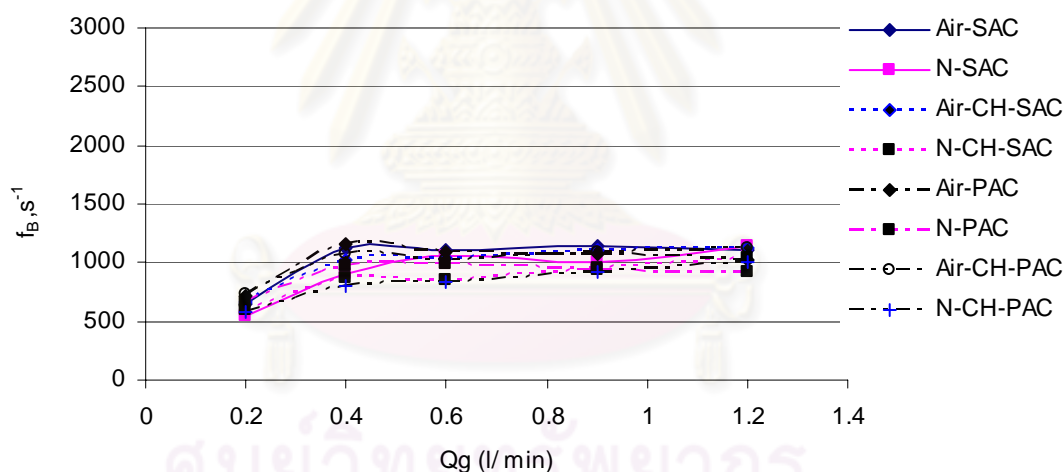
จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง d_b กับ Q_g ในการดูดซับสี่ RB 5 ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่า d_b มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า Q_g โดยขนาดฟองจะอยู่ในช่วง 2.0-3.5 mm และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง f_b กับ Q_g จากรูปที่ 4.18 ในช่วง Q_g เท่ากับ 0.2-0.4 L/min พบว่า f_b มีการเพิ่มขึ้นตาม Q_g โดยความถี่ที่เพิ่มขึ้นทำให้การกวนผสมเกิดมากขึ้น ซึ่งในช่วง 0.4-1.2 L/min จะคงที่ประมาณ 1000 S⁻¹ แสดงว่า การเปลี่ยนแปลง Q_g ไม่มีส่งผลต่อ f_b

โดยเมื่อพิจารณาผลของ d_b กับ f_b ต่อการดูดซับสี่ RB 5 พบว่ามีผลต่อการดูดซับของถ่าน PAC และ CH-PAC มากกว่า SAC และ CH-SAC ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนที่เล็กอีกทั้งพื้นที่ภายในรูพรุนมีค่ามาก ดังนั้นการปั่นป่วนที่เหมาะสมจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสีย้อมเข้าไปยังรูพรุนได้ดีตรงข้ามหากมีการปั่นป่วนที่มากเกินไปจะขัดขวางและรบกวนแรงดูดซับระหว่างถ่านและสีย้อมหรือถ่านน้อยเกินไปก็จะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำที่เคลือบผิวถ่านมีความหนา รวมทั้งการสัมผัสระหว่างถ่านและสีย้อมก็เกิดได้ไม่ทั่วถึง โดยจากผลการทดลองพบว่าการเติมก๊าซไนโตรเจนที่ Q_g เท่ากับ 1.2 L/min ให้ผลการดูดซับสี่ RB5 ดีที่สุดและ 0.4 L/min ให้ผลการดูดซับสี่ BY 1 สูงที่สุดบนถ่าน

PAC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสี RB 5 ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่โดยความปั่นป่วนที่สูงจะทำให้ฟิล์มบางลง และเคลื่อนที่ไปสัมผัสผิวตัวกลางดูดซับได้ง่าย ในขณะที่สี BY 1 ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเกิดได้ง่ายแต่หากมีความปั่นป่วนที่สูงมากเกินไปอาจมีผลให้เกิดการหลุดจากการเกาะติดผิวฟิล์มรวมทั้งผิวตัวกลางดูดซับได้ง่าย



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_g และ d_b ในการดูดซับสี RB 5



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_g และ f_b ในการดูดซับสี RB 5

ตารางที่ 4.11 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของก๊าซ (Qg) ที่มีต่อความถี่ในการเกิดฟอง (f_B) ในการดูดซับสี BY 1

ตัวกลางดูดซับ	อากาศ (Air)			ก๊าซไนโตรเจน(N ₂)			
	Qg, L/min	d _B , mm	V _B , mm ³	f _B , s ⁻¹	d _B , mm	V _B , mm ³	f _B , s ⁻¹
SAC							
0.2	1.540	1.913	1742.857	1.680	2.483	1342.443	
0.4	1.790	3.003	2219.702	1.960	3.943	1690.774	
0.6	2.050	4.511	2216.580	2.160	5.277	1894.889	
0.9	2.290	6.289	2385.228	2.420	7.422	2021.111	
1.2	2.550	8.683	2303.321	2.640	9.635	2075.694	
CH - SAC							
0.2	1.580	2.066	1613.811	1.760	2.855	1167.578	
0.4	1.860	3.370	1978.404	2.020	4.316	1544.542	
0.6	2.100	4.850	2061.993	2.250	5.965	1676.477	
0.9	2.350	6.796	2207.155	2.520	8.380	1789.924	
1.2	2.540	8.581	2330.633	2.780	11.251	1777.627	
PAC							
0.2	1.480	1.698	1963.535	1.610	2.185	1525.268	
0.4	1.790	3.003	2219.702	1.940	3.823	1743.607	
0.6	2.060	4.578	2184.457	2.220	5.729	1745.365	
0.9	2.380	7.060	2124.738	2.540	8.581	1747.975	
1.2	2.590	9.098	2198.243	2.700	10.307	1940.367	
CH - PAC							
0.2	1.620	2.226	1497.196	1.820	3.157	1055.868	
0.4	1.970	4.004	1665.157	2.110	4.919	1355.210	
0.6	2.250	5.965	1676.477	2.390	7.149	1398.786	
0.9	2.520	8.380	1789.924	2.670	9.968	1504.882	
1.2	2.740	10.772	1856.622	2.920	13.038	1534.004	

จากความสัมพันธ์ระหว่าง d_B กับ Qg ในการดูดซับสี BY 1 ดังรูปที่ 4.19 พบว่า d_B เพิ่มขึ้นตามค่า Qg ซึ่งมีค่า ในช่วง 1.5-3.0 mm ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า d_B จากการดูดซับสี RB 5 ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากแรงตึงผิวที่ต่างกันของสารละลายสีย้อมทั้งสองชนิด ซึ่งสี BY 1 เมื่ออยู่ในสภาพสารละลายแล้วให้ความหนืดของสารละลายที่มากกว่า RB 5 เนื่องจากสี BY1 มีขนาดเล็ก ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมีค่าต่ำลงส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สี RB 5 อนุภาค มีขนาดใหญ่ขึ้น แรงกระทำระหว่างโมเลกุลมีค่าลดลง ค่าความหนืดจะต่ำกว่า ซึ่งจากความสัมพันธ์ของสมการลาปลาซดังสมการที่ 12 บ่งบอกว่าขนาดฟอง (d_B) แปรผันตามแรงตึงผิว (σ_L) ซึ่งแปรผกผันกับความหนืด(μ_L) ดังนั้นขนาดฟองในสารละลายสี BY 1 จึงเล็กกว่าในสารละลายสี RB 5

สมการลาปลาซ (Hinze, 1955)

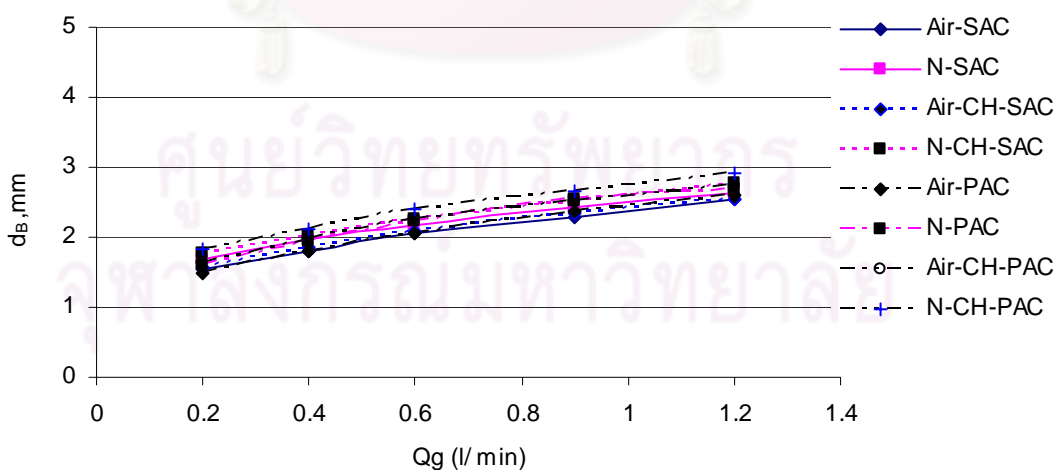
$$d_B = 2 \sigma_L / \Delta P \quad (4.12)$$

เมื่อ ΔP = ผลต่างของพลังงาน

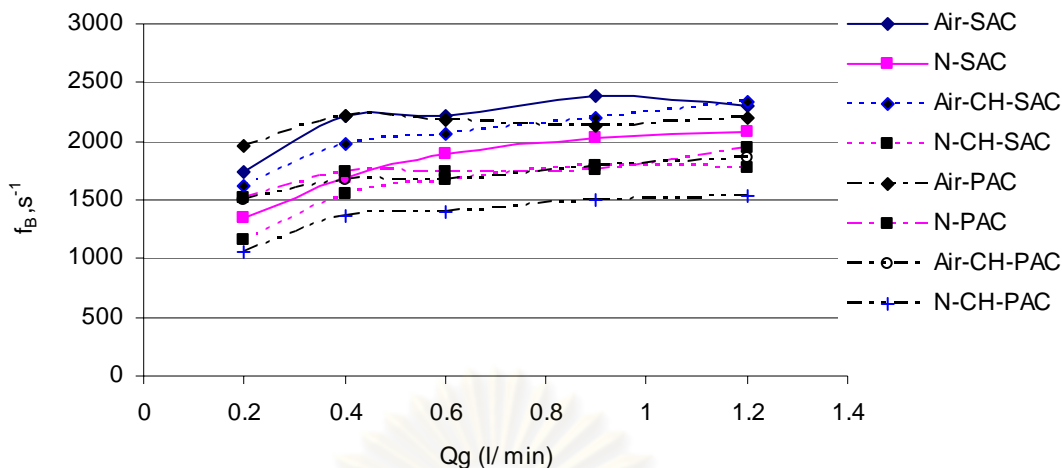
โดย
$$\mu_L \propto 1 / \sigma_L \quad (4.13)$$

จากรูปที่ 4.20 พบว่าในการดูดซับสี BY 1 ค่า f_B คงที่ในช่วง $1000 - 2500 \text{ s}^{-1}$ ซึ่งจะเห็นว่ามามีค่ามากกว่า f_B จากการดูดซับสี RB 5 ทั้งนี้ค่าที่ได้สัมพันธ์กับ d_B ของ BY 1 ที่มีขนาดในช่วงที่มีค่าต่ำกว่า RB 5 ซึ่งความถี่และความถี่การเกิดฟองมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 9 และสมการที่ 10 ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า d_B และ f_B ที่มีต่อการดูดซับสี BY 1 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่าการเพิ่ม Q_g แทบจะไม่มีผลกระทบต่อค่าการดูดซับสีของ BY 1 ยกเว้น ในสภาวะที่มีการเติม N_2 ของการดูดซับด้วยถ่าน PAC และ CH-PAC ซึ่งมีค่า q_c สูงสุดที่ Q_g เท่ากับ 0.4 L/min ทั้งนี้อาจเกิดจากการกวนด้วย N_2 ไม่มีผลทางปฏิกิริยาเคมีในการดูดซับแต่มีผลในด้านการลดฟิล์มน้ำรอบผิวถ่านและเพิ่มการกระจายตัวของถ่านให้สัมผัสสีได้ทั่วถึง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ความปั่นป่วนที่น้อยเกินไปจะลดการสัมผัสกันของสาร รวมทั้งถ้าความปั่นป่วนมากเกินไปก็จะรบกวนการเคลื่อนที่ของสีไปยังรูพรุนเนื่องจากขนาดอนุภาคสี BY 1 ที่เล็กกว่าสี RB 5 นั่นเอง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_g และ d_B ในการดูดซับสี BY 1



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_g และ f_B ในการดูดซับสี RB 5

จากการศึกษาผลกระทบของ d_B และ f_B ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทั้งด้านการกวนผสม เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนและเป็นการลดฟิล์มน้ำรอบผิวตัวกลางดูดซับทำให้การเคลื่อนที่ของสีย้อมสู่พื้นผิวดูดซับง่ายขึ้นรวมทั้งผลกระทบที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างฟองและพื้นผิวตัวกลางดูดซับ นอกจากนี้การศึกษารูปแบบที่เกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองกับพื้นผิวดูดซับ (a) และความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศ (G) เป็นอีกประเด็นที่น่าสนใจและควรศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบจากตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองทั้งในการเติมอากาศและออกซิเจนที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง Q_g และอัตราส่วน a_B/G มีที่มาจากสมการดังนี้

$$\text{พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (a)} = N_B \times \frac{S_B}{V_{\text{total}}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{\pi d_B^2}{A H_L + N_B V_B} \quad (4.14)$$

เมื่อ

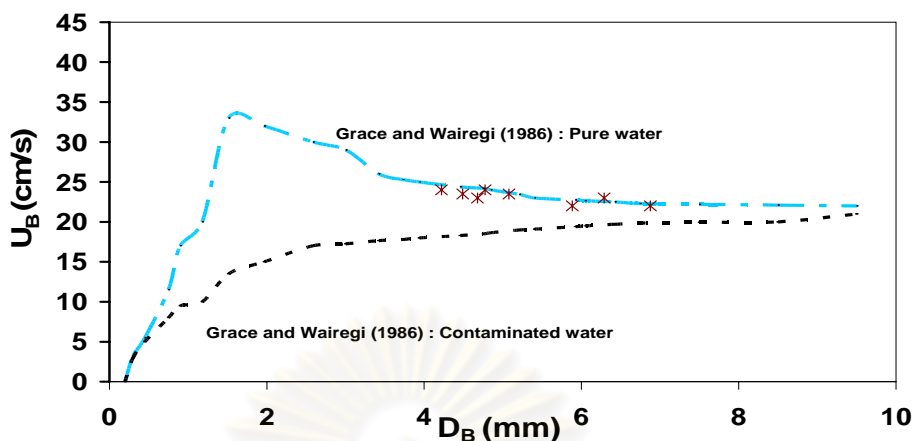
$$H_L = \text{ความสูงระดับน้ำ} = 0.25 \text{ m}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดถังปฏิกรณ์} = \pi * 0.05^2 / 4 \text{ m}^2$$

$$U_B = \text{ความเร็วฟอง (เมตร/วินาที) ซึ่งหาได้จากรูปที่ 4.17}$$

$$= f(d_B)$$

$$= (\text{Pure water} + \text{Contaminated water})/2$$



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟอง(D_B) และความเร็วฟอง(U_B) ในการดูดซับสี RB 5 (Grace and Wairegi, 1986)

และ ความปั่นป่วน (G) = $(P / \mu V)^{1/2}$
 $P = KQ_g \log((H_L + 10.33)/10.33)$

จากผลการศึกษาตามสมการดังกล่าวนี้ทำให้ทราบค่า a และ G เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน a/G ซึ่งเป็นตัวแปรที่รวมความสัมพันธ์ด้านการสัมผัสต่อความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในระบบที่มีอัตราการไหลของก๊าซต่างกันซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

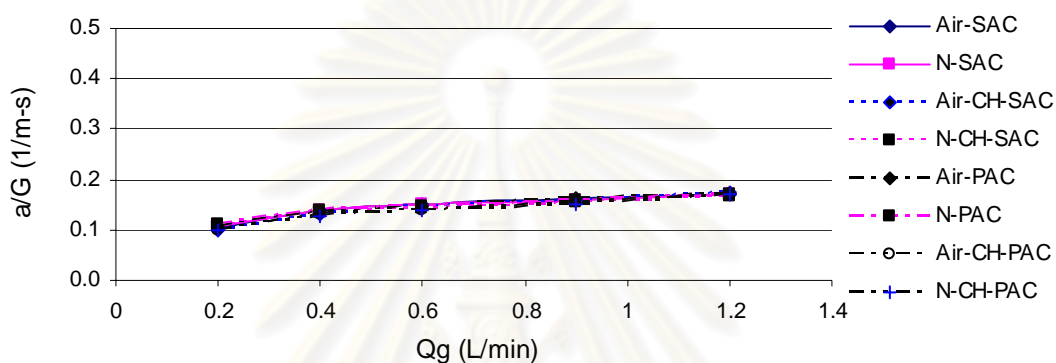
ตารางที่ 4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้พลังงาน (Qg) ต่ออัตราส่วน a / G ในการดูดซับที่

RB5

ตัวกลางดูดซับ Qg, L/min	U _B , ave cm/s	S _B mm ²	N _B	a m ⁻¹	P N-m/s	G s ⁻¹	a/G 1/m-s
SAC-Air							
0.2	23.9	14.38	680.110	19.780	0.016	189.786	0.104
0.4	24.0	15.90	1164.220	37.171	0.032	268.398	0.138
0.6	23.5	20.90	1182.927	49.294	0.048	328.719	0.150
0.9	23.3	26.77	1237.100	65.318	0.072	402.597	0.162
1.2	22.6	33.17	1229.352	79.474	0.096	464.879	0.171
CH - SAC-Air							
0.2	23.3	16.04	592.947	19.230	0.016	189.786	0.101
0.4	23.5	18.39	955.608	35.285	0.032	268.398	0.131
0.6	23.5	21.72	1116.735	48.356	0.048	328.719	0.147
0.9	23.0	29.21	1097.360	63.192	0.072	402.597	0.157
1.2	22.6	32.56	1264.034	80.214	0.096	464.879	0.173
CH - PAC-Air							
0.2	23.4	14.11	714.504	20.391	0.016	189.786	0.107
0.4	23.8	16.90	1073.164	36.424	0.032	268.398	0.136
0.6	23.5	21.88	1104.092	48.173	0.048	328.719	0.147
0.9	23.3	27.33	1199.741	64.654	0.072	402.597	0.161
1.2	22.6	32.76	1252.330	79.966	0.096	464.879	0.172
PAC-AIR							
0.2	24.0	15.34	614.293	19.055	0.016	189.786	0.100
0.4	23.8	18.69	922.488	34.632	0.032	268.398	0.129
0.6	23.4	24.79	920.480	45.496	0.048	328.719	0.138
0.9	23.0	30.18	1045.113	62.173	0.072	402.597	0.154
1.2	22.3	34.82	1162.124	78.815	0.096	464.879	0.170
SAC-N ₂							
0.2	23.5	13.45	763.458	20.773	0.016	189.786	0.109
0.4	24.0	15.48	1212.059	37.673	0.032	268.398	0.140
0.6	23.5	21.06	1169.278	49.103	0.048	328.719	0.149
0.9	23.3	28.07	1152.232	63.789	0.072	402.597	0.158
1.2	22.3	35.03	1151.717	78.579	0.096	464.879	0.169
CH - SAC- N ₂							
0.2	23.4	14.25	704.488	20.295	0.016	189.786	0.107
0.4	23.5	17.49	1030.362	36.182	0.032	268.398	0.135
0.6	23.5	22.55	1055.390	47.454	0.048	328.719	0.144
0.9	23.0	30.76	1015.349	61.577	0.072	402.597	0.153
1.2	21.8	37.59	1059.809	77.519	0.096	464.879	0.167
PAC- N ₂							
0.2	23.5	13.32	774.630	20.874	0.016	189.786	0.110
0.4	23.8	16.32	1130.643	37.063	0.032	268.398	0.138
0.6	23.5	22.05	1091.640	47.992	0.048	328.719	0.146
0.9	23.3	27.88	1163.870	64.003	0.072	402.597	0.159
1.2	22.6	32.76	1252.330	79.966	0.096	464.879	0.172
CH - PAC- N ₂							
0.2	24.0	15.48	606.029	18.969	0.016	189.786	0.100
0.4	23.6	19.78	851.924	33.842	0.032	268.398	0.126
0.6	23.4	25.33	891.617	45.015	0.048	328.719	0.137
0.9	23.0	30.96	1005.679	61.381	0.072	402.597	0.152
1.2	22.0	35.66	1133.973	78.725	0.096	464.879	0.169

จากข้อมูลดังตารางที่ 4.12 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด (a) ต่อ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น (G) เมื่ออัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยนแปลงไป

ซึ่งจากในการดูดซับที่ RB 5 ดังรูปที่ 4.22 พบว่า อัตราส่วน a/G เพิ่มขึ้นตาม Qg ที่เพิ่มขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงมีการสัมผัสกันระหว่างฟองก๊าซและผิวตัวกลางดูดซับมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ฟิล์มน้ำที่ลดลงมากขึ้นและ โอกาสที่จะเกิดผลกระทบจากออกซิเจนต่อการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ Qg เพิ่มขึ้น โอกาสที่ออกซิเจนจะถูกดูดซับด้วยตัวกลางดูดซับก็มีมากขึ้นด้วย โดยมีช่วงอัตราส่วน a/G ระหว่าง 0.1-0.18 1/m-s



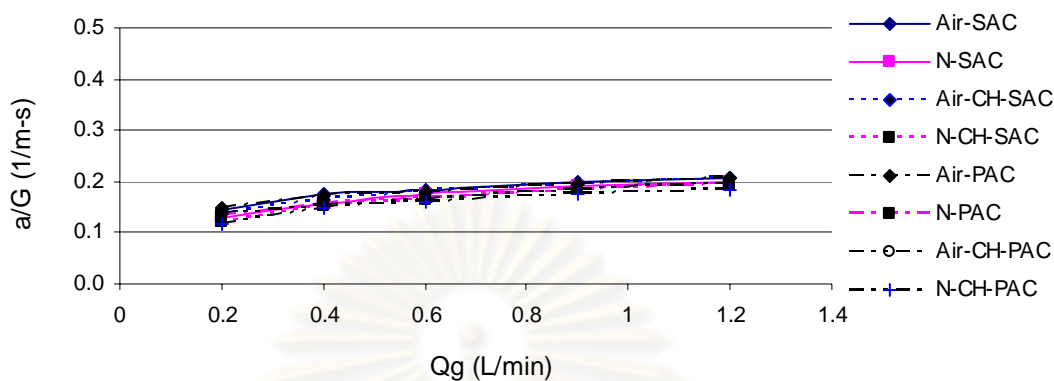
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของก๊าซ (Qg) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวฟองต่อความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ในการดูดซับที่ RB 5

ตารางที่ 4.13 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของก๊าซ (Qg) ต่ออัตราส่วน a / G ในการดูดซับสี

BY 1

ตัวกลางดูดซับ Qg, L/min	U _B , ave cm/s	S _B mm ²	N _B	a m ⁻¹	P N-m/s	G s ⁻¹	a/G 1/m-s
SAC-Air							
0.2	24.1	7.45	1806.069	27.204	0.016	189.786	0.143
0.4	23.9	10.06	2324.296	46.964	0.032	268.398	0.175
0.6	24.3	13.20	2285.134	60.159	0.048	328.719	0.183
0.9	24.0	16.47	2484.612	80.766	0.072	402.597	0.201
1.2	23.9	20.42	2411.855	96.204	0.096	464.879	0.207
CH - SAC-Air							
0.2	24.6	7.84	1638.386	25.981	0.016	189.786	0.137
0.4	24.5	10.86	2018.780	44.060	0.032	268.398	0.164
0.6	24.1	13.85	2136.780	59.024	0.048	328.719	0.180
0.9	24.0	17.34	2299.119	78.703	0.072	402.597	0.195
1.2	23.9	20.26	2440.454	96.583	0.096	464.879	0.208
CH - PAC-Air							
0.2	24.0	6.88	2013.882	28.019	0.016	189.786	0.148
0.4	24.6	10.06	2276.618	46.014	0.032	268.398	0.171
0.6	24.5	13.32	2240.468	59.566	0.048	328.719	0.181
0.9	24.0	17.79	2224.857	78.106	0.072	402.597	0.194
1.2	23.8	21.06	2338.557	96.167	0.096	464.879	0.207
PAC-AIR							
0.2	24.4	8.24	1559.580	25.994	0.016	189.786	0.137
0.4	24.4	12.19	1690.515	41.391	0.032	268.398	0.154
0.6	24.4	15.90	1710.690	54.263	0.048	328.719	0.165
0.9	23.9	19.94	1864.505	73.394	0.072	402.597	0.182
1.2	23.5	23.57	1954.338	89.985	0.096	464.879	0.194
SAC-N ₂							
0.2	24.4	8.86	1376.865	24.683	0.016	189.786	0.130
0.4	24.4	12.06	1734.127	42.023	0.032	268.398	0.157
0.6	24.1	14.65	1963.616	57.385	0.048	328.719	0.175
0.9	24.0	18.39	2105.324	76.427	0.072	402.597	0.190
1.2	23.8	21.88	2184.941	93.393	0.096	464.879	0.201
CH - SAC- N ₂							
0.2	24.6	9.73	1185.358	23.324	0.016	189.786	0.123
0.4	24.5	12.81	1576.063	40.570	0.032	268.398	0.151
0.6	24.6	15.90	1702.007	53.993	0.048	328.719	0.164
0.9	23.9	19.94	1874.266	73.766	0.072	402.597	0.183
1.2	23.4	24.27	1901.206	90.053	0.096	464.879	0.194
PAC- N ₂							
0.2	24.6	8.14	1548.496	25.497	0.016	189.786	0.134
0.4	24.4	11.82	1788.315	42.456	0.032	268.398	0.158
0.6	24.3	15.48	1799.345	55.552	0.048	328.719	0.169
0.9	23.9	20.26	1830.340	73.186	0.072	402.597	0.182
1.2	23.8	22.89	2042.491	91.318	0.096	464.879	0.196
CH - PAC- N ₂							
0.2	24.6	10.40	1071.947	22.555	0.016	189.786	0.119
0.4	24.1	13.98	1404.362	39.435	0.032	268.398	0.147
0.6	24.0	17.94	1457.069	52.127	0.048	328.719	0.159
0.9	23.8	22.38	1584.087	69.977	0.072	402.597	0.174
1.2	23.3	26.77	1649.467	86.177	0.096	464.879	0.185

จากการดูดซับสี BY 1 ดังรูปที่ 4.23 พบว่า อัตราส่วน a/G มีค่าเพิ่มขึ้นตาม Q_g ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.15-0.2 1/m-s ซึ่งสูงกว่าสี RB 5 ดังนั้นผลกระทบทางอุทกพลศาสตร์จากการเติมอากาศจึงมีโอกาสเกิดกับสี BY 1 มากกว่า RB 5



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวฟองต่อความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ในการดูดซับสี BY 1

จากผลการศึกษาอัตราส่วน a/G ที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับสูงสุดบนถ่าน PAC ซึ่งสี RB 5 ดูดซับได้ดีที่สุดที่ Q_g จากการเติมก๊าซไนโตรเจนที่มีค่าเท่ากับ 1.2 L/min ซึ่งมีอัตราส่วน a/G ประมาณ 0.18 1/m-s และสำหรับสี BY 1 เกิดการดูดซับได้ดีที่สุดที่ Q_g จากการเติมอากาศเท่ากับ 0.4 L/min และมีอัตราส่วน a/G ประมาณ 0.18 1/m-s ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การปั่นกววนด้วยก๊าซควรกำหนดด้วยตัวแปร a/G มากกว่า Q_g เนื่องจาก a/G เท่ากันสามารถส่งผลให้ความสามารถในการกวนผสมที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด

4.5 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

4.5.1 การศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ RB 5 และสี BY 1 โดยทำการศึกษาอุณหภูมิ 25°C, 40°C และ 55°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมอุณหภูมิน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยทั่วไป (รัชนีชัย, 2550) ภายใต้การกวนที่ความเร็วรอบ 200 rpm และเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min โดยควบคุมค่าพีเอช 7 และค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์

การศึกษาค่าของอุณหภูมิที่มีต่อจลนศาสตร์ในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ RB 5 ในรูปแบบอันดับปฏิกิริยา สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร ภายใต้การกวนผสมด้วยการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm (stirrer) และเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min แสดงดังตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	First-order		Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		k _{L a} (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC							
25	-0.0060	0.075	1x10 ⁻⁵	0.646	1x10 ⁻⁵	0.177	0.057
40	-0.0002	0.173	6x10 ⁻⁶	0.680	6x10 ⁻⁶	0.049	0.016
55	-0.0001	0.091	2x10 ⁻⁵	0.814	2x10 ⁻⁵	0.046	0.015
CH -SAC							
25	-0.0071	0.624	8x10 ⁻⁵	0.764	8x10 ⁻⁵	0.088	0.147
40	-0.0005	0.419	2x10 ⁻⁵	0.668	2x10 ⁻⁵	0.068	0.114
55	-0.0005	0.589	2x10 ⁻⁵	0.722	2x10 ⁻⁵	0.035	0.058
PAC							
25	-0.0011	0.737	2x10 ⁻⁵	0.842	2x10 ⁻⁵	0.055	0.023
40	-0.0007	0.615	2x10 ⁻⁵	0.716	2x10 ⁻⁵	0.076	0.031
55	-0.0005	0.538	1x10 ⁻⁵	0.717	1x10 ⁻⁵	0.087	0.036
CH-PAC							
25	-0.0008	0.617	1x10 ⁻⁵	0.792	1x10 ⁻⁵	0.070	0.034
40	-0.0004	0.554	8x10 ⁻⁶	0.583	8x10 ⁻⁶	0.033	0.016
55	-0.0004	0.467	6x10 ⁻⁶	0.474	6x10 ⁻⁶	0.029	0.014

ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	First-order		Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		k _{L a} (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC							
25	-0.0001	0.188	5x10 ⁻⁶	0.192	5x10 ⁻⁶	0.026	0.009
40	-3x10 ⁻⁵	0.013	2x10 ⁻⁶	0.070	2x10 ⁻⁶	0.021	0.007
55	-5x10 ⁻⁵	0.069	5x10 ⁻⁶	0.192	5x10 ⁻⁶	0.019	0.006
CH -SAC							
25	-0.0011	0.521	8x10 ⁻⁵	0.628	8x10 ⁻⁵	0.112	0.189
40	0.0004	0.350	2x10 ⁻⁵	0.899	2x10 ⁻⁵	0.078	0.131
55	0.0007	0.712	4x10 ⁻⁵	0.876	4x10 ⁻⁵	0.046	0.077
PAC							
25	-0.0006	0.559	2x10 ⁻⁵	0.623	2x10 ⁻⁵	0.079	0.032
40	-0.0006	0.655	1x10 ⁻⁵	0.756	1x10 ⁻⁵	0.063	0.026
55	-0.0003	0.624	5x10 ⁻⁶	0.743	5x10 ⁻⁶	0.045	0.019
CH-PAC							
25	-0.0004	0.608	7x10 ⁻⁶	0.648	7x10 ⁻⁶	0.051	0.024
40	-0.0004	0.554	8x10 ⁻⁶	0.583	8x10 ⁻⁶	0.036	0.017
55	-0.0004	0.467	6x10 ⁻⁶	0.469	6x10 ⁻⁶	0.027	0.013

จากค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยา(k) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร($k_L a$) ในการดูดซับสี RB 5 กรณีการกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศดังตารางที่ 4.14 และ 4.17 ตามลำดับซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- จากค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ของการดูดซับสี RB 5 ทุกระดับอุณหภูมิเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มีผลต่อประเภทอันดับการเกิดปฏิกิริยา

- การกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า $k_L a$ พบว่าค่า $k_L a$ มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งบ่งบอกว่าการเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลง ทั้งนี้อาจเกิดจากภายในรูพรุนมีก๊าซที่เกิดจากกระบวนการผลิตแฝงตัวอยู่ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ก๊าซเกิดการขยายตัวและเกิดความดันขึ้นภายในโพรงซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนออกจากตัวกลางดูดซับ ในขณะที่การดูดซับที่ดำเนินอยู่เป็นเพียงผลจากแรงดึงดูดระหว่างผิวภายนอกซึ่งทำให้ค่า $k_L a$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้ยกเว้น PAC ในกรณีการกวนด้วย stirrer ซึ่งจะเห็นว่ามีค่า $k_L a$ ที่ 25°C เท่ากับ 0.055 ซึ่งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 40°C และ 55°C เนื่องจาก PAC เป็นถ่านที่มีรูพรุนมากและปริมาตรสูงดังนั้นจึงสามารถรองรับการขยายตัวของก๊าซภายในได้ ดังนั้นการลดลงของฟิล์มน้ำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 40°C และ 55°C

- นอกจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจาก RB 5 เป็นสีที่มีการคายซับได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น (โชติรส, 2545) ซึ่งมีส่วนทำให้ $k_L a$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม BY 1 ในรูปแบบอันดับปฏิกิริยาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารแสดงดังตารางที่ 4.16 และตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	First-order		Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		K _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC							
25	-0.0010	0.155	3x10 ⁻⁵	0.578	3x10 ⁻⁵	0.182	0.059
40	-0.0004	0.283	2x10 ⁻⁵	0.584	2x10 ⁻⁵	0.081	0.026
55	-0.0005	0.431	3x10 ⁻⁵	0.604	3x10 ⁻⁵	0.059	0.019
CH -SAC							
25	-0.0030	0.545	2x10 ⁻⁴	0.871	2x10 ⁻⁴	0.215	0.360
40	-0.0013	0.438	9x10 ⁻⁵	0.661	9x10 ⁻⁵	0.156	0.262
55	-0.0017	0.630	2x10 ⁻⁴	0.886	2x10 ⁻⁴	0.142	0.238
PAC							
25	-0.0013	0.504	4x10 ⁻⁵	0.776	4x10 ⁻⁵	0.204	0.084
40	-0.0024	0.613	2x10 ⁻⁴	0.836	2x10 ⁻⁴	0.272	0.112
55	-0.0034	0.768	3x10 ⁻⁴	0.954	3x10 ⁻⁴	0.232	0.095
CH-PAC							
25	-0.0019	0.644	6x10 ⁻⁵	0.818	6x10 ⁻⁵	0.178	0.086
40	-0.0016	0.558	7x10 ⁻⁵	0.791	7x10 ⁻⁵	0.238	0.115
55	-0.0015	0.402	9x10 ⁻⁵	0.651	9x10 ⁻⁵	0.348	0.168

ตารางที่ 4.17 ค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	First-order		Second-order		k (L/mg.min)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร	
	slope	R ²	slope	R ²		K _L a (min ⁻¹)	k _L (L/m ² .hr)
SAC							
25	-0.0006	0.148	5x10 ⁻⁵	0.202	5x10 ⁻⁵	0.194	0.063
40	-0.0005	0.216	2x10 ⁻⁵	0.617	2x10 ⁻⁵	0.110	0.036
55	-0.0004	0.230	2x10 ⁻⁵	0.314	2x10 ⁻⁵	0.074	0.024
CH -SAC							
25	-0.0017	0.470	2x10 ⁻⁴	0.633	2x10 ⁻⁴	0.190	0.319
40	-0.0015	0.550	1x10 ⁻⁴	0.793	1x10 ⁻⁴	0.139	0.233
55	-0.0020	0.568	2x10 ⁻⁴	0.723	2x10 ⁻⁴	0.140	0.235
PAC							
25	-0.0015	0.453	9x10 ⁻⁵	0.663	9x10 ⁻⁵	0.316	0.130
40	-0.0024	0.613	2x10 ⁻⁴	0.836	2x10 ⁻⁴	0.327	0.135
55	-0.0034	0.768	3x10 ⁻⁴	0.954	3x10 ⁻⁴	0.383	0.158
CH-PAC							
25	-0.0016	0.673	7x10 ⁻⁵	0.733	7x10 ⁻⁵	0.267	0.129
40	-0.0016	0.558	7x10 ⁻⁵	0.791	7x10 ⁻⁵	0.233	0.112

55	-0.0015	0.402	9×10^{-5}	0.651	9×10^{-5}	0.267	0.129
----	---------	-------	--------------------	-------	--------------------	-------	-------

จากค่าคงที่ของอันดับปฏิกิริยาและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในการดูดซับที่ BY 1 ที่มีการกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศดังตารางที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ พบว่าการดูดซับที่ BY 1 เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนทุกระดับอุณหภูมิซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- กรณีการกวนด้วย stirrer จากตารางที่ 4.16 พบว่าค่า $k_L a$ ของถ่าน SAC และ CH-SAC มีค่า $k_L a$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของการดูดซับ RB 5 เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของก๊าซภายในรูพรุน
- สำหรับถ่าน PAC กรณีการกวนด้วย stirrer ซึ่งมีค่า $k_L a$ ที่อุณหภูมิ $40^\circ\text{C} > 55^\circ\text{C} > 25^\circ\text{C}$ โดยสาเหตุที่ทำให้ที่อุณหภูมิ 55°C มี $k_L a$ น้อยกว่า 40°C เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากแรงดันก๊าซภายในรูพรุนที่มากกว่าซึ่งเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ภายในตัวกลางดูดโดยจะเกิดขึ้นได้มากขึ้นตามความร้อนที่เพิ่มขึ้น
- CH-PAC กรณีการกวนด้วย stirrer มีค่า $k_L a$ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสปีดการดูดซับได้ดีขึ้น (โชติรส, 2545) แสดงว่าที่ BY 1 จะเคลื่อนที่ซึมผ่านไปยังรูพรุนได้ดีขึ้นแต่จะคายซับได้ดีที่อุณหภูมิมากกว่า 80°C นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าไคโตซานที่อุดต้นรูพรุนจะมีส่วนช่วยลดแรงดันจากก๊าซที่เกิดภายในรูพรุนทำให้ $k_L a$ มีค่าสูงขึ้น
- กรณีการเติมอากาศ จากตารางที่ 4.17 พบว่า $k_L a$ จากการดูดซับ BY 1 ของ SAC และ CH-SAC ยังคงลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีการกวนด้วย stirrer โดยที่การเติมอากาศมีผลให้ค่า $k_L a$ สูงกว่ากรณีการกวนด้วย stirrer สำหรับการดูดซับของถ่าน PAC เนื่องจากการเติมอากาศเป็นการลดความแตกต่างของความดันระหว่างสถานะแวดล้อมรอบระบบและรูพรุนภายในตัวกลางดูดซับอีกทั้งที่ BY 1 ยังสามารถถูกดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูงทำให้ค่า $k_L a$ เพิ่มขึ้น

4.5.2 การศึกษาผลจากอุณหภูมิที่มีต่อไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี่ข้อม RB 5 เมื่อความเข้มข้นสี่ข้อมเริ่มต้น (C_0) ต่างกันคือ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 mg/L สำหรับ SAC และ CH-SAC และที่ความเข้มข้น 130, 150, 180, 210, 250 และ 300 mg/L สำหรับ PAC และ CH-PAC โดยทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศ ดังรูปที่ 4.24

จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับที่ RB 5 ด้วยถ่าน SAC ที่มีการกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศที่ 25°C ให้ผลการดูดซับดีกว่าอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากสปีดการเคลื่อนที่ของก๊าซที่คายซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง (โชติรส, 2545) และจากผลการทดลองจะเห็นว่า การกวนด้วย stirrer ให้ผลการดูดซับดีกว่าการเติมอากาศเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากที่ RB 5 มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ดังนั้นการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มต้องใช้เวลาและแรงผลักดันภายในระบบสูง ดังนั้นความปั่นป่วนจาก

การเติมอากาศอาจไปรบกวนการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มหรือลดแรงผลักดันดังกล่าวทำให้ความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

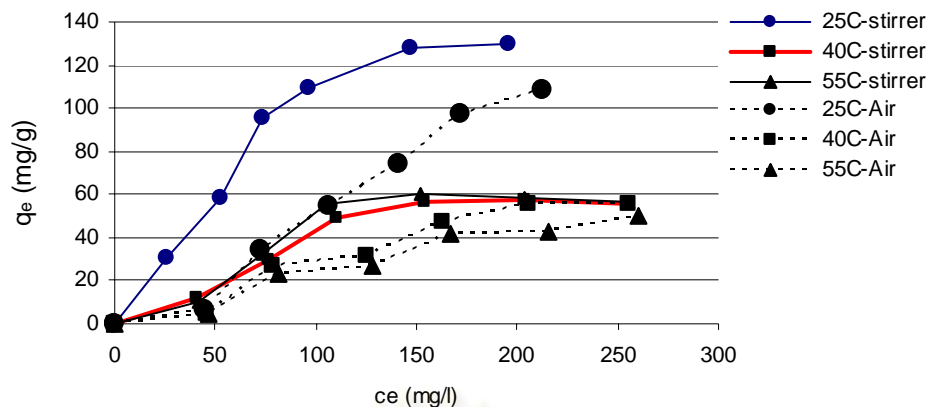
จากผลการดูดซับ RB 5 บน CH-SAC พบว่าที่อุณหภูมิ 40°C และ 55°C การเติมอากาศให้ผลการดูดซับดีกว่าการกวนด้วย stirrer เนื่องจากไคโตซานเป็นสารที่สามารถทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิห้องดังนั้นการเติมอากาศที่อุณหภูมิสูงฟองก๊าซจะเป็นตัวระบายความร้อนที่ดีทำให้ไคโตซานทำงานดีขึ้น

สำหรับการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่าน PAC ที่กวนด้วย stirrer พบว่าที่ C_0 ที่มีค่าต่ำกว่า 210 mg/L ภายใต้สถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 40°C จะให้ผลการดูดซับไม่แตกต่างกันแต่เมื่อ C_0 มากกว่า 210 mg/L พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าที่ 40°C ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการดูดซับให้เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่หากอุณหภูมิเพิ่มสูงในระดับหนึ่งจะทำให้สี RB 5 เกิดการคายซับได้ดีขึ้นส่งผลให้ที่ 55°C มีค่า q_c ที่ลดลง

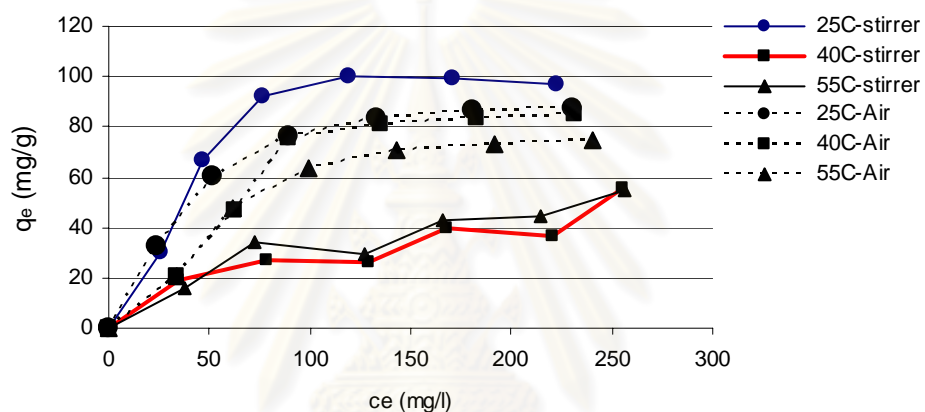
เมื่อเปรียบเทียบผลจากอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของ PAC พบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลกับ PAC น้อยกว่าถ่าน SAC, CH-SAC และ CH-PAC เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวรวมทั้งปริมาตรโพรงที่สูงกว่าถ่านชนิดอื่นซึ่งบ่งบอกว่ามี Driving force และแรงวนเคอร์วาลส์ที่มากกว่าถ่านอื่นซึ่งแรงดังกล่าวเป็นแรงหลักที่ทำให้เกิดการดูดซับ

สำหรับการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่าน CH-PAC พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าที่ 40°C และ 55°C ทั้งกรณีการกวนด้วย stirrer และการเติมอากาศ เนื่องจากไคโตซานที่เคลือบผิว CH-PAC ถึงแม้จะส่งผลต่อการดูดซับน้อยเมื่อเทียบกับผลจากรูพรุนแต่ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ในขณะที่เมื่อ C_0 สูงมากกว่า 300 mg/L ผลจาก ΔC ที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างภายในตัวกลางดูดซับและสภาพแวดล้อมของสารละลายทำให้เกิด Driving force ส่งผลให้สี RB 5 เคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนมากขึ้น

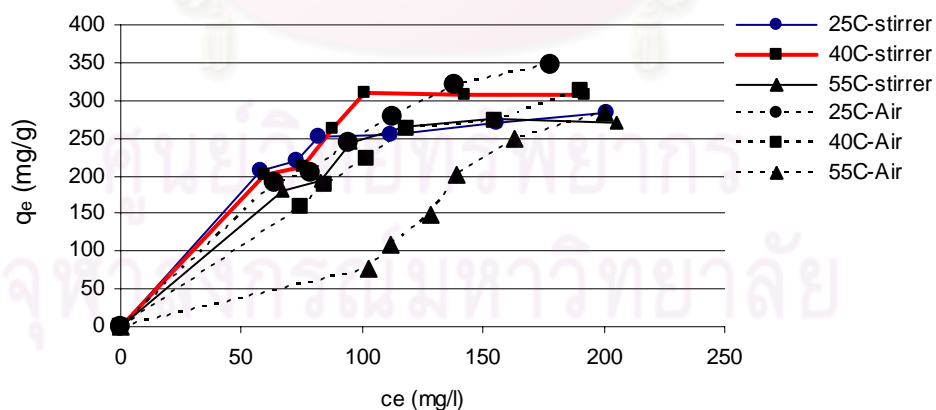
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) SAC

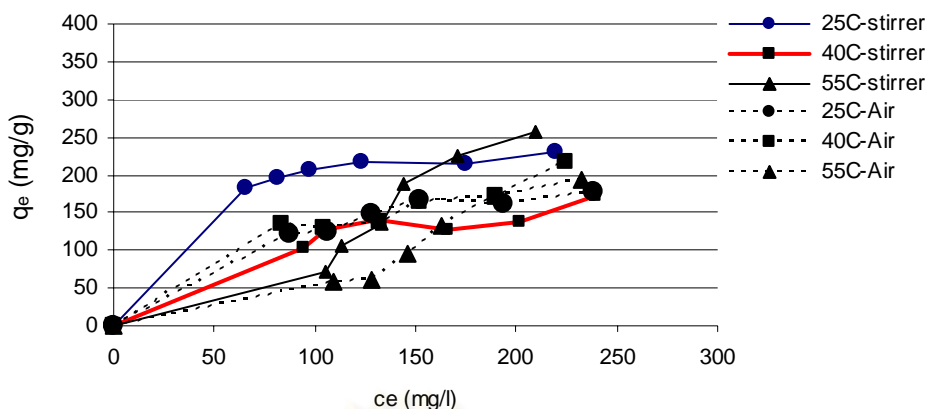


(ข) CH-SAC



(ค) PAC

รูปที่ 4.24 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB 5 (q_e) ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C และ 55 °C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.24 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับสีของ RB 5 (q_e) ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C และ 55° C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ

ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C, 55° C

ตัวกลางดูดซับ Temp, C	Langmuir			Freundlich		
	q_m	$b(\text{mg/g})$	R^2	$K(\text{mg/L})$	$1/n$	R^2
SAC						
25	130.02	0.02	0.973	3.186	0.748	0.880
40	55.74	0.032	0.832	0.646	0.485	0.718
55	56.17	0.343	0.716	0.559	0.386	0.559
CH - SAC						
25	97.13	0.14	0.905	7.842	0.507	0.755
40	55.74	0.001	0.837	3.517	0.460	0.821
55	55.18	0.001	0.899	2.277	0.566	0.855
PAC						
25	282.46	0.034	0.919	82.186	0.237	0.879
40	307.69	0.040	0.819	42.983	0.392	0.725
55	269.47	0.045	0.847	38.371	0.384	0.757
CH - PAC						
25	230.69	0.046	0.923	93.154	0.168	0.871
40	172.96	0.001	0.693	19.422	0.385	0.693
55	258.00	0.001	0.868	0.019	1.808	0.909

จากค่า R^2 ของการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.18 พบว่าการกวนด้วย stirrer เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งจากค่า q_m พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ยกเว้นถ่าน CH-PAC ที่อุณหภูมิ 55° C ที่มีการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลที่ทำให้ค่า q_m ที่อุณหภูมิ 55° C มีค่าสูงกว่าสภาวะอื่น

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	Langmuir, RB5			Freundlich, RB5		
	q _m	b(mg/g)	R ²	K(mg/L)	n	R ²
SAC						
25	108.76	0.002	0.864	0.014	1.721	0.913
40	55.6	0.007	0.860	0.050	1.319	0.862
55	49.75	0.008	0.878	0.056	1.260	0.868
CH - SAC						
25	87.37	0.042	0.979	9.899	0.424	0.884
40	85.28	0.049	0.933	2.176	0.715	0.830
55	74.41	0.031	0.925	2.985	0.621	0.831
PAC						
25	347.91	0.007	0.975	13.301	0.637	0.975
40	312.47	0.014	0.942	9.226	0.679	0.922
55	284.76	0.003	0.887	0.011	1.948	0.916
CH - PAC						
25	176.78	0.039	0.900	21.984	0.385	0.875
40	215.96	0.003	0.734	14.471	0.482	0.818
55	193.98	0.003	0.917	0.011	1.824	0.930

สำหรับกรณีการเติมอากาศดังตารางที่ 4.19 พบว่ามีการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm ยกเว้นถ่าน PAC ที่อุณหภูมิ 55 °C และ CH-PAC ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 55 °C ที่มีการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างพลังงานของระบบกายรูปหุวนและสารละลายที่เกิดจากพลังงานจลน์ของอนุภาคสีที่มีการเติมอากาศและแรงผลักดันจากก๊าซในช่องว่างที่ขับออกเมื่ออุณหภูมิสูง

เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสีข้อมสามารถอธิบายด้วยค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ซึ่งได้จากสมการ (Agrawal, 2004)

$$K_c = C_A / C_e \quad (4.15)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_c \quad (4.16)$$

$$\text{Log } K_c = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (4.17)$$

เมื่อ

K_c = ค่าคงที่สมดุล

T = อุณหภูมิเคลวิน

C_e = ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/L)

C_A = ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

ΔG = ค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ

ΔH = ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี

ΔS = ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

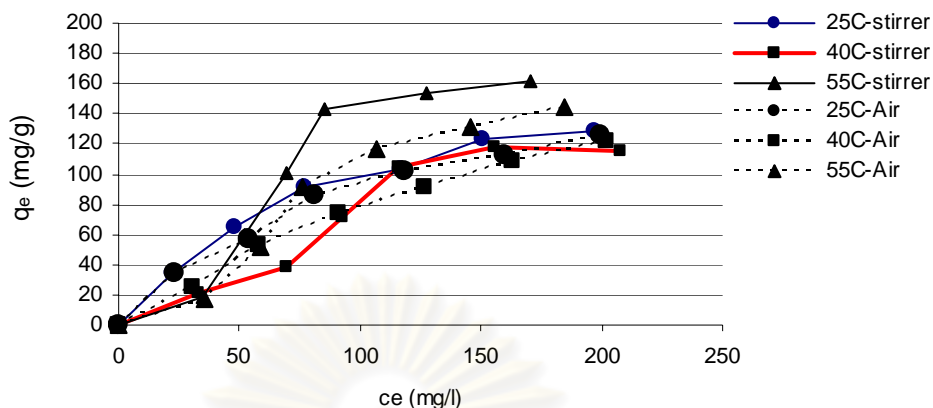
R = ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.31 จูล. โมล-เคลวิน-ลิตร

ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่อุณหพลศาสตร์ในการดูดซับสี RB 5 ของตัวกลางดูดซับที่มีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C

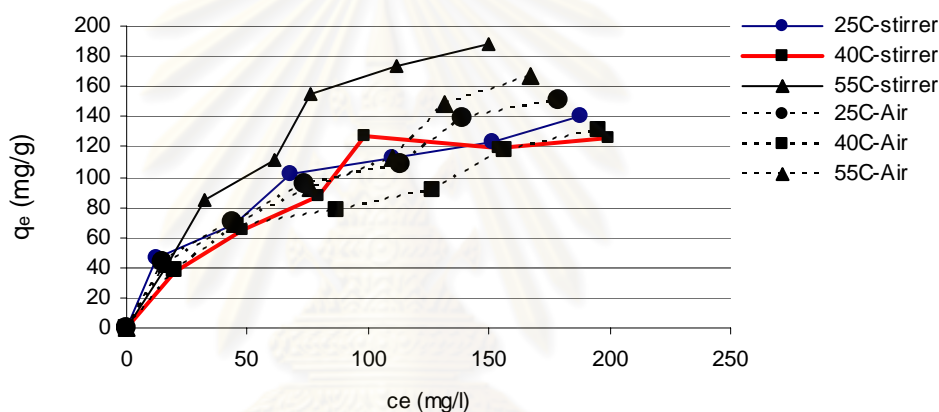
ตัวกลาง ดูดซับ	Stirrer				Air				
	Temp, °C	Kc	ΔH KJ/mol	ΔG J/mol	ΔS KJ/mol.K	Kc	ΔH KJ/mol	ΔG J/mol	ΔS KJ/mol.K
SAC	25	0.693	-29.398	171.392	29.398	0.416	-25.176	245.766	0.041
	40	0.229		723.651		0.200		305.518	
	55	0.238		737.627		0.165		174.812	
CH - SAC	25	0.485	-26.487	338.206	26.487	0.401	-6.073	119.273	0.006
	40	0.169		872.613		0.380		252.935	
	55	0.186		865.940		0.320		76.508	
PAC	25	0.687	-2.231	175.658	2.231	0.799	-14.914	-329.794	0.028
	40	0.769		128.645		0.658		-336.170	
	55	0.629		238.304		0.459		-322.064	
CH - PAC	25	0.518	-7.104	307.087	7.104	0.325	-4.938	-129.651	0.013
	40	0.284		617.773		0.360		-174.374	
	55	0.405		465.098		0.269		-289.813	

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสี RB 5 เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาการดูดซับสี RB 5 ดังตารางที่ 4.20 เพื่อใช้อธิบายรูปแบบความต้องการระดับพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาในการดูดซับที่เป็นปฏิกิริยาทางเคมี พบว่าทุกสภาวะการดูดซับสี RB 5 จากค่า ΔH ซึ่งมีค่าติดลบบ่งบอกถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ q_m ลดลง ซึ่ง ΔH เป็นเพียงแนวโน้มความเหมาะสมของระดับความร้อนที่เหมาะสมโดยเฉลี่ยทุกอุณหภูมิเท่านั้นซึ่งในความเป็นจริงแล้วอาจมีผลกระทบบางอย่างเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย จากค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ (ΔG) ที่เป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สามารถเกิดได้เองโดยต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับค่าเอน

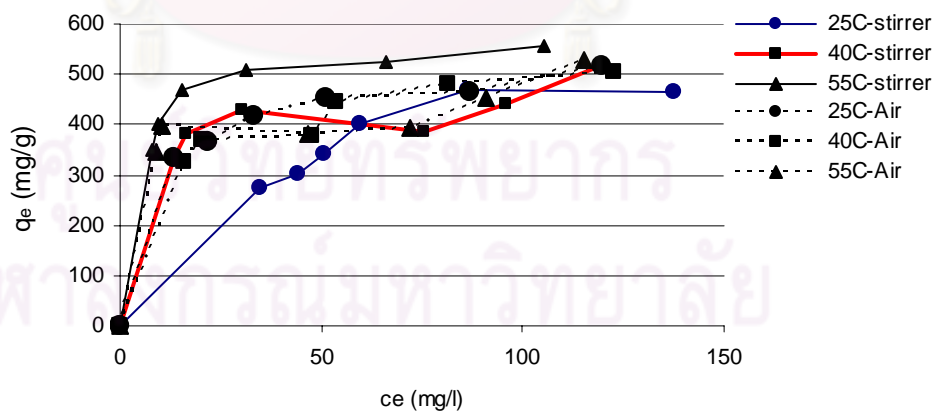
ทาลปี (ΔS) ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการสลายพันธะซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่สี RB 5 จะเกิดการคายซับเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น(โชติรส, 2545)



(ก) SAC

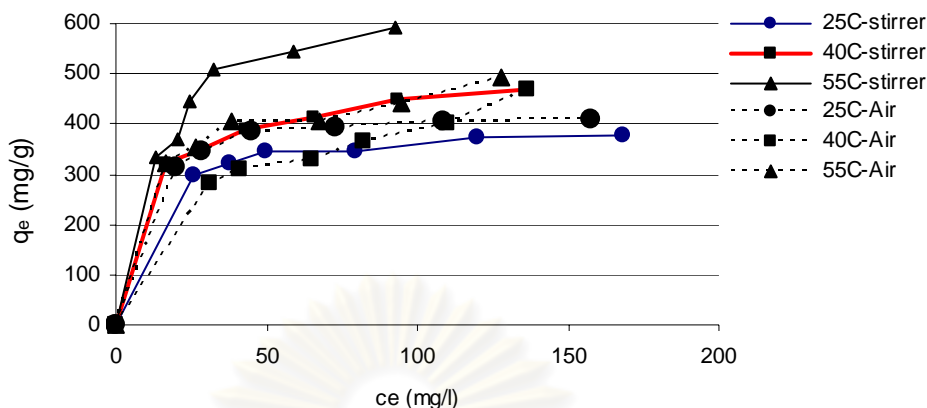


(ข) CH-SAC



(ค) PAC

รูปที่ 4.25 ความสามารถในการดูดซับสีเขียว BY 1 (q_e) ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C และ 55 °C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ



(จ) CH-PAC

รูปที่ 4.25 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับสีข้อม BY 1 (q_e) ที่อุณหภูมิ 25° C, 40° C และ 55° C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีข้อม BY 1 ดังรูปที่ 4.25 พบว่าถ่านทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการดูดซับสี BY 1 ได้ดีที่อุณหภูมิ 55° C ภายใต้การกวนด้วย stirrer และรองลงมาคือการเติมอากาศเพราะผลจากฟองก๊าซที่ช่วยระบายความร้อนทำให้ความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า stirrer และจากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 25° C และ 40° C การกวนผสมทั้งสองประเภทให้ความสามารถในการดูดซับที่ไม่แตกต่างกันมากซึ่งบ่งบอกว่าในการใช้งานจริงสามารถใช้การกวนผสมโดยการเติมอากาศแทนการใช้ stirrer ได้ซึ่งจะมีความสะดวกต่อการใช้งานมากกว่า

เมื่อพิจารณาการดูดซับบน PAC พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับกรณีการเติมอากาศซึ่งเหมือนกรณีการดูดซับสี RB 5 เนื่องจากฟองอากาศจะทำให้เกิดการระบายความร้อนและแรงดึงดูดหลักที่ทำให้เกิดการดูดซับคือ Capillary force และแรงแวนเดอร์วาลส์ รวมทั้งออกซิเจนอาจรับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวทำให้พื้นผิว PAC มีความเป็นบวกและเกิดแรงผลัก BY 1 มากขึ้นทำให้การดูดซับกรณีเติมอากาศน้อยกว่ากรณีกวนด้วย stirrer

ตารางที่ 4.21 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี BY 1 ของ
ตัวกลางดูดซับที่มีการกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	b(mg/g)	R ²	K(mg/L)	n	R ²
SAC						
25	128.23	0.009	0.996	0.559	1.017	0.964
40	115.33	0.031	0.972	0.532	1.054	0.921
55	161.43	0.040	0.849	0.318	1.264	0.817
CH - SAC						
25	140.41	0.011	0.974	15.856	0.415	0.968
40	126.04	0.016	0.961	7.523	0.559	0.919
55	187.85	0.007	0.960	6.792	0.687	0.953
PAC						
25	464.46	0.018	0.932	65.283	0.419	0.851
40	516.18	0.310	0.647	255.211	0.126	0.619
55	556.43	0.333	0.941	280.350	0.156	0.839
CH - PAC						
25	375.82	0.121	0.965	207.683	0.119	0.927
40	467.64	0.051	0.972	192.088	0.184	0.969
55	593.13	0.120	0.943	161.510	0.299	0.904

ตารางที่ 4.22 ค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสี BY 1 ของ
ตัวกลางดูดซับที่มีการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	b(mg/g)	R ²	K(mg/L)	n	R ²
SAC						
25	125.65	0.01	0.990	5.135	0.615	0.983
40	122.06	0.004	0.987	1.664	0.824	0.976
55	144.16	0.011	0.899	0.287	1.244	0.880
CH - SAC						
25	151.42	0.011	0.969	10.842	0.504	0.967
40	130.87	0.017	0.976	8.710	0.506	0.968
55	166.44	0.007	0.958	7.593	0.592	0.980
PAC						
25	515.54	0.094	0.965	205.258	0.193	0.963
40	505.92	0.118	0.844	7.805	0.206	0.892
55	528.02	0.719	0.437	3.481	0.098	0.542
CH - PAC						
25	407.66	0.264	0.970	230.569	0.120	0.853
40	467.2	0.014	0.894	94.146	0.314	0.945
55	491.71	0.101	0.918	193.063	0.187	0.938

จากค่า R² ของการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสี BY 1 ที่มีการกวนผสมด้วย stirrer และการเติมอากาศดังตารางที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ พบว่าการกวนผสมด้วย stirrer มีการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี ในขณะที่การเติมอากาศส่วนใหญ่เป็นการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm ยกเว้นการดูดซับด้วยถ่าน PAC และ CH-PAC ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 55 °C ที่มีการดูดซับเป็นแบบ Freundlich Isotherm ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพของระบบการดูดซับที่ส่งผลให้เกิดการดูดซับทางกายภาพเพิ่มขึ้นมา ทั้งนี้ จากคุณสมบัติทางกายภาพของถ่าน PAC และ CH-PAC ที่มีปริมาตรโพรงและพื้นที่ผิวสูงกว่า SAC และ CH-SAC ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมีผลต่อการดูดซับ โดยเฉพาะในสถานะที่มีความปั่นป่วนจากการเติมอากาศซึ่งที่อุณหภูมิสูงทำให้พลังงานจลน์ของอนุภาคสีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการจับตัวหรือรวมตัวกันในที่นี้หมายถึงการดูดซับจะทำให้อนุภาคสีมีพลังงานที่ลดลงและเสถียรขึ้น ซึ่งประกอบกับแรงดึงดูดชนิด Capillary force ที่มีมากใน PAC และ CH-PAC ทำให้เกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้น

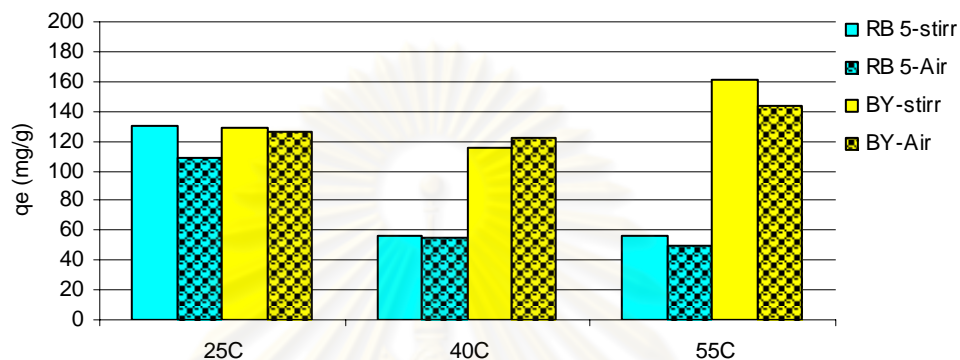
ตารางที่ 4.23 ค่าคงที่อุณหพลศาสตร์ในการดูดซับสี BY 1 ของตัวกลางดูดซับที่มีกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และการเติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C

ตัวกลางดูดซับ Temp, °C	Stirrer				Air			
	Kc	ΔH KJ/mol	ΔG J/mol	ΔS KJ/mol.K	Kc	ΔH KJ/mol	ΔG J/mol	ΔS KJ/mol.K
SAC								
25	0.637	9.416	210.386	-9.416	0.591	14.551	245.766	0.041
40	0.541		301.420		0.536		305.518	
55	0.913		47.066		0.712		174.812	
CH - SAC								
25	0.705	14.406	163.107	-14.568	0.775	2.612	119.273	0.006
40	0.786		118.111		0.597		252.935	
55	1.215		-99.887		0.862		76.508	
PAC								
25	1.682	11.261	-242.938	-11.261	2.026	-2.138	-329.794	-0.013
40	1.797		-287.516		1.985		-336.170	
55	2.563		-483.668		1.871		-322.064	
CH - PAC								
25	1.149	26.741	-64.739	-26.741	1.320	7.688	-129.651	-0.013
40	1.669		-251.362		1.427		-174.374	
55	3.098		-581.212		1.757		-289.813	

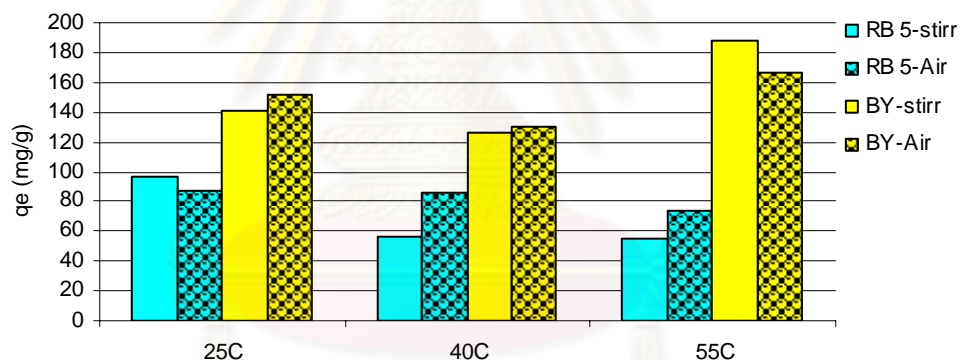
จากรูปแบบความต้องการระดับพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาในการดูดซับสี BY 1 ดังตารางที่ 4.23 พบว่า ΔH โดยรวมมีค่าบวก ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นชนิดดูดความร้อนที่มีการดูดซับโดยเฉลี่ยทุกอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่ม q_m ให้สูงขึ้น ทั้งนี้ยกเว้นการดูดซับสี BY 1 ของ PAC ที่มีค่า ΔH เท่ากับ -2.138 แสดงว่าเป็นการดูดซับชนิดคายความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับ ΔG ที่เป็นลบบ่งบอกว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เองไม่ต้องมีการเพิ่มความร้อนแก่ระบบซึ่งเมื่อพิจารณาค่า ΔS ที่มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่ามีการสร้างพันธะเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจากตารางที่ 4.23 พบว่าค่า ΔS ของถ่านทั้ง 4 ชนิดในการดูดซับสี BY 1 มีค่าติดลบยกเว้นการ SAC และ CH-SAC ที่มีการเติม

อากาศที่มีการสลายพันธะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่สี BY 1 จะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีการกวนผสมด้วยstirrer และการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดสรุปได้ดังรูปที่ 4.26



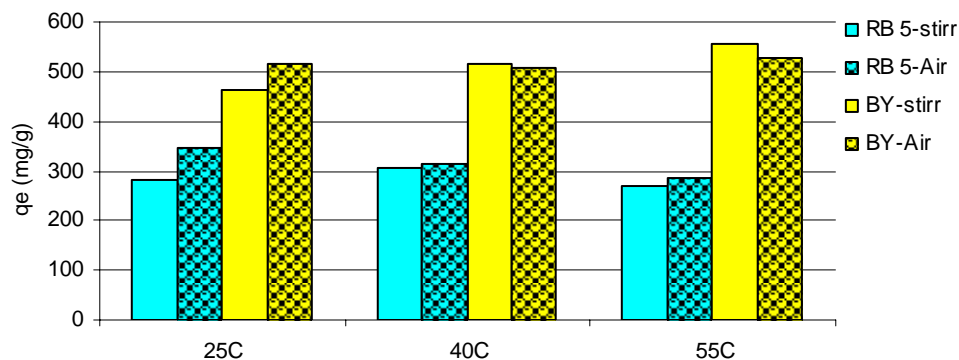
(ก) SAC



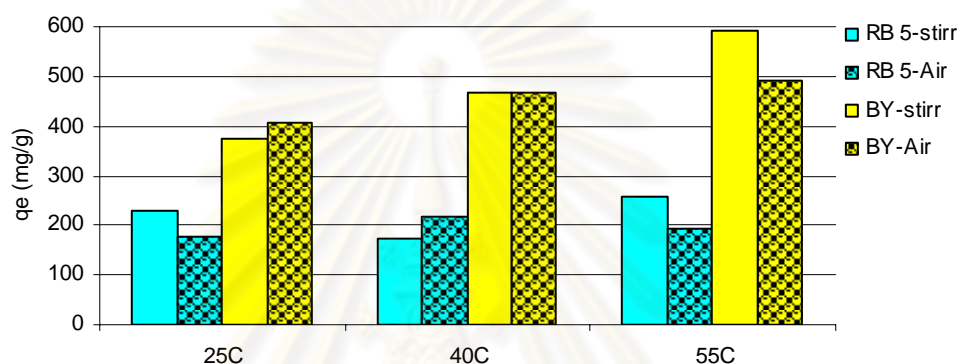
(ข) CH-SAC

รูปที่ 4.26 สรุปผลจากอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์

(ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ก) PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ 4.26 (ต่อ) สรุปผลจากอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ที่มีการกวนผสมด้วย stirrer และการเติมอากาศดังรูปที่ 4.26 สามารถสรุปได้ดังนี้

- จากการดูดซับบน SAC และ CH-SAC พบว่าการดูดซับสี RB 5 เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการกวนผสมด้วย stirrer ให้ค่า q_e สูงกว่าการเติมอากาศเล็กน้อย ในขณะที่การดูดซับ BY 1 เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงเกี่ยวกับสีรีแอกทีฟที่ดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและสีเบสิกที่ดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง
- สำหรับการดูดซับบน PAC พบว่าการดูดซับสี RB 5 เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการเติมอากาศเนื่องจากออกซิเจนจากอากาศจะเป็นตัวรับออกซิเจนบนพื้นผิว PAC ทำให้ความเป็นประจุบวกบนพื้นผิวเด่นชัดขึ้นการดูดซับ RB 5 ซึ่งเป็นประจุลบจึงเกิดดีกว่า stirrer ในขณะที่การดูดซับ BY 1 เกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 55 °C โดยการกวนผสมด้วย stirrer เนื่องจากการดูดซับ BY 1 เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งการเติมอากาศเป็นการระบายความร้อนในระบบ รวมทั้งออกซิเจนจาก

อากาศทำให้พื้นผิว PAC มีความเป็นบวกเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงผลัก BY 1 ซึ่งมีประจุบวกเหมือนกัน

- สำหรับการดูดซับบน CH-PAC พบว่าการดูดซับสี RB 5 เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 25° C โดยการกวนผสมด้วย stirrer เนื่องจากมีไคโตซานดูดตันรูพรุน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่รูพรุนเกิดขึ้นเพียงด้านนอกซึ่งโอกาสที่อนุภาคสีจะหลุดออกมาเนื่องจากได้รับผลกระทบจากการปั่นป่วนที่มาจากอากาศเกิดขึ้นได้สูง ส่วนการดูดซับสี BY 1 ให้ผลไม่ต่างจาก PAC

- จากผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับจากการทดลองสรุปว่าการดูดซับสี RB 5 ควรควบคุมอุณหภูมิ 25° C และการดูดซับสี BY 1 ควรควบคุมอุณหภูมิ 55° C โดยควรกวนผสมด้วย stirrer จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดแต่เพื่อความสะดวกต่อการปฏิบัติงานจริงสามารถประยุกต์ใช้การเติมอากาศแทนได้ซึ่งให้ผลการดูดซับโดยภาพรวมน้อยกว่าเพียงเล็กน้อย

4.6 การศึกษาค่าใช้จ่าย

การศึกษาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่นำเอาอากาศคอนเยื่อกระดาษจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตรวมไปถึงค่าใช้จ่ายจากการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยไคโตซานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัตถุดิบราคาถูกมาประยุกต์ใช้ทดแทนถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้าที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงโดยจะเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากตะกอนเยื่อกระดาษ (SAC) ถ่านกัมมันต์จากตะกอนเยื่อกระดาษเคลือบไคโตซาน (CH-SAC) และราคาถ่านกัมมันต์เกรดการค้า Shirazaki S-10 (PAC) หนึ่งกิโลกรัม ซึ่งมีราคาประมาณ 10,000 บาท/กก.

การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์บนเงื่อนไขที่มีปริมาณการดูดซับสีข้อม 2 ชนิด ได้แก่ Reactive Black 5 (RB 5) และ Basic Yellow 1 (BY 1) ต่อถ่านกัมมันต์ 1 กรัม (q_m) ในปริมาณที่เท่ากัน โดยค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์จะพิจารณาจาก 3 ส่วนด้วยกันคือ ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้าและค่าสารเคมีซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.24 โดยจากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสูงสุดเฉลี่ย จากผลการทดลองของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสุทธิในการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิด SAC และ CH-SAC ที่มีความสามารถในการดูดซับเทียบเท่า PAC ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.24 ตารางคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์หนึ่งกิโลกรัม

ชนิดตัวกลาง	ค่าน้ำ (บาท/กก.)	ค่าไฟ (บาท/กก.)	ค่าสารเคมี (บาท/กก.)	รวม (บาท/กก.)
SAC	60	130	150	340
CH-SAC	100	150	550	800

ตารางที่ 4.25 ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับเฉลี่ยเท่ากัน

ชนิดสี ข้อม	ความสามารถในการดูดซับ สูงสุดเฉลี่ย ($q_{m,ave}$, mg/g)			ปริมาณเทียบเท่า PAC (กก.)		ราคาเทียบเท่า PAC 1 กก. (บาท)	
	SAC	CH-SAC	PAC	SAC	CH-SAC	SAC	CH-SAC
RB 5	120	112	248	2.10	2.20	714	1760
BY 1	128	139	453	3.50	3.26	1190	2608

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4.25 จากการเฉลี่ยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด q_m ของถ่านกัมมันต์จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ SAC และ CH-SAC กับ PAC ที่มีความสามารถในการดูดซับเท่ากันพบว่าต้องใช้ถ่านกัมมันต์ SAC และ CH-SAC ปริมาณ 2.10 และ 2.20 เท่าของ PAC ตามลำดับในการดูดซับสี RB 5 และใช้ 3.50 และ 3.26 เท่าของ PAC ตามลำดับในการดูดซับสี BY 1

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับ PAC ที่มีราคาประมาณ 10,000 บาท/กก. แล้วถือว่ามีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ที่จะนถ่านกัมมันต์ชนิด SAC มาใช้งานทดแทน PAC ในขณะที่เมื่อพิจารณาในแง่สิ่งแวดล้อมแล้วทำให้เกิดของเสียที่มีปริมาณมากกว่า PAC ซึ่งในการใช้งานทางระบบบำบัดนั้นเนื่องจากน้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการผลิตมีปริมาณมากดังนั้นการใช้ถ่านกัมมันต์ SAC ทดแทน PAC ก็จะทำให้เกิดของเสียเพิ่มขึ้นตามจำนวนปริมาณเทียบเท่า PAC ซึ่งต้องมีแนวทางในการจัดการกับของเสียที่เกิดขึ้นนี้หากมีการนำไปประยุกต์ใช้จริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษาได้ตามหัวข้อการศึกษาต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

จากผลการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์พบว่า SAC จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดน้อยกว่า PAC ซึ่งเมื่อพิจารณาถ่าน CH-SAC พบว่ามีไคโตซานเกาะอยู่บนถ่านกัมมันต์จากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มมากขึ้นและเนื่องจากสารละลายไคโตซานที่นำมาเคลือบเป็นสารละลายกรดอะซิติกจึงส่งผลให้ค่า pH_{ZPC} ของ CH-SAC และ CH-PAC ลดลงและผลจากการเคลือบไคโตซานบนถ่าน CH-SAC และ CH-PAC เมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเคลือบไคโตซานทำให้พื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีความเรียบมากขึ้นส่งผลให้ลดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (ชนิสสา, 2548) และทำให้รูพรุนลดน้อยลงเนื่องจากไคโตซานจะไปบดบังและอุดตันรูพรุนของถ่านกัมมันต์

5.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

จากการทดสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง IR-Spectrum พบว่า CH-SAC และ CH-PAC ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยไคโตซานจะมีหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมาจากไคโตซานเพิ่มขึ้น ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันอื่นยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

5.1.3 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่มีต่อจลนศาสตร์การดูดซับสี่ข้อม RB 5 และ BY 1 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ภายใต้อุณหภูมิ $25^{\circ}C$ และควบคุมค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่ความเข้มข้นสี่ข้อมเริ่มต้น 50 mg/L สำหรับถ่าน SAC, CH-SAC และ 150 mg/L สำหรับถ่าน PAC, CH-PAC ซึ่งสามารถสรุปค่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งตัวแปรดังกล่าวได้แก่ เวลาสมดุลการดูดซับและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (k_a) โดยเวลาสมดุลสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนเวลาการดูดซับที่ใช้ในระบบรวมทั้งนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ซึ่งมีความสำคัญในระบบแบบทีละเท (Batch) ส่วน k_a มีความสำคัญมากในระบบการบำบัดแบบน้ำไหลผ่านซึ่งใช้เวลากักน้ำในระบบเพียงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นการเลือกใช้ตัวแปรที่มีค่า k_a สูงบ่งบอกว่าจะมีความสามารถดูดซับได้สูงในระยะเวลาสั้น ซึ่ง k_a จะเป็นตัวแปรทำนายเบรคทรูของระบบคอลัมน์ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ได้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์

ชนิดสีย้อม ตัวกลางดูดซับ	เวลาสมดุล (min)			k_a (min^{-1})		
	pH5	pH7	pH9	pH5	pH7	pH9
RB 5						
SAC	5	5	1	0.153	0.177	0.183
CH-SAC	120	120	120	0.140	0.088	0.041
PAC	240	240	240	0.049	0.055	0.073
CH-PAC	180	180	180	0.047	0.070	0.063
BY 1						
SAC	10	10	1	0.056	0.180	0.172
CH-SAC	30	30	30	0.062	0.215	0.157
PAC	240	180	180	0.130	0.204	0.279
CH-PAC	120	120	30	0.123	0.178	0.325

5.1.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่มีต่อไอโซเทอมการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 ภายใต้อุณหภูมิ 25°C และความเข้มข้นของประจุเท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยกวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นน้อยกว่า 300 mg/L สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดได้ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ได้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดูดซับสีย้อมของถ่านชนิดต่างๆ ว่าควรมีการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่าใดจึงจะมีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดการดูดซับที่สูงที่สุดเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกันของตัวกลางดูดซับทำให้มีความต้องการสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้จากตารางได้เสนอแนะความสามารถสูงสุดที่ถ่านแต่ละชนิดจะสามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าไปใช้ประกอบการตัดสินใจในการนำไปใช้งานจริงซึ่งมีข้อจำกัดด้านราคาค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบที่ต้องพิจารณาร่วมด้วย

ตารางที่ 5.2 สรุปสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของตัวกลางดูดซับที่อุณหภูมิ 25° C

ชนิดสีย้อม ตัวกลางดูดซับ	pH	q_m mg/g	ชนิด ไอโซเทอม
RB 5			
SAC	7	130.02	Langmuir
CH-SAC	5	151.60	Langmuir
PAC	9	298.76	Langmuir
CH-PAC	9	269.31	Langmuir
BY 1			
SAC	9	157.70	Langmuir
CH-SAC	9	187.98	Langmuir
PAC	9	538.63	Langmuir
CH-PAC	9	471.84	Langmuir

5.1.5 ผลการศึกษาผลกระทบของการเติมอากาศต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาการดูดซับสีของ RB 5 และ BY 1 ภายใต้อุณหภูมิ 25° C ที่ค่าพีเอช 7 โดยเปรียบเทียบผลระหว่างกวนด้วยเครื่องกวนใบพัด (stirrer) ที่ความเร็วรอบ 200 rpm และด้วยอัตราการไหลของก๊าซ (Q_g) เท่ากับ 0.6 L/m ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบการกวนผสมที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) ได้ดังตารางที่ 5.3 โดยจากตารางได้ทำการเปรียบเทียบ q_m จากการกวนผสมด้วย stirrer และการเติมอากาศของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พร้อมทั้งเสนอแนะวิธีการกวนผสมที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานจริง

ตารางที่ 5.3 สรุปรูปแบบการกวนผสมที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของตัวกลางดูดซับที่อุณหภูมิ 25° C

ชนิดสีย้อม ตัวกลางดูดซับ	q_m (mg/g)			ชนิด การกวนผสมที่เหมาะสม
	stirrer	Air	N	
RB 5				
SAC	<u>130.02</u>	108.76	91.94	stirrer
CH-SAC	<u>97.13</u>	87.37	97.41	stirrer
PAC	282.46	<u>347.91</u>	305.78	Air
CH-PAC	<u>230.69</u>	209.4	176.78	stirrer
BY 1				
SAC	<u>128.23</u>	125.65	112.74	stirrer
CH-SAC	140.41	<u>151.42</u>	125.86	Air
PAC	464.46	<u>515.54</u>	559.59	Air
CH-PAC	375.82	<u>407.66</u>	496.05	Air

5.1.6 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสีย้อม RB 5 และ BY 1 ของถ่านทั้ง 4 ชนิดที่ค่าพีเอช 7 ที่มีการกวนด้วย stirrer ที่ความเร็วรอบ 200 rpm และการเติมอากาศด้วยอัตราการไหลของก๊าซ (Qg) เท่ากับ 0.6 L/ m ซึ่งสามารถสรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมและความสามารถสูงสุดที่สามารถดูดซับทั้งสองชนิดได้บนถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 ซึ่งจะพบว่าการดูดซับสี RB5 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในขณะที่การดูดซับสี BY 1 เป็นการดูดซับประเภทดูดความร้อน

ตารางที่ 5.4 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมของตัวกลางดูดซับ

ชนิดสีย้อม ตัวกลางดูดซับ	q _m (mg/g)		อุณหภูมิ ที่เหมาะสม , °C
	stirrer	Air	
RB 5			
SAC	<u>130.02</u>	108.76	25
CH-SAC	<u>97.13</u>	87.37	25
PAC	307.69	<u>347.91</u>	25
CH-PAC	<u>230.69</u>	215.96	25
BY 1			
SAC	<u>161.43</u>	144.16	55
CH-SAC	187.85	<u>166.44</u>	55
PAC	<u>556.43</u>	528.02	55
CH-PAC	<u>593.13</u>	491.71	55

5.1.7 การศึกษาค่าใช้จ่าย

เมื่อเปรียบเทียบราคาในการผลิตถ่าน SAC ซึ่งมาจากวัตถุดิบเหลือใช้พบว่ามีราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับถ่าน PAC ในขณะที่การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเคลือบไคโตซานบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า SAC สองเท่าแต่มีความสามารถโดยรวมใกล้เคียงกับ SAC จึงไม่คุ้มค่ากับการลงทุนรวมทั้งมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ SAC กับ PAC แล้วพบว่าต้องใช้ปริมาณถ่าน SAC มากกว่า PAC ในการดูดซับสี RB 5 และ BY 1 โดยการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ถึง 2.10 และ 3.50 เท่าในการนำมาใช้งานเพื่อยังคงประสิทธิภาพเทียบเท่า PAC ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียขึ้นจำนวนมาก แต่สำหรับการใช้งานในด้านการบำบัดน้ำเสียซึ่งต้องใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณมากเมื่อพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ถ่าน SAC ยังคงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทน PAC

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาในบางปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องและคาดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลทางด้านบวกต่อการดูดซับซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมปัจจัยทั้งหมด ดังนั้นหากเป็นไปได้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นต่อไปนี้

1. ควรใช้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าประเภทที่นิยมนำมาใช้งานจริงในด้านการบำบัดน้ำเสีย
2. ควรใช้เทคนิคการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ทำให้เกิดน้ำเสียจากการผลิตน้อยที่สุด
3. ควรเลือกใช้วัสดุดิบของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชนิดอื่นที่มีปริมาณคาร์บอนสูง
4. เปลี่ยนประเภทน้ำเสียที่มีองค์ประกอบมลภาวะต่างๆกันมาทดสอบกับถ่านกัมมันต์ที่

ผลิต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชลธิชา ไม่เสื่อมสุข. ผลของออกซิเจนต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
2545.
- ชนิสรา หงอสุวรรณ. การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟและสีย้อมเบสิกโดยใช้กากตะกอนของเสีย.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี, 2548.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า: รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ์. กรุงเทพฯ :
ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล : สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2527.
- ธวัชชัย สิงหศิริ. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา เพื่อการกำจัดโครเมียม
และนิลเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้เป้งของโรงงานน้ำตาลขี้
ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ภาณุ มณฑนาการดิวงค์ และคณะ. การกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้
ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากของเสียที่มีเยื่อไม้เป็นส่วนประกอบ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2547.
- ภาวดี เมธะคานนท์ และ อิศรา เพ็องฟูชาติ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโตซาน. กรุงเทพฯ :
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2543.
- มันสิน ตันจุลเวศน์. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- รัชนิษฐ์ รุกขชาติ. สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง[ออนไลน์].
แหล่งที่มา : <http://www.navy.mi.th> [8 ก.ค. 2550]
- วณัฏ์สิริ ประยูรพรหม. ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์เม็ด สำหรับการกำจัดสีจากน้ำเสีย
โรงงานย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

วิมลรัตน์ ศรีจรัส. เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : คราฟแมนเพรส, 2550 .

สุภาภรณ์ มานะรังสรรค์. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2540.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดลอมแห่งประเทศไทย. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอก

ย้อม. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดลอมแห่งประเทศไทย, 2544.

อนัญญา ไตรบำรุงสุข. การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมผ้าจากน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไค

โตแซนที่อุณหภูมิต่างๆ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ,

2542.

อัมพร อึ้งปกรณ์แก้ว. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. วารสาร. ปีที่6, มกราคม 2540 :

51-71.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Al-Degs, Y., Khraisheh, M. A. M., Allen, S. J. and Ahmad, M.N. Effect of Carbon Surface Chemistry on the Removal of Reactive Dyes From Textile Effluent. Water Research. 34 (2000) : 927-935.
- Al-Ghouti M. A., Khraisheh, M. A., Allen M. S. J. and Ahmad M. N. The Removal of Dyes From Textile Wastewater : A Study of the Physical Characteristics And Adsorption Mechanisms of Diatomaceous Earth. Journal of Environmental Management. 69 (2003) : 229–238.
- Agrawal. A., Sahu. K and ; PANDEY. B. D. Removal of zinc from aqueous solutions using sea nodule residue. Colloids and surfaces. 237 (2004) : 133-140.
- Buckley, C. A. Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. Water Science Technology. 25 (1992) : 203-209.
- Grace, J. R., Wairegi, T. Break-Up of Drops and Bubbles in Stagnant Media. Can. J. Chem. Eng. 56, 3 (1986).
- Hinze, J.O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes. AIChE J. 1, 289 (1955).
- Jia, Y., et al. Effect of Air Bubbling on Atrazine Adsorption in Water By Powdered Activated carbons – Competitive Adsorption of Impurities. Separation and Purification Technology. 46 (2005) : 79-87.
- Jia, Y., Wang, R. and Fane, A. G. Atrazine Adsorption From Aqueous Solution Using Powdered Activated Carbon – Improved Mass Transfer By Air Bubbling Agitation. Chemical Engineering Journal. 116 (2006) : 53-59.
- Mattson, J. S. and Mark, H. B. Activeted Carbon : Surface Chemistry And Adsorption From Solution. New York : Marcel Dekker Inc, 1971 : 1-8.
- Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering Treatment And Reuse. Singapore : McGraw-Hill, 2004.
- Montgomery, J. M. Water Treatment Principles And Design. New York : John Wiley and Sons, 1985.
- Myer, D. Surface Interface And Colloids:Principal And Applications. 2nd ed. New York : John Wiley and Sons, 1999.

- Punyapalukul, P. and Takizawa, S. Selective Adsorption of Nonionic Surfactant On Hexagonal Mesoporous Silicates (HMSs) in the Presence of Ionic Dyes. Water Research. 40 (2006) : 3177-3184.
- Thuy, Q. T. T. Effects of Acid/ Base Treatment of Powdered Activated Carbon on Adsorption And Membrane Fouling in PAC- Microfiltration System (PAC- MF). Urban Engineering Tokyo University, 2006.
- Vidic, R. D., Sudan, M. T. and Brenner, R. C. Oxidation Coupling of Phenol on Activated Carbon : Impact on Adsorption Equilibrium. Environmental Science Technology. 27 (1993) : 2079-2085.
- Warta, C. L., Papadimas, S. P., Sorial, G. A., Suidan, M. T. and Speth, T. F. The Effect of Molecular Oxygen on the Activated Carbon Adsorption of Natural Organic Matter in Ohio River Water, Water Research. 29 (1995) : 551-562.
- Wu, F. C., Tseng, R. L. and Juang, R. S., 2002 , Adsorption of Dye and Humic Acid From Water Using Chitosan-Encapsulate Activated Carbon. Journal of Chemical Technology And Biotechnology. 77 (2002) : 1269-1279.
- Zeid, N. A., Nakhla, G., Farooq, S. and Osei-Twum, E. Activeted Carbon Adsorption in Oxidizing Environments. Water Research. 29 (1995) : 653-660.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.1 ปริมาณสี่ข้อม RB 5 ที่สามารถดูดซับต่อปริมาณถ่าน 1 กรัม (q_e) และสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีการเติมอากาศ

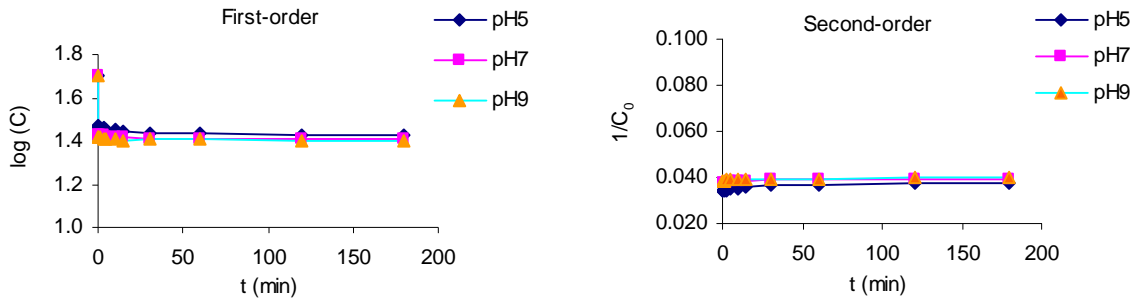
ตัวกลางดูดซับ Qg, L/min	อากาศ (Air)			ก๊าซไนโตรเจน(N_2)		
	q_e (mg/g)	$k_L a$	k_L (L/m ² .hr)	q_e (mg/g)	$k_L a$ (min ⁻¹)	k_L (L/m ² .hr)
SAC						
0.2	7.66	0.028	0.009	7.82	0.033	0.011
0.4	6.42	0.019	0.006	10.39	0.041	0.013
0.6	6.54	0.026	0.009	7.53	0.032	0.010
0.9	4.97	0.028	0.009	8.65	0.034	0.011
1.2	6.95	0.024	0.008	8.65	0.036	0.012
CH - SAC						
0.2	26.68	0.060	0.100	35.31	0.121	0.203
0.4	31.37	0.096	0.162	32.70	0.123	0.206
0.6	32.53	0.112	0.189	34.15	0.125	0.210
0.9	30.59	0.093	0.155	34.31	0.114	0.191
1.2	28.15	0.107	0.180	34.98	0.102	0.171
PAC						
0.2	156.28	0.047	0.020	169.70	0.067	0.027
0.4	221.48	0.078	0.032	186.00	0.072	0.030
0.6	203.66	0.079	0.032	190.80	0.082	0.034
0.9	190.80	0.072	0.029	175.46	0.070	0.029
1.2	174.50	0.063	0.026	217.64	0.113	0.047
CH - PAC						
0.2	138.06	0.042	0.020	134.23	0.054	0.026
0.4	138.06	0.055	0.027	138.06	0.053	0.025
0.6	124.64	0.051	0.024	119.05	0.047	0.023
0.9	139.02	0.064	0.031	120.95	0.041	0.020
1.2	136.15	0.059	0.028	113.33	0.051	0.025

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

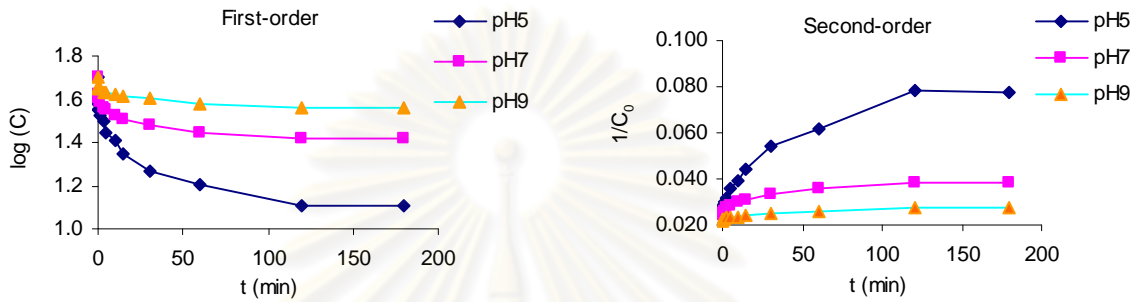
ตารางที่ ผ.2 ปริมาณสีข้อม BY 1 ที่สามารถดูดซับต่อปริมาณถ่าน 1 กรัม (q_e) และสัมประสิทธิ์การแพร่ ที่มีการเติมอากาศ

ตัวกลางดูดซับ Q_g , L/min	อากาศ (Air)			ก๊าซไนโตรเจน(N_2)		
	q_e (mg/g)	k_{La}	k_L ($L/m^2 \cdot hr$)	q_e (mg/g)	k_{La} (min^{-1})	k_L ($L/m^2 \cdot hr$)
SAC						
0.2	36.23	0.199	0.065	29.06	0.124	0.040
0.4	37.62	0.197	0.064	29.66	0.130	0.042
0.6	34.04	0.194	0.063	27.07	0.127	0.041
0.9	34.24	0.202	0.065	27.47	0.122	0.040
1.2	34.24	0.184	0.060	27.27	0.134	0.044
CH - SAC						
0.2	44.79	0.195	0.327	41.20	0.167	0.279
0.4	41.80	0.215	0.361	44.19	0.158	0.266
0.6	43.66	0.190	0.319	43.99	0.169	0.283
0.9	42.79	0.196	0.328	44.98	0.210	0.352
1.2	44.39	0.207	0.348	39.81	0.147	0.247
PAC						
0.2	358.51	0.316	0.130	346.22	0.261	0.107
0.4	357.60	0.336	0.138	375.80	0.322	0.133
0.6	366.23	0.316	0.130	370.34	0.326	0.134
0.9	364.42	0.318	0.131	366.70	0.317	0.130
1.2	350.32	0.330	0.136	361.69	0.302	0.124
CH - PAC						
0.2	348.04	0.266	0.128	334.39	0.249	0.120
0.4	343.49	0.269	0.130	346.68	0.229	0.110
0.6	347.59	0.267	0.129	341.22	0.251	0.121
0.9	340.31	0.273	0.131	338.03	0.259	0.125
1.2	346.22	0.279	0.134	339.85	0.249	0.120

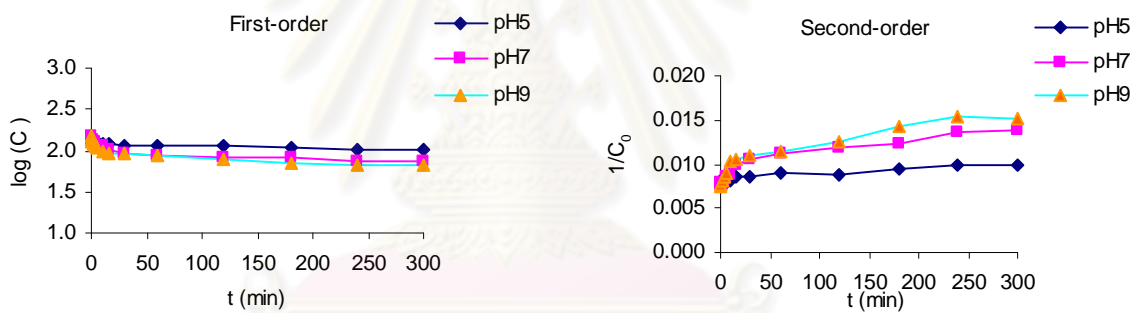
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



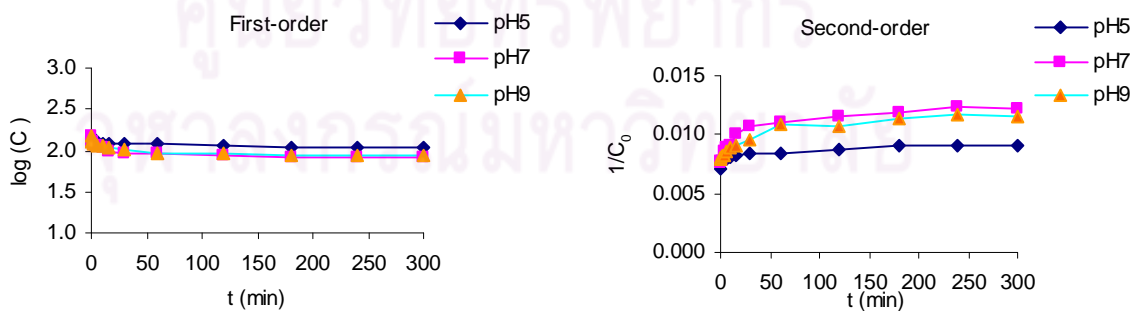
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

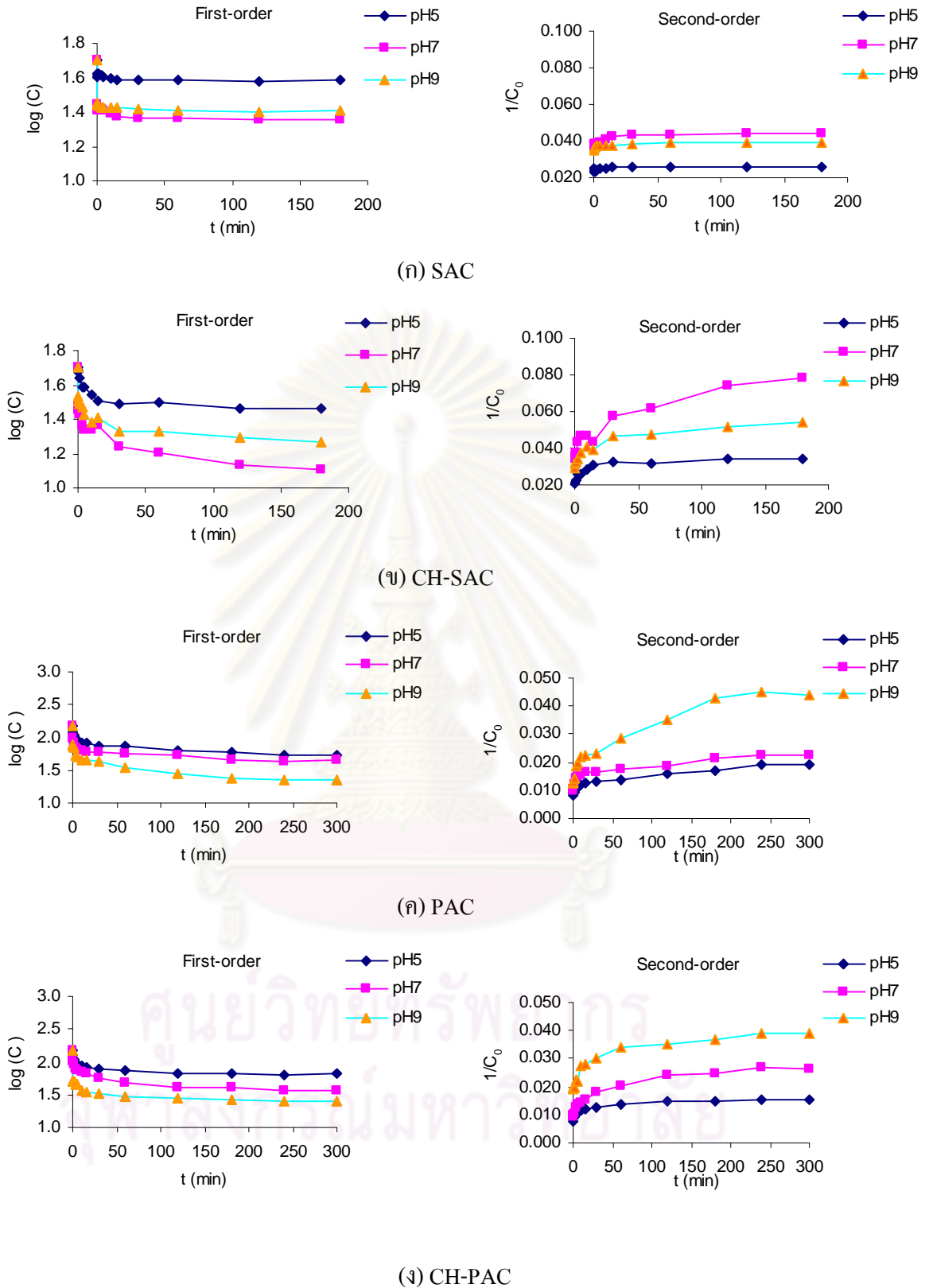


(ค) PAC

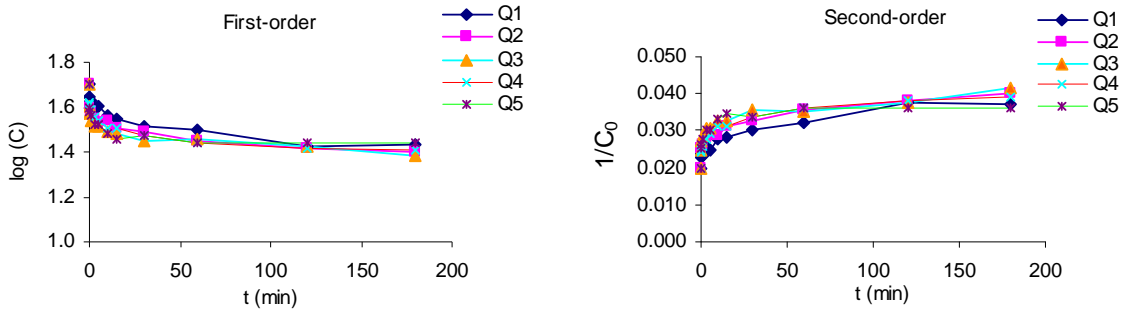


(ง) CH-PAC

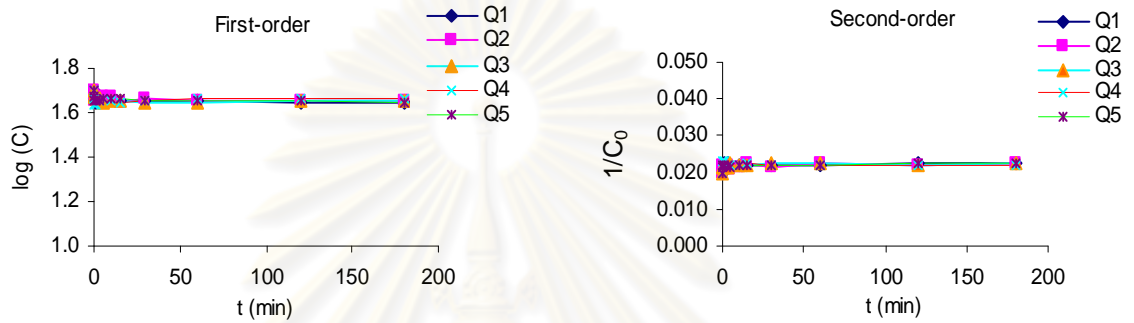
รูปที่ ๑.1 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสปี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25 °C กวนด้วยความเร็ว รอบ 200rpm



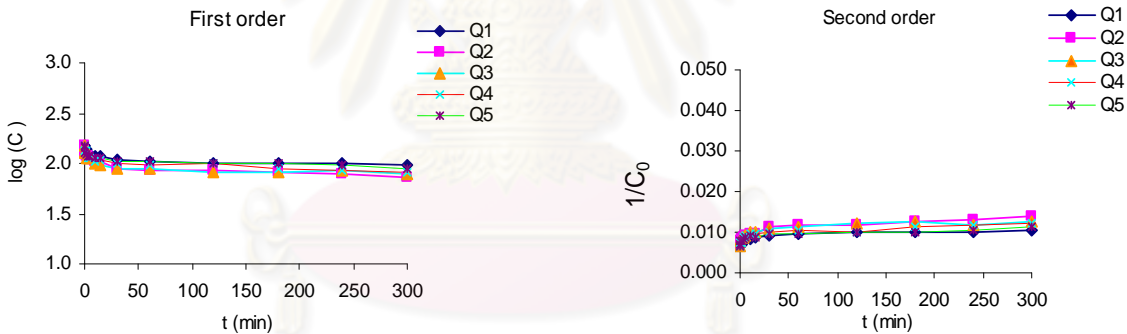
รูปที่ ๗.2 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm



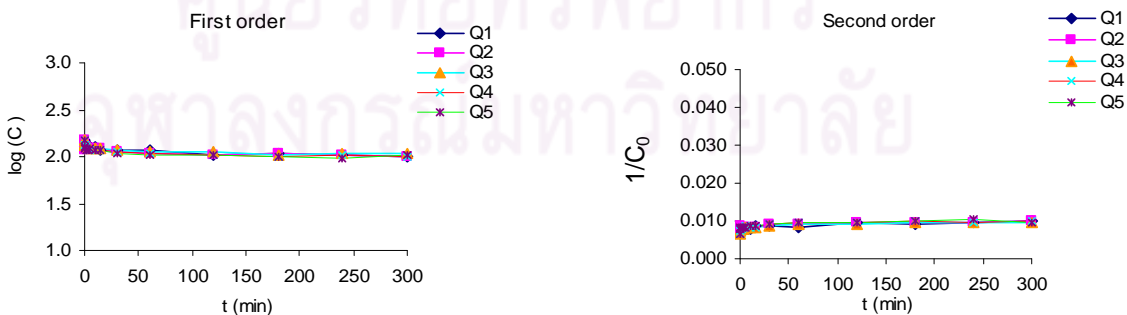
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

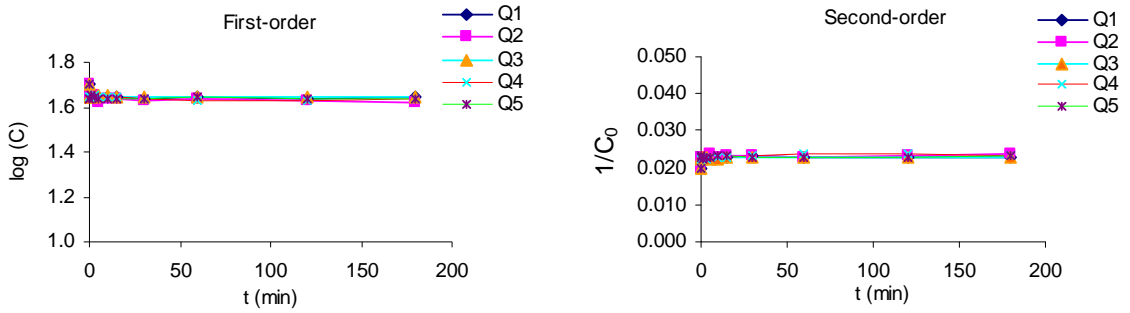


(ค) PAC

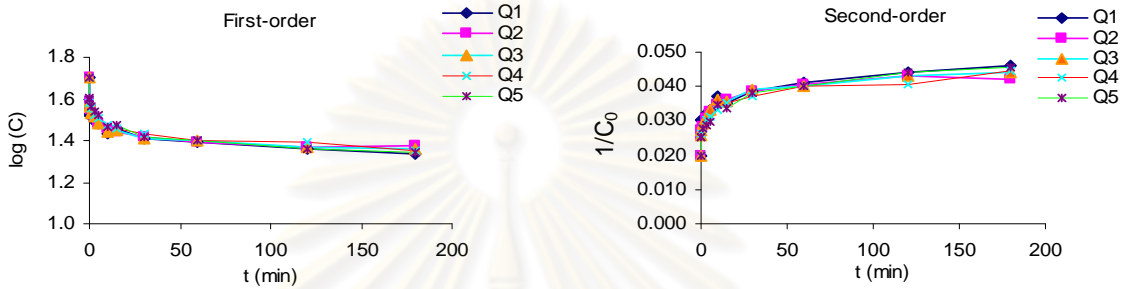


(ง) CH-PAC

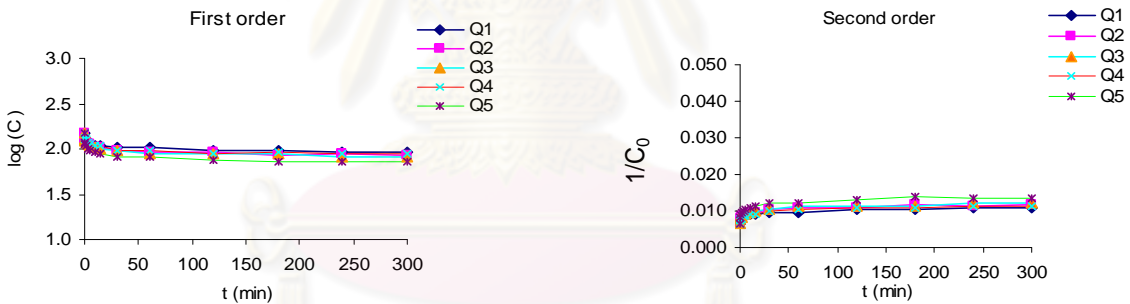
รูปที่ ๓.๓ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกิริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min



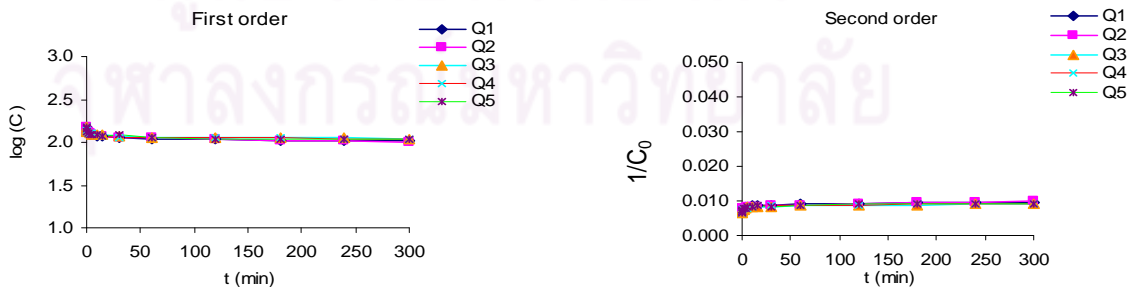
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

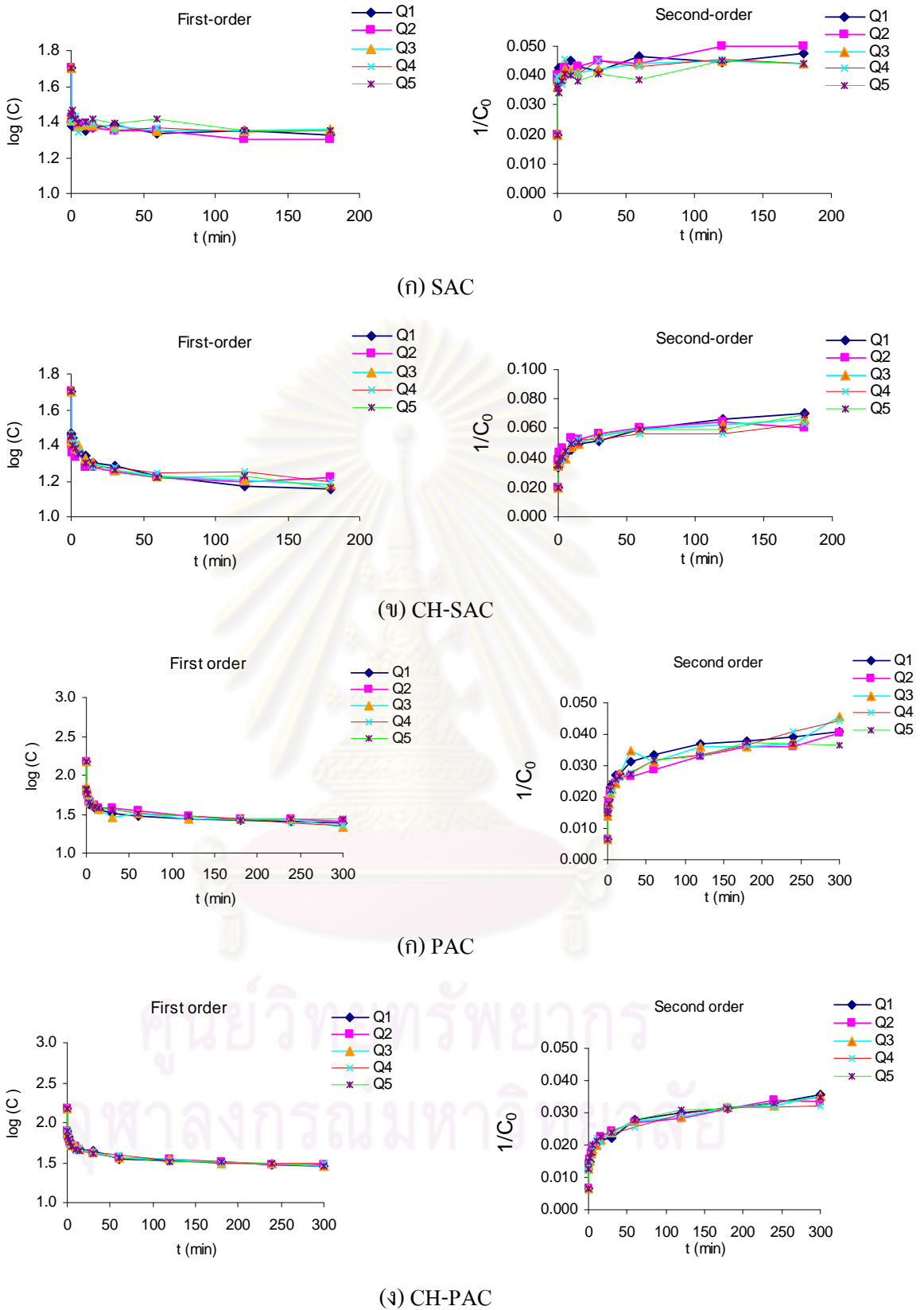


(ค) PAC

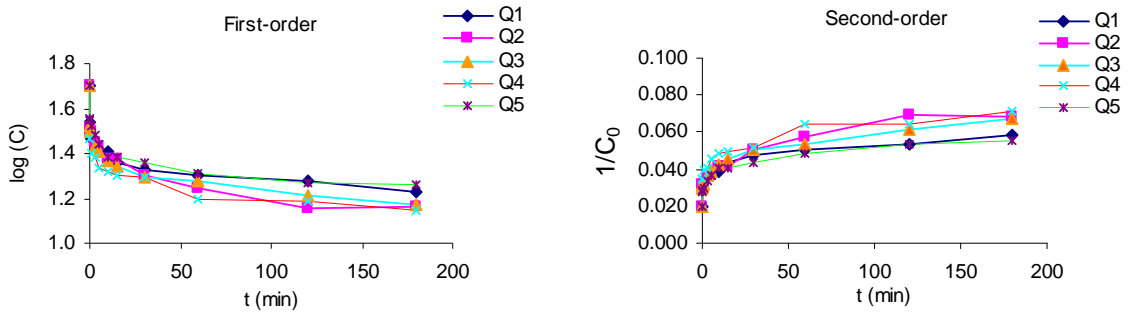


(ง) CH-PAC

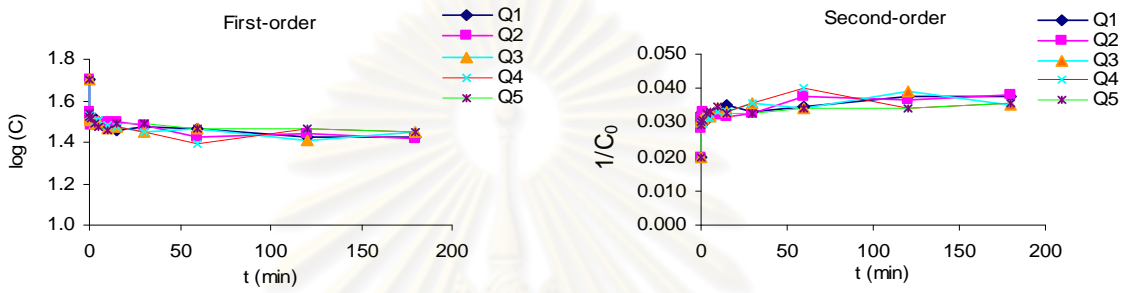
รูปที่ ๔.4 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เติมไนโตรเจนด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min



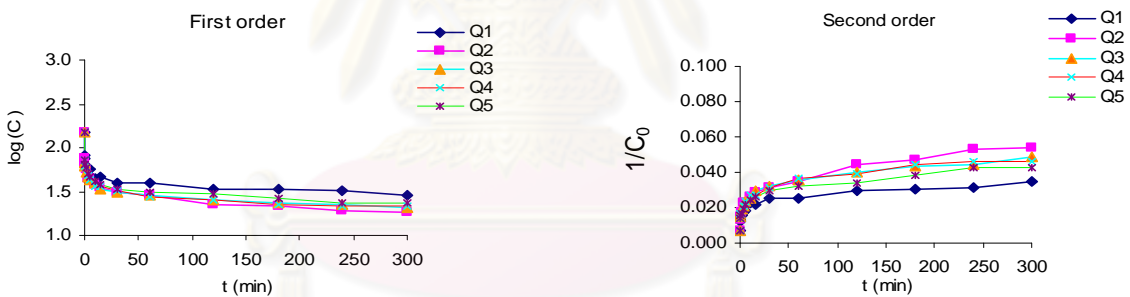
รูปที่ ๕.5 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับบี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C เต็มอากาศด้วยQg เท่ากับ 0.6 L/min



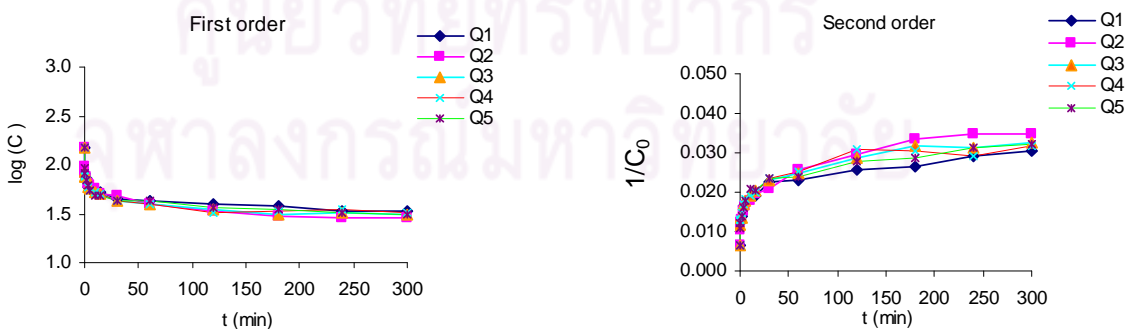
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

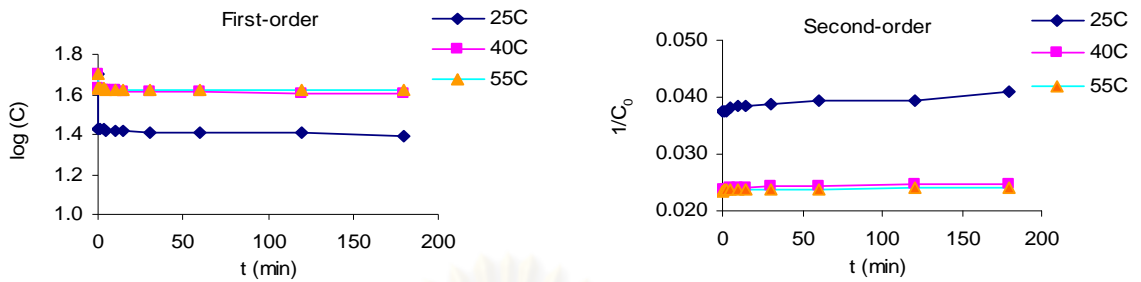


(ค) PAC

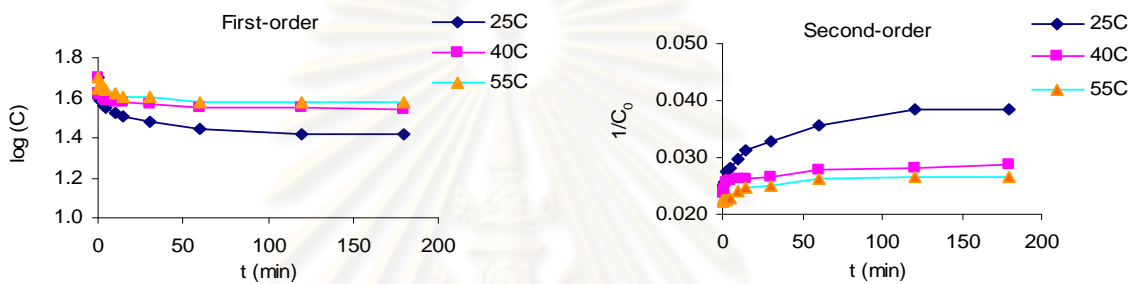


(ง) CH-PAC

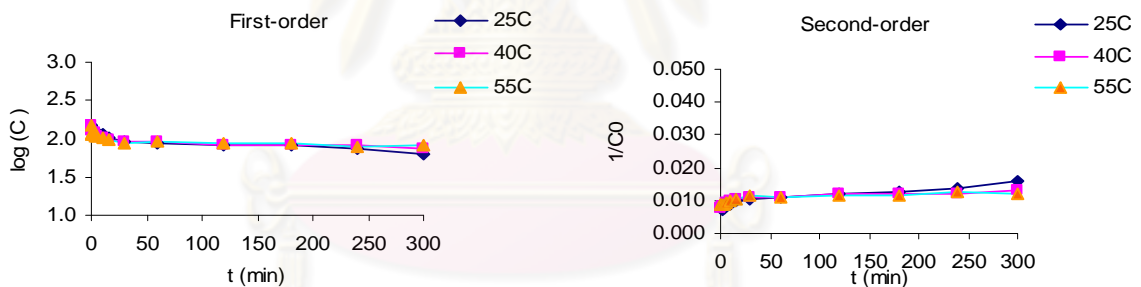
รูปที่ ๘.๖ ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25 °C เติมไนโตรเจนด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min



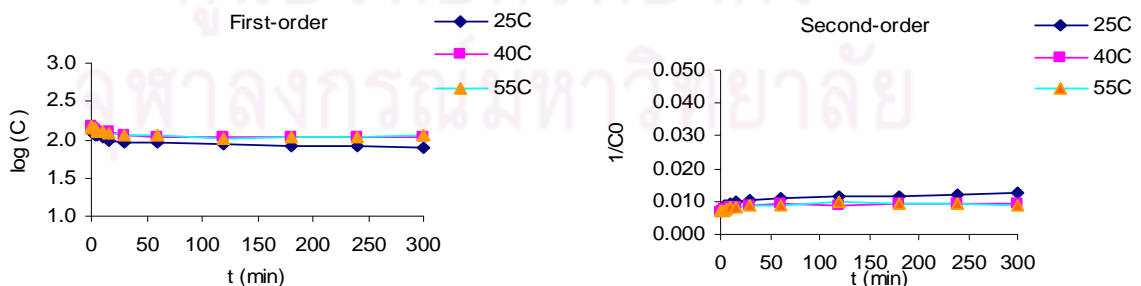
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

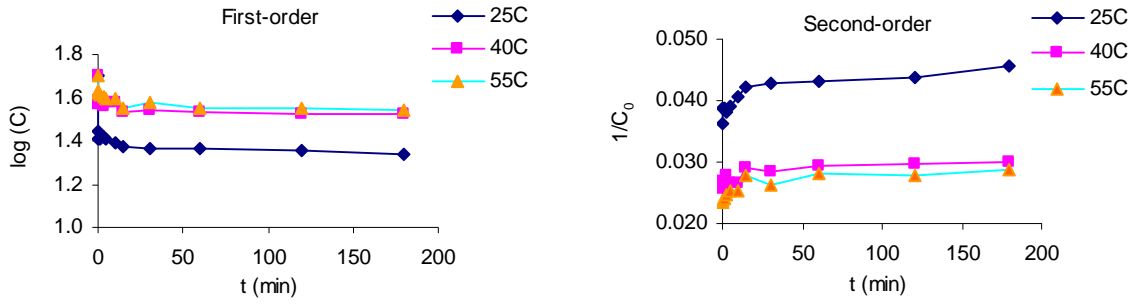


(ค) PAC

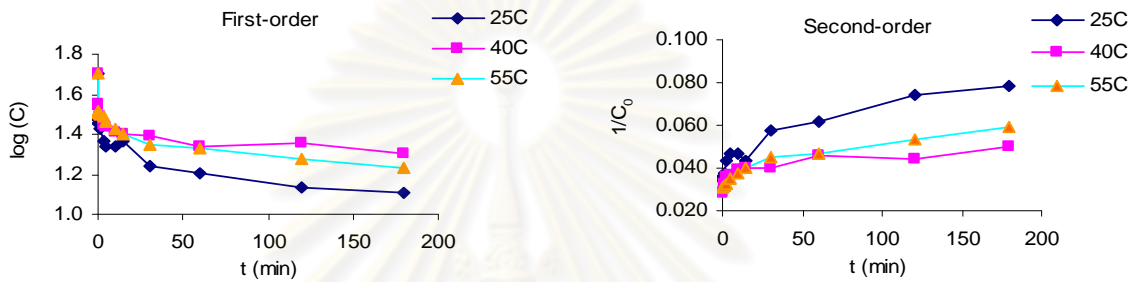


(ง) CH-PAC

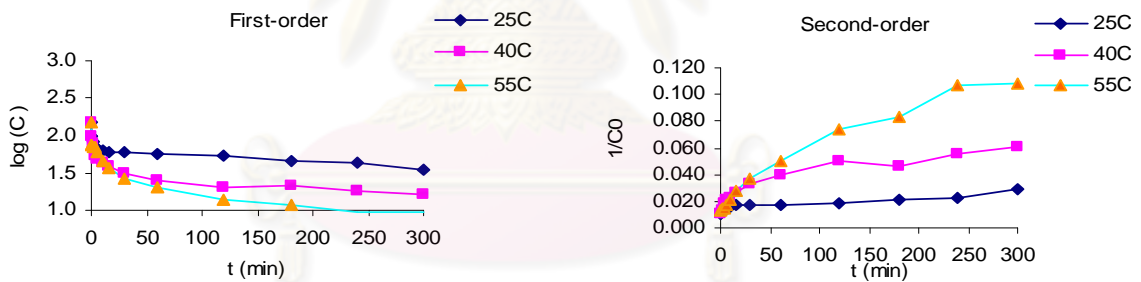
รูปที่ ๗.7 ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับที่ RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25°C, 40°C และ 55°C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm



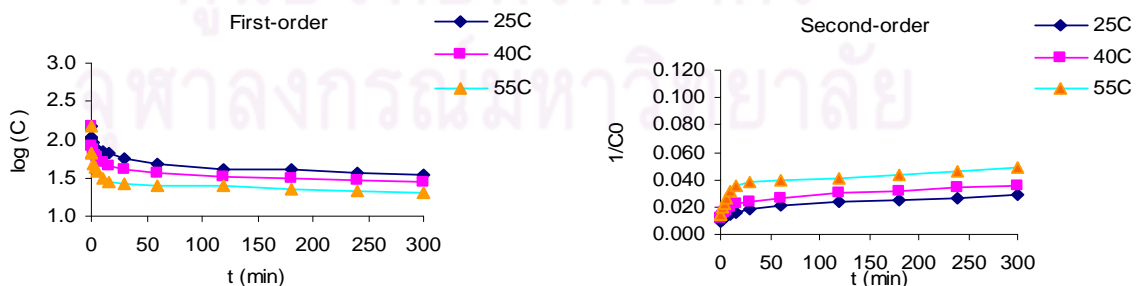
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

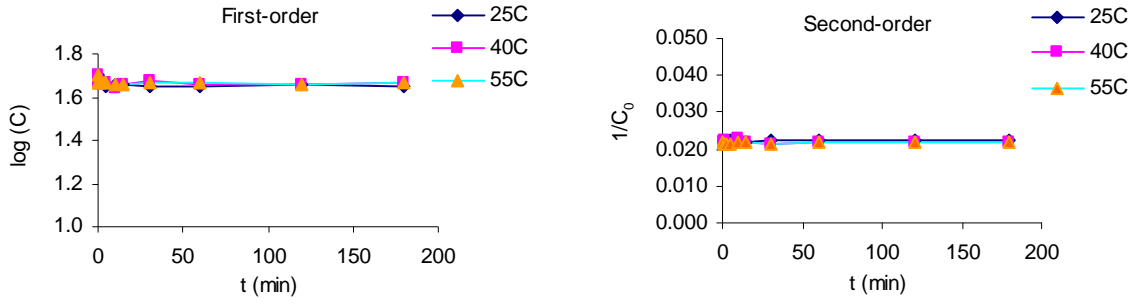


(ค) PAC

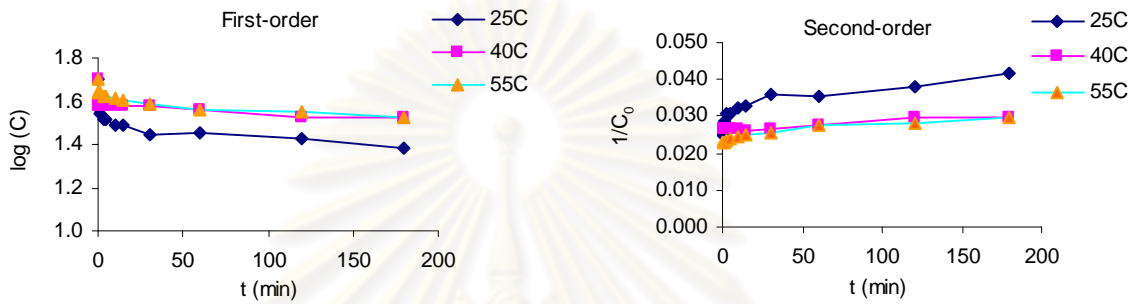


(ง) CH-PAC

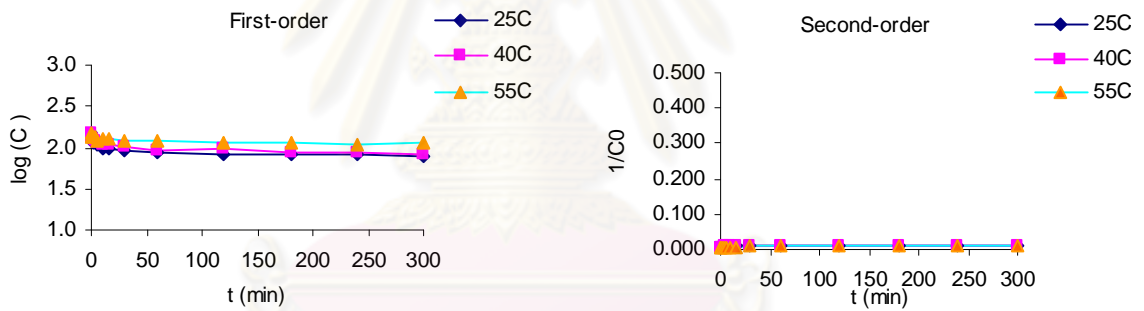
รูปที่ ๘.๘ ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับ BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C กวนด้วยความเร็วรอบ 200rpm



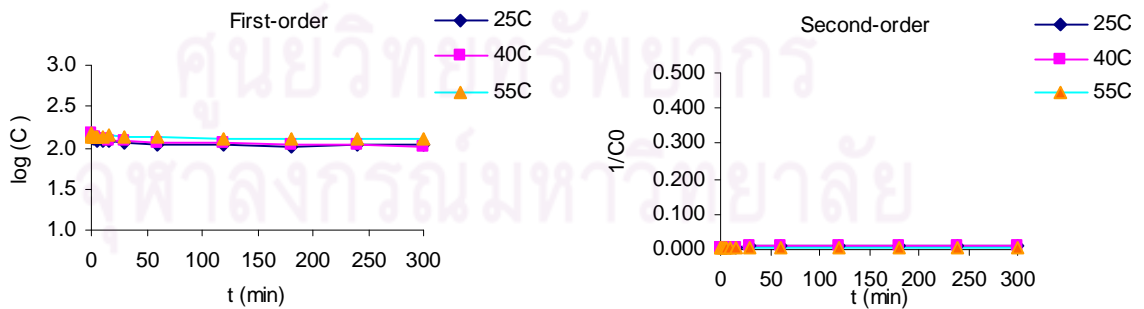
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

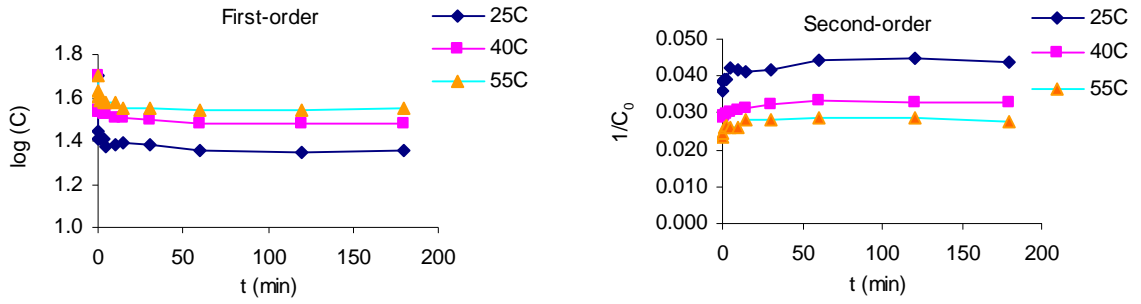


(ค) PAC

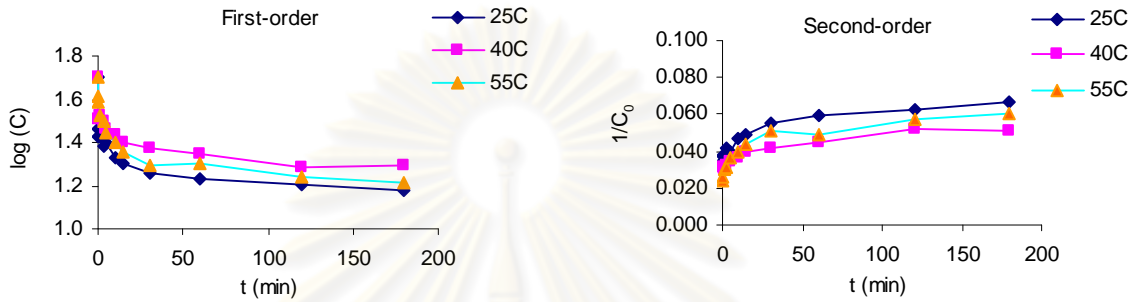


(ง) CH-PAC

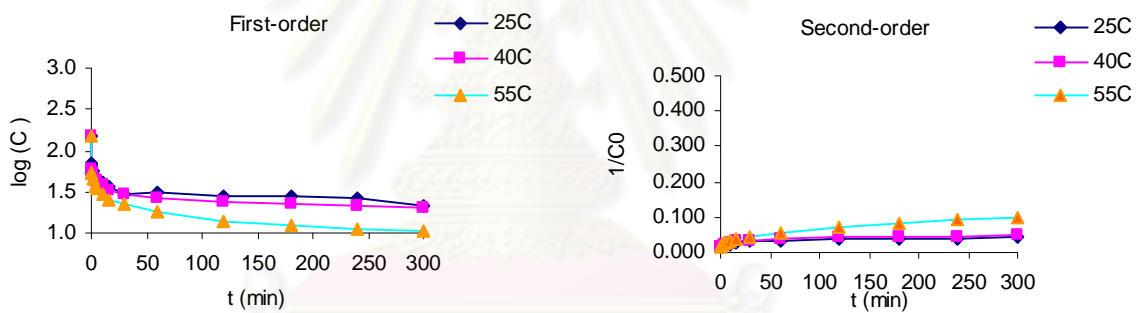
รูปที่ ๙.๙ ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง(First-order)และปฏิกริยาอันดับสอง(Second-order) ของการดูดซับสี RB 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25° C, 40° C และ 55° C เติมอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min



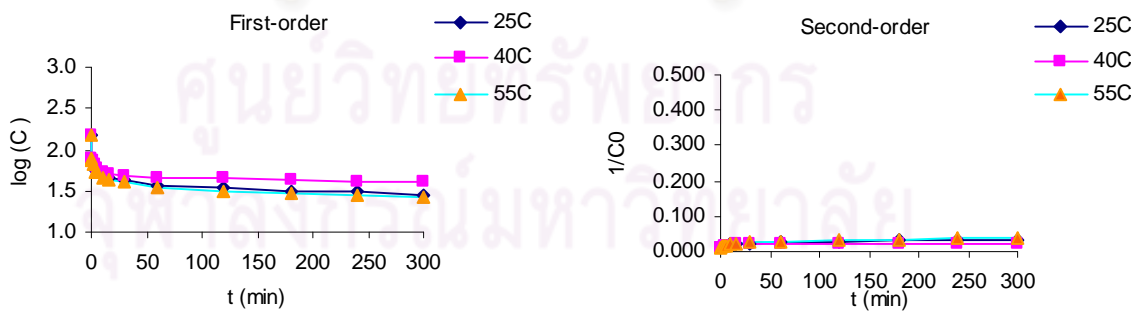
(ก) SAC



(ข) CH-SAC

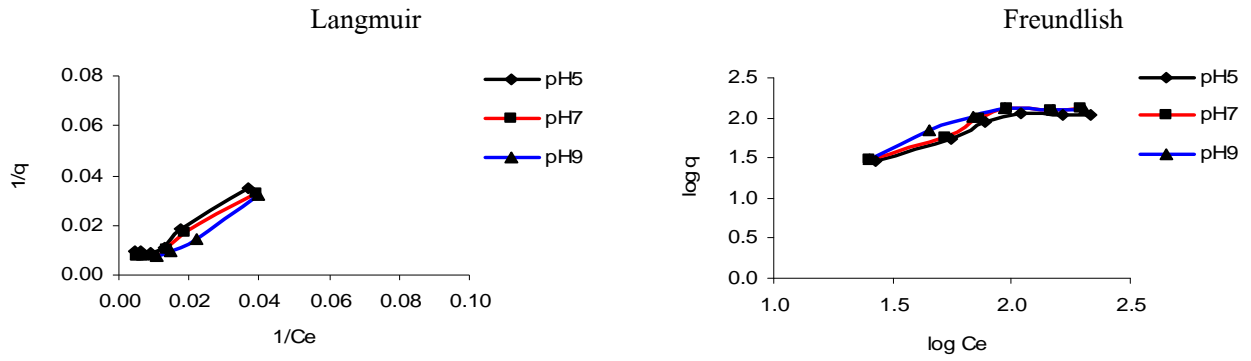


(ค) PAC

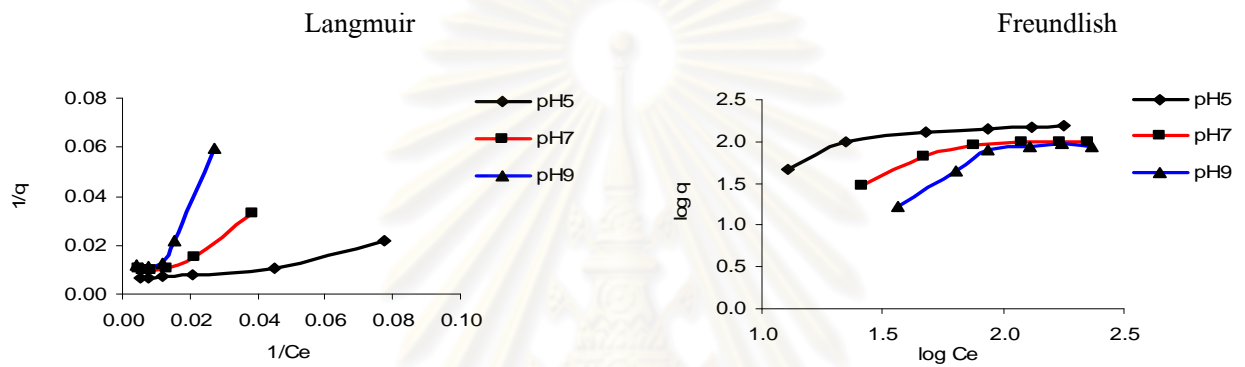


(ง) CH-PAC

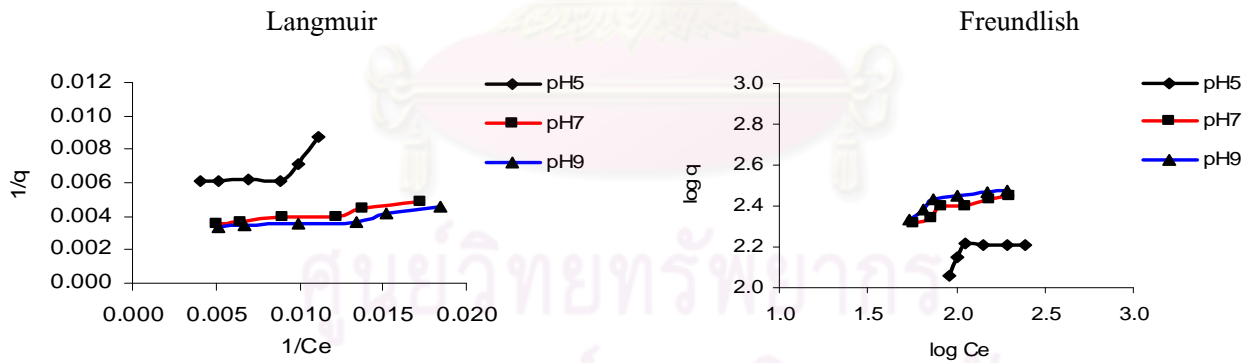
รูปที่ ๑๐. ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง (First-order) และปฏิกริยาอันดับสอง (Second-order) ของการดูดซับ สี BY 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC ที่ 25°C, 40°C และ 55°C เติมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min



(ก) SAC

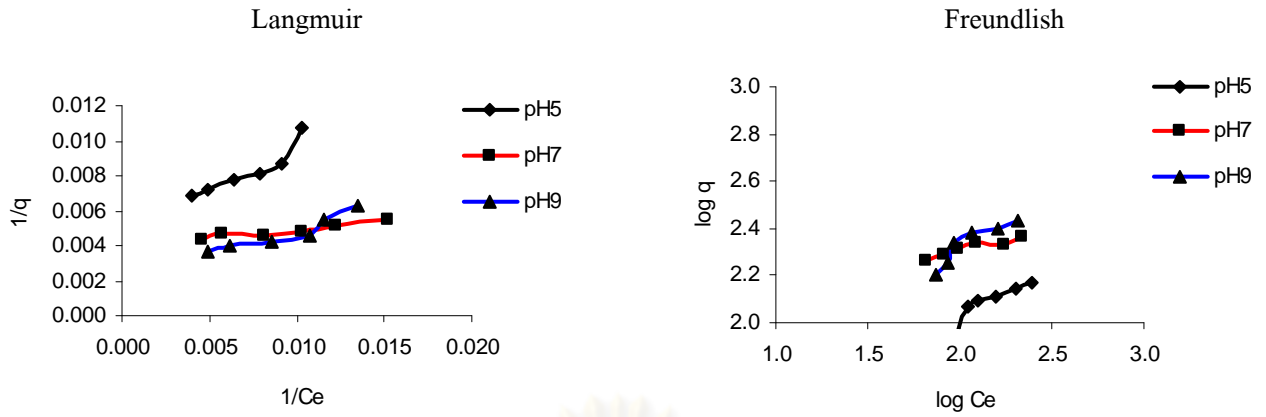


(ข) CH-SAC



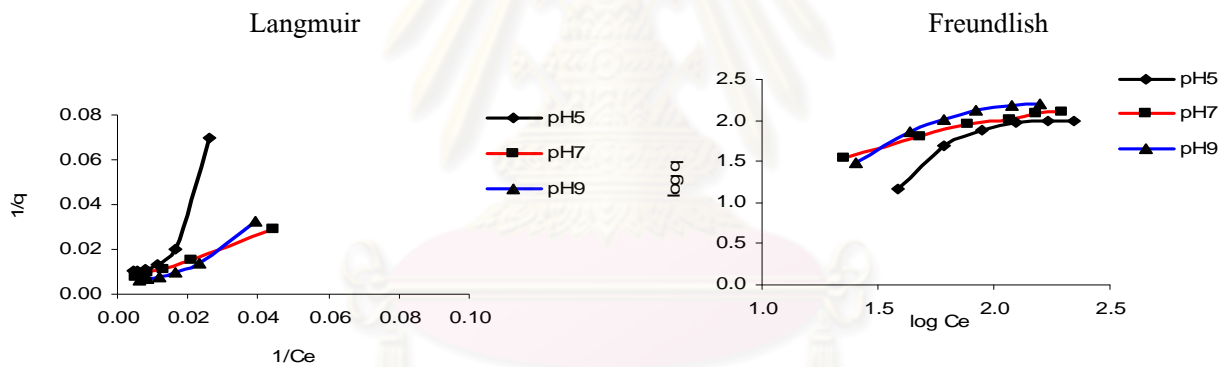
(ค) PAC

รูปที่ ๑๑.11 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25 °C และค่าความหนาแน่นของประจุ 0.01 โมลาร์ ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

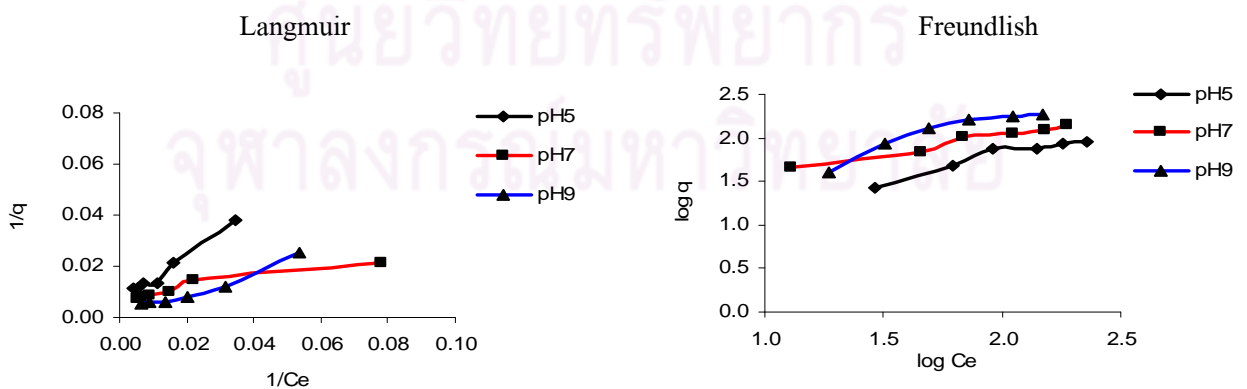


(ง) CH-PAC

รูปที่ ๑๑.๑๑(ต่อ) Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25°C และค่าความหนาแน่นของประจุ 0.01 โมลาร์ ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

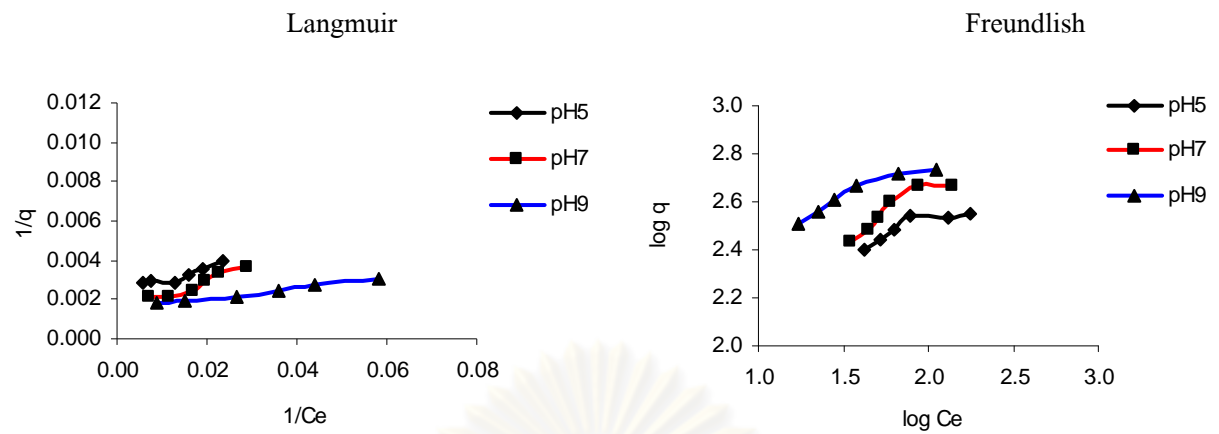


(ก) SAC

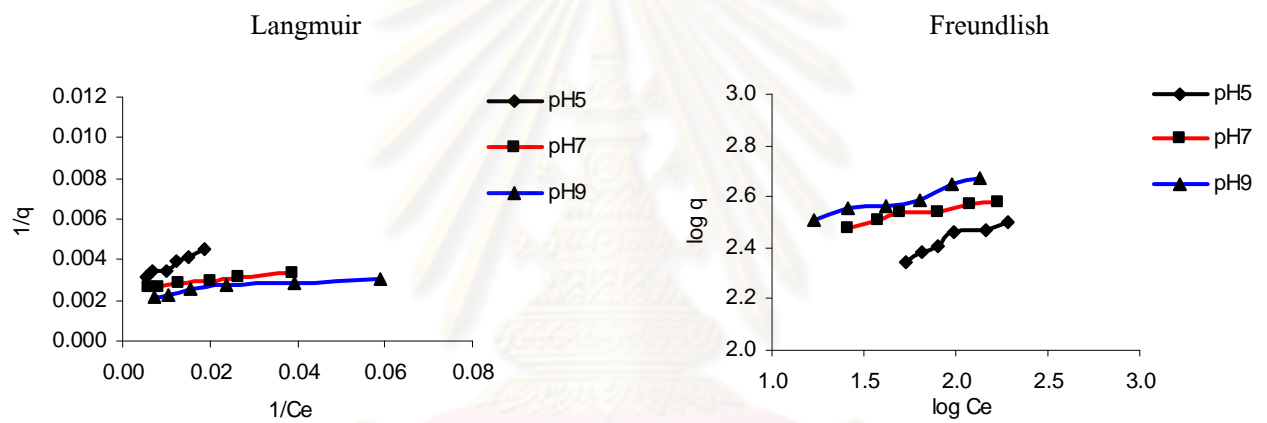


(ข) CH-SAC

รูปที่ ๑๑.๑๒ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25°C ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



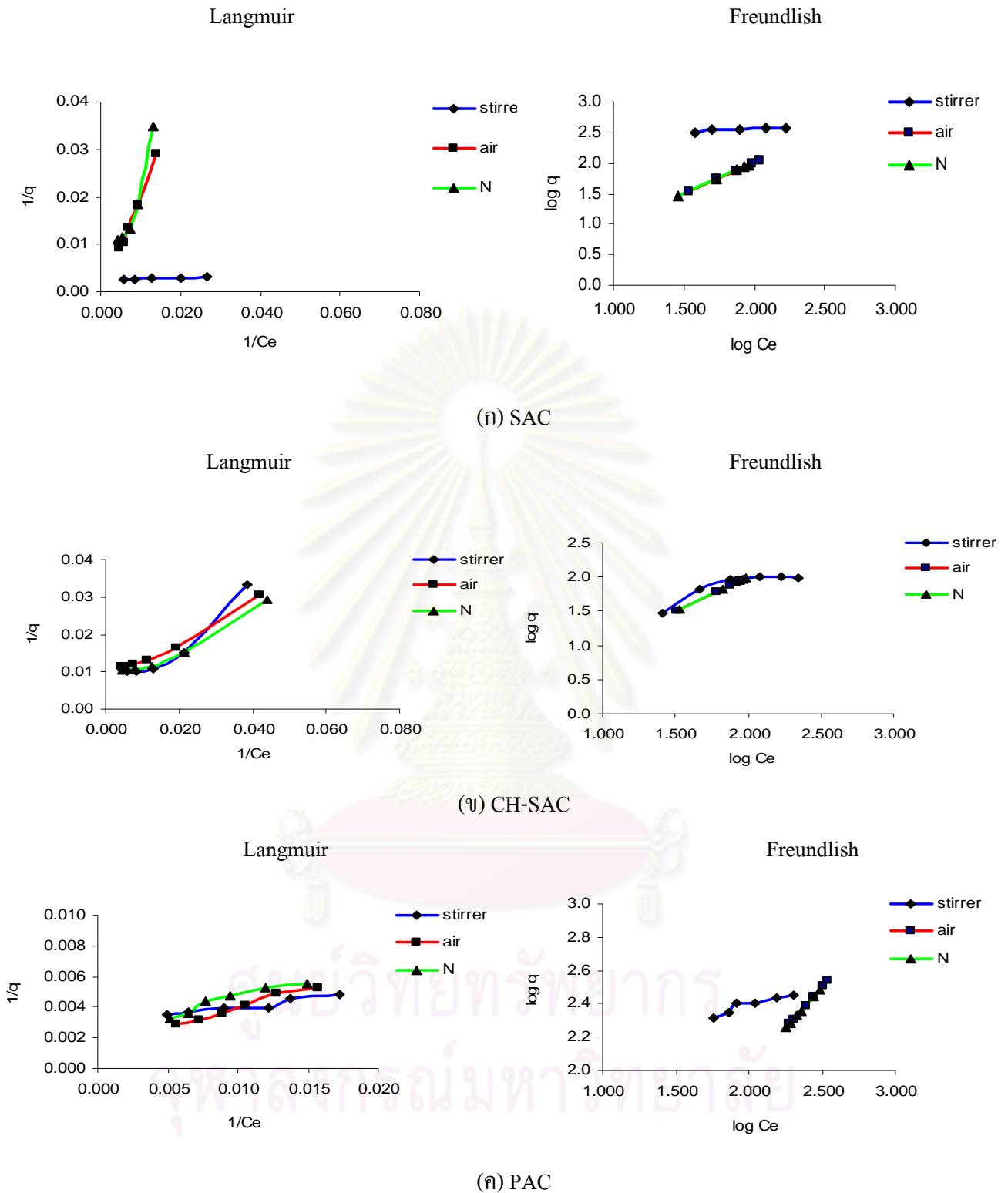
(ค) PAC



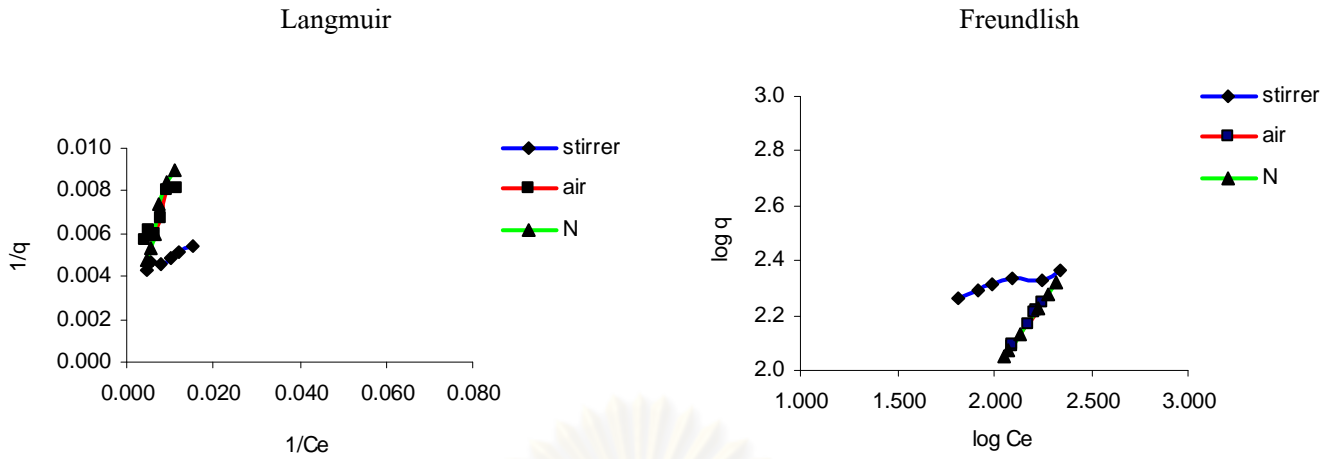
(ง) CH-PAC

รูปที่ ๗.12(ต่อ) Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 กวนด้วย ความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิ 25° ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

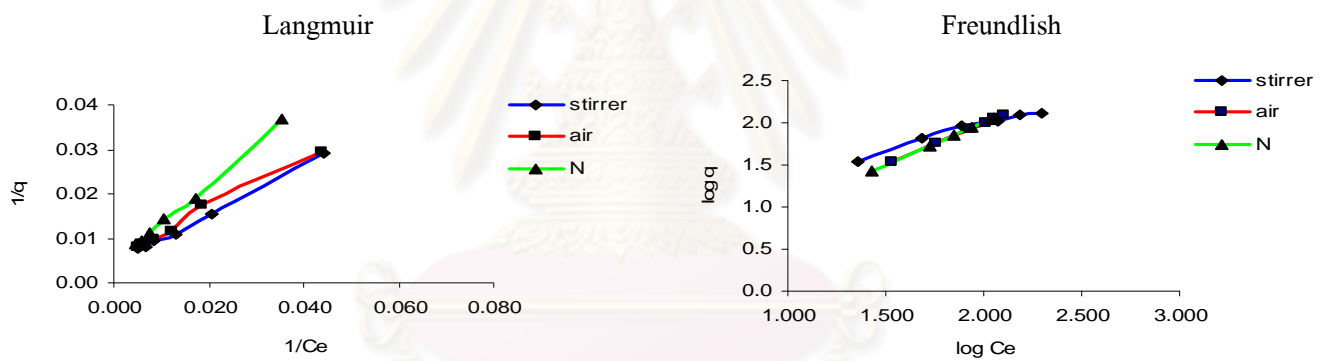


รูปที่ ๘.13 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และ Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ภายใต้อุณหภูมิ 25°C ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

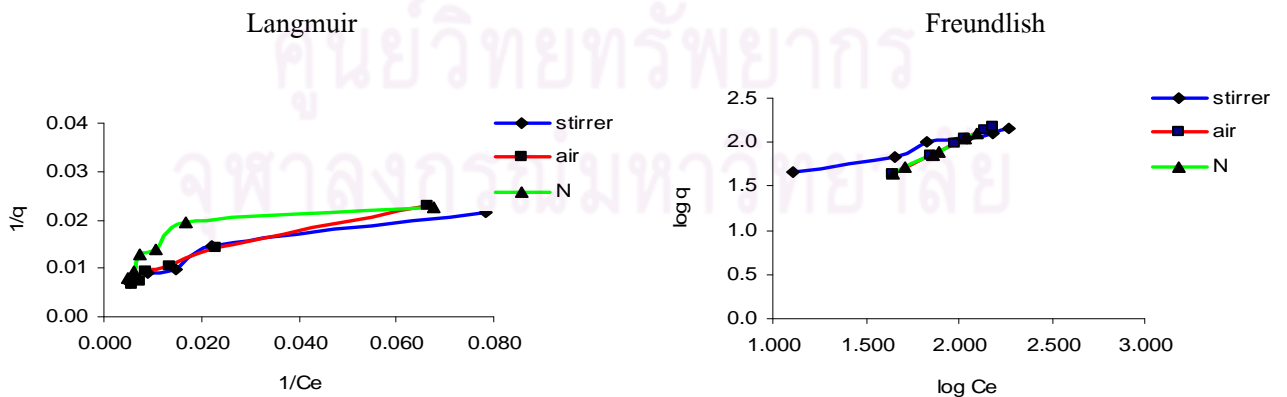


(ง) CH-PAC

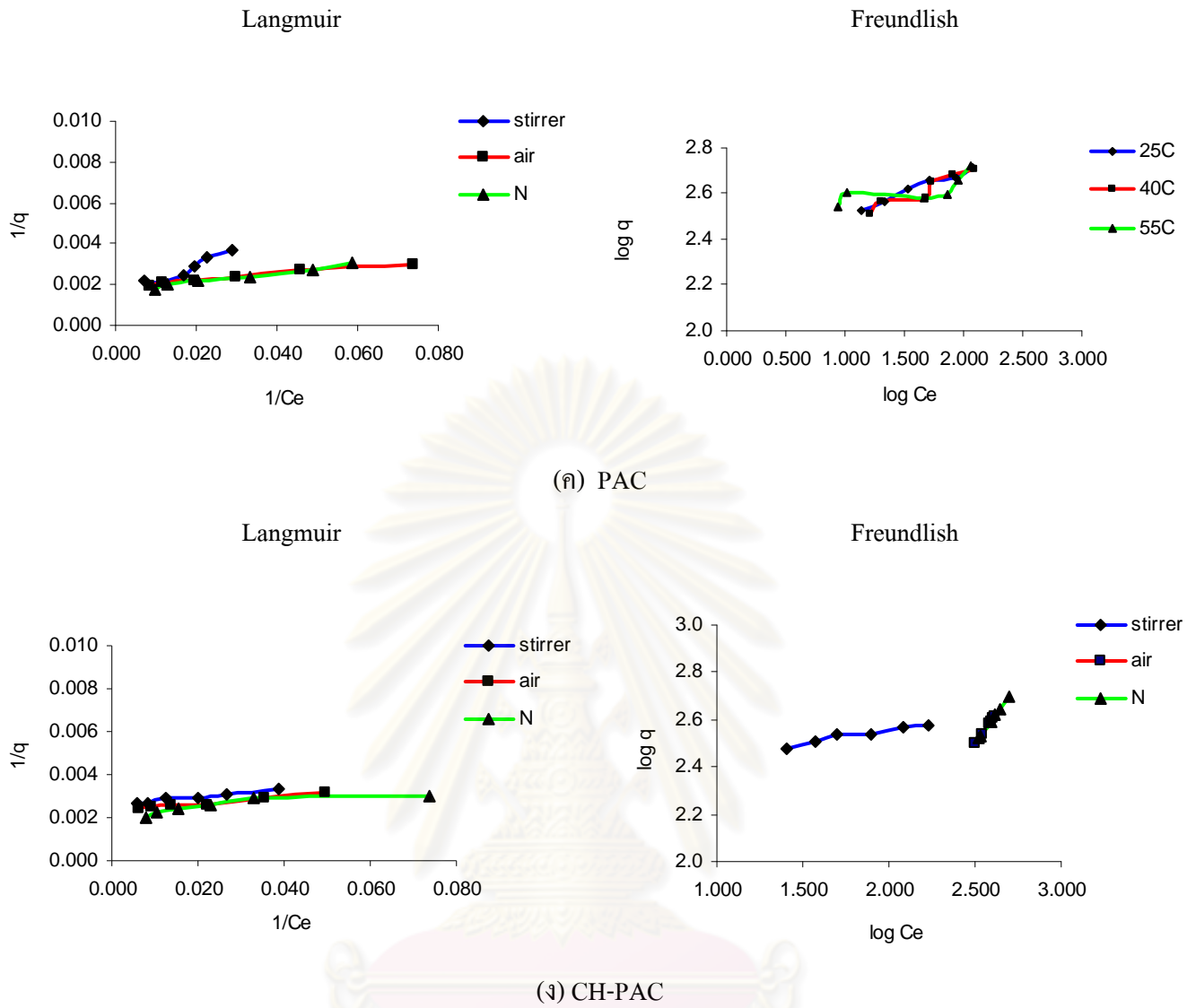
รูปที่ ๑๓.๑๓(ต่อ) Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และ Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ภายใต้อุณหภูมิ 25°C ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ก) SAC

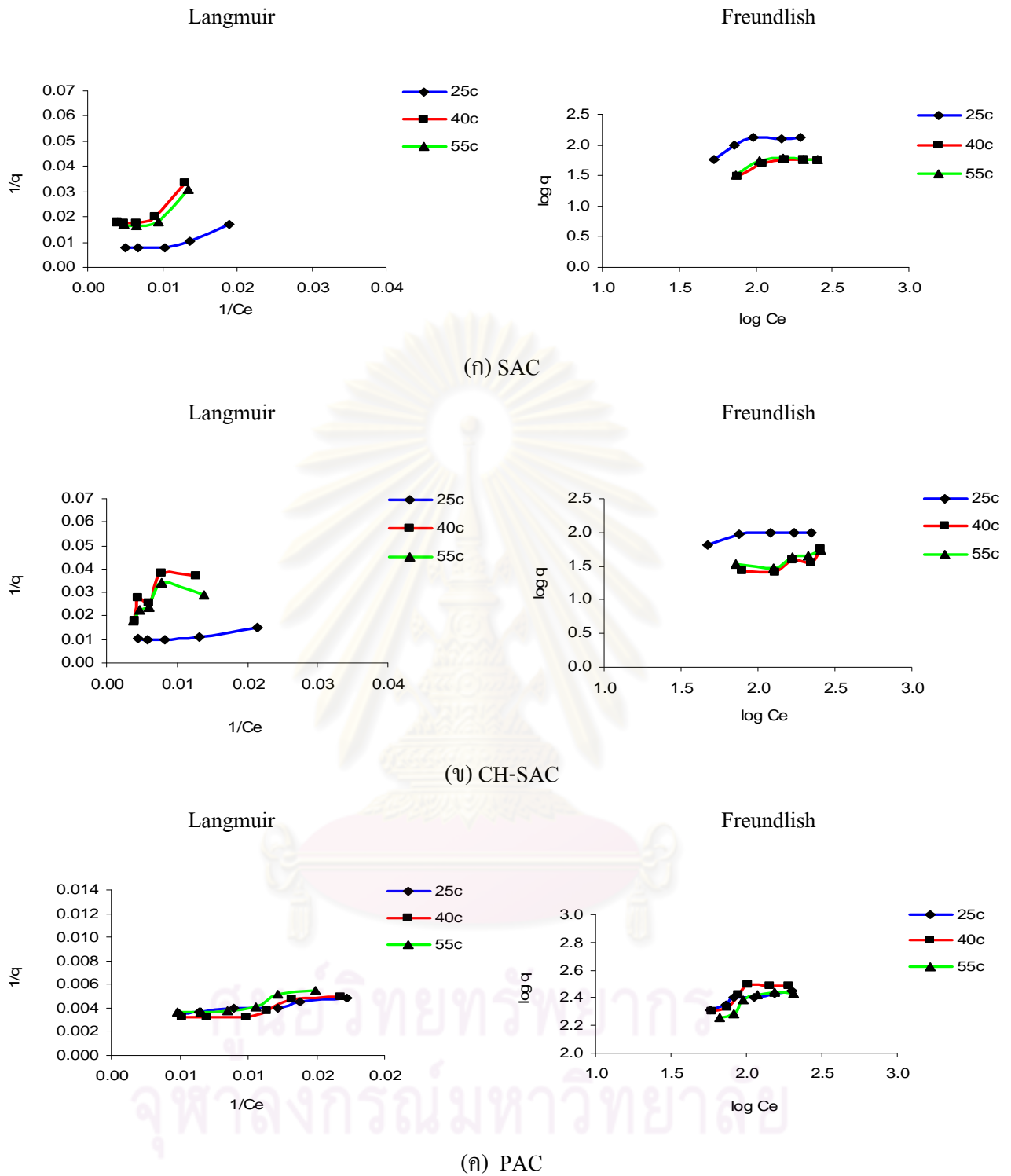


(ข) CH-SAC

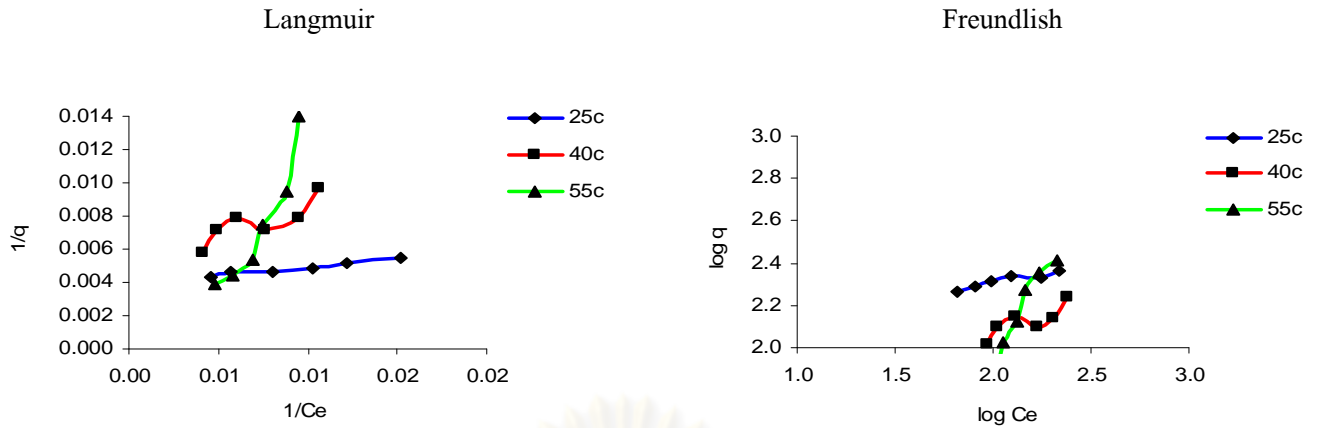


รูปที่ ๗.14 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และ Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ภายใต้อุณหภูมิ 25° C ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

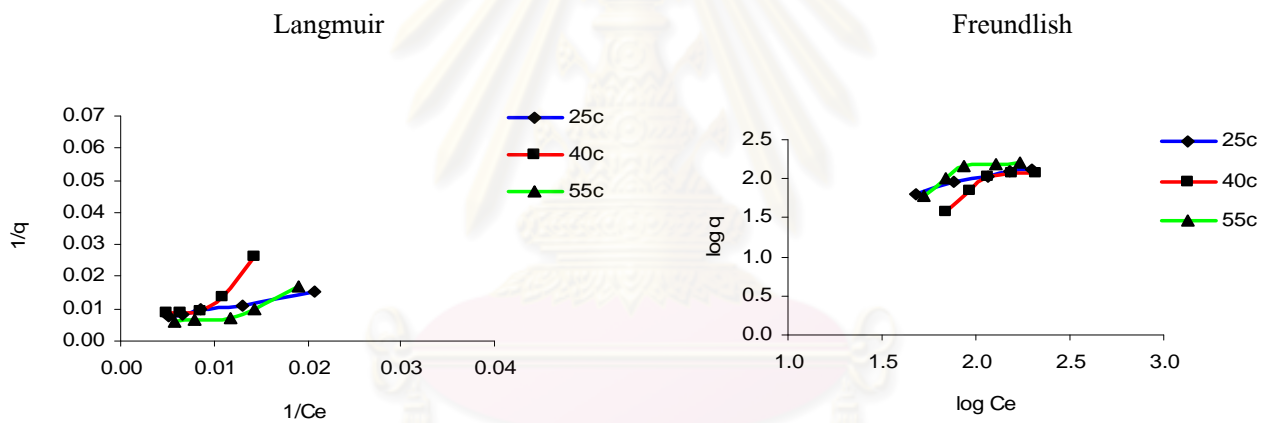


รูปที่ ๑๕.15 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

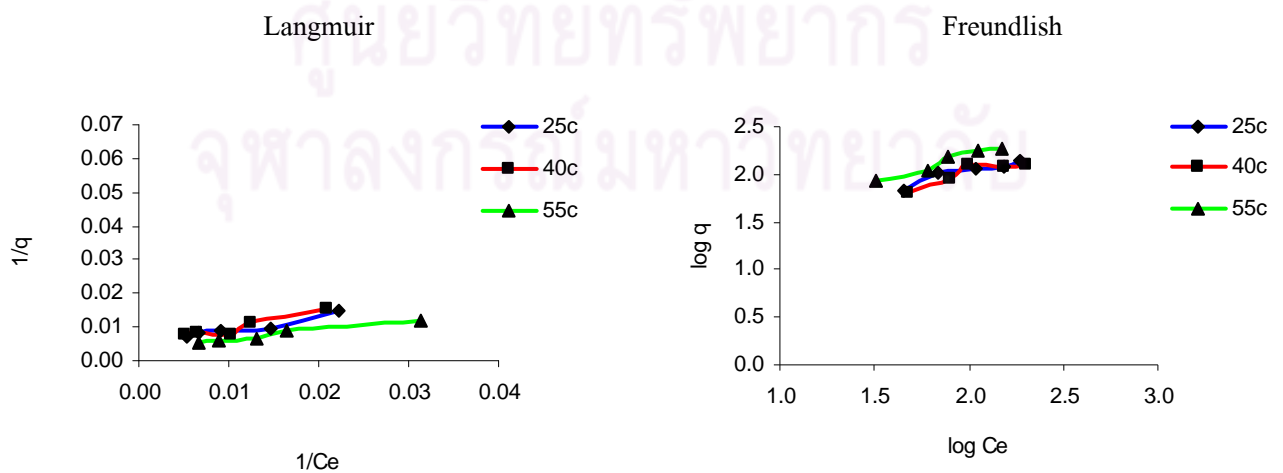


(ง) CH-PAC

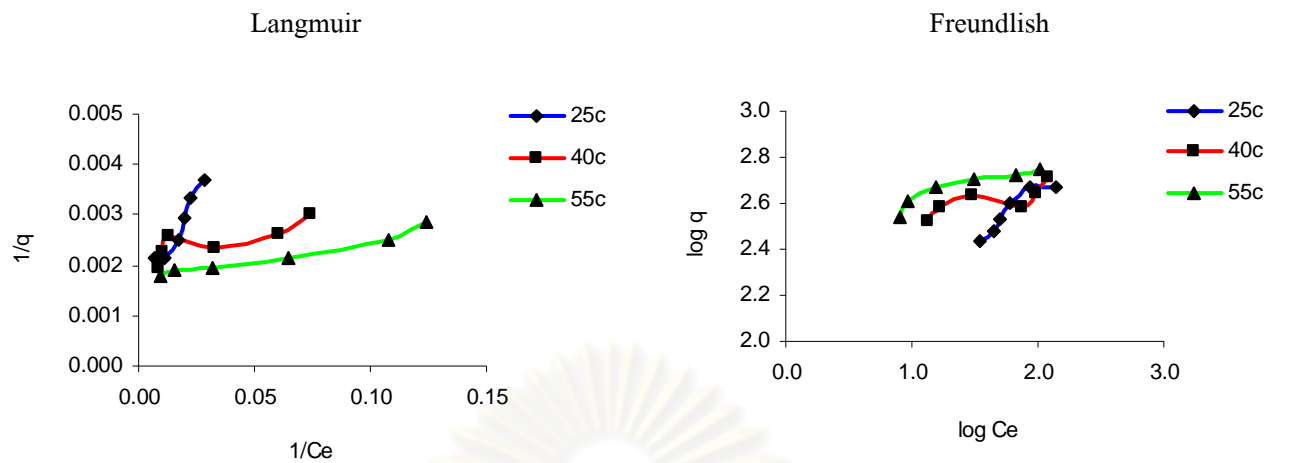
รูปที่ ๗.15 (ต่อ) Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



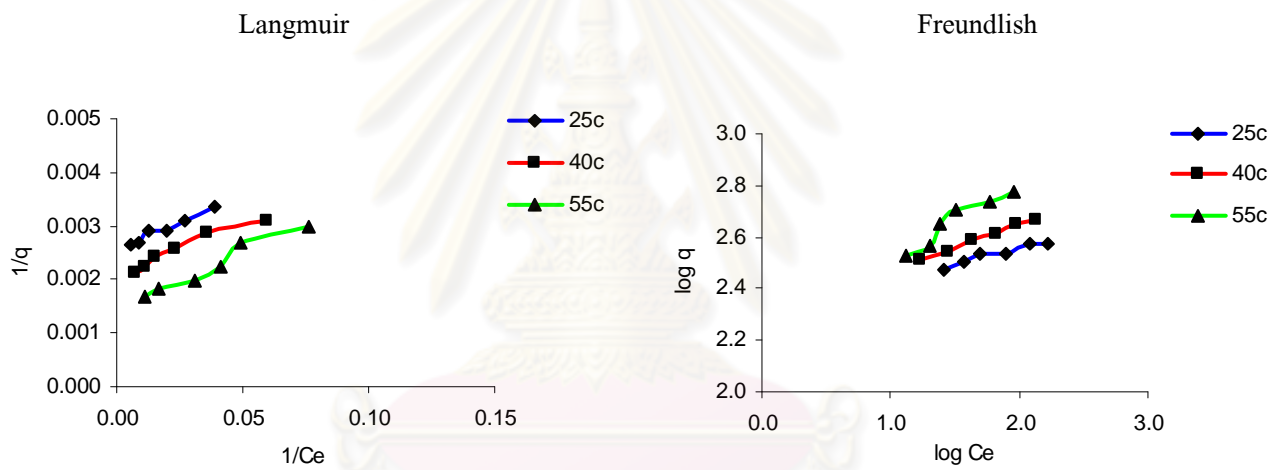
(ก) SAC



(ข) SAC

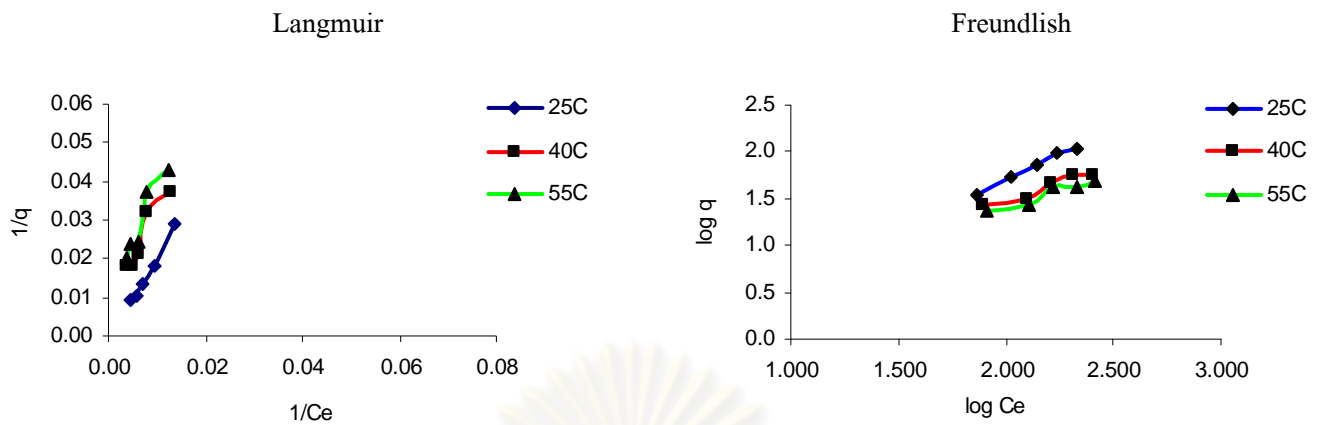


(ค) PAC

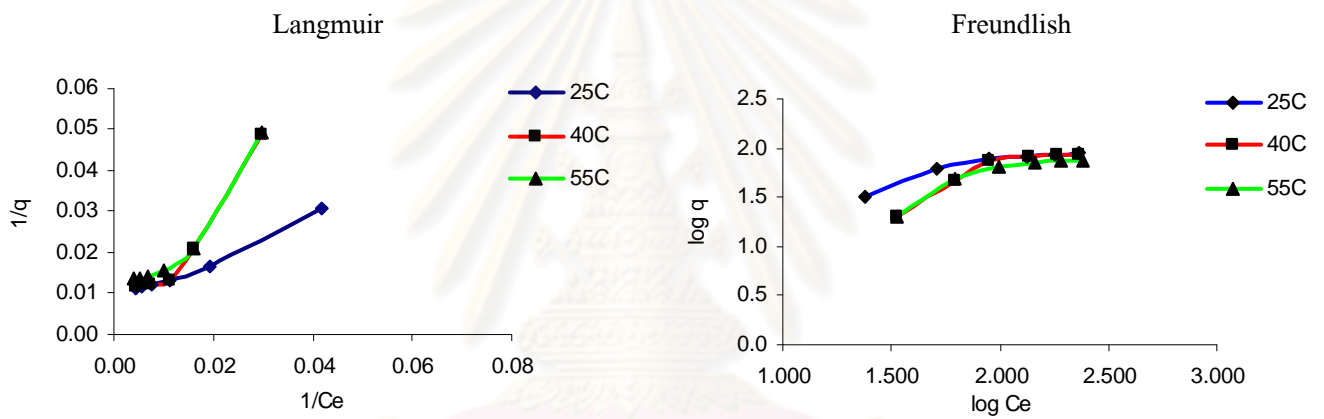


(ง) CH-PAC

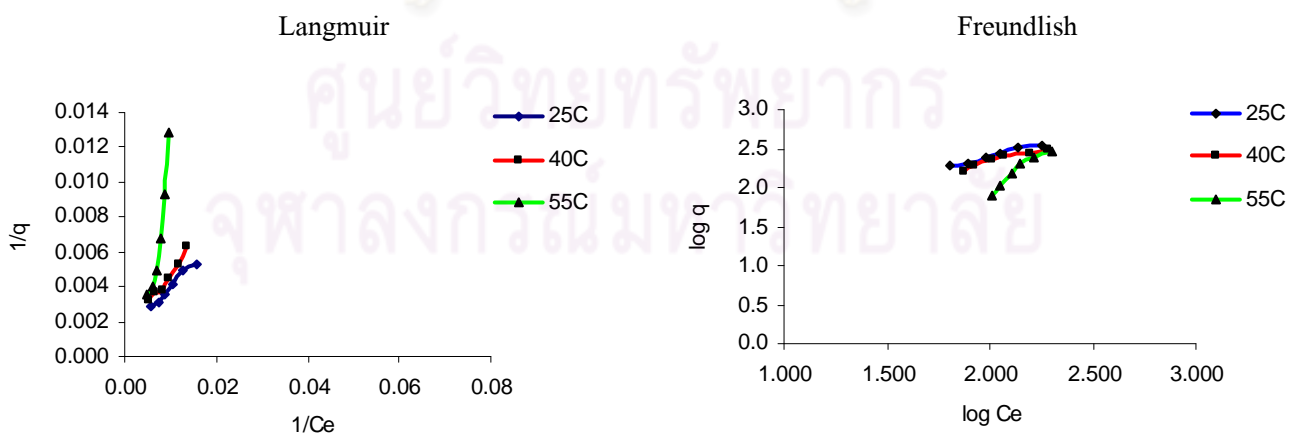
รูปที่ ๑๖.16 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 ที่อุณหภูมิ 25°C, 40°C, 55°C กวนด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ค่าพีเอช 7 ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



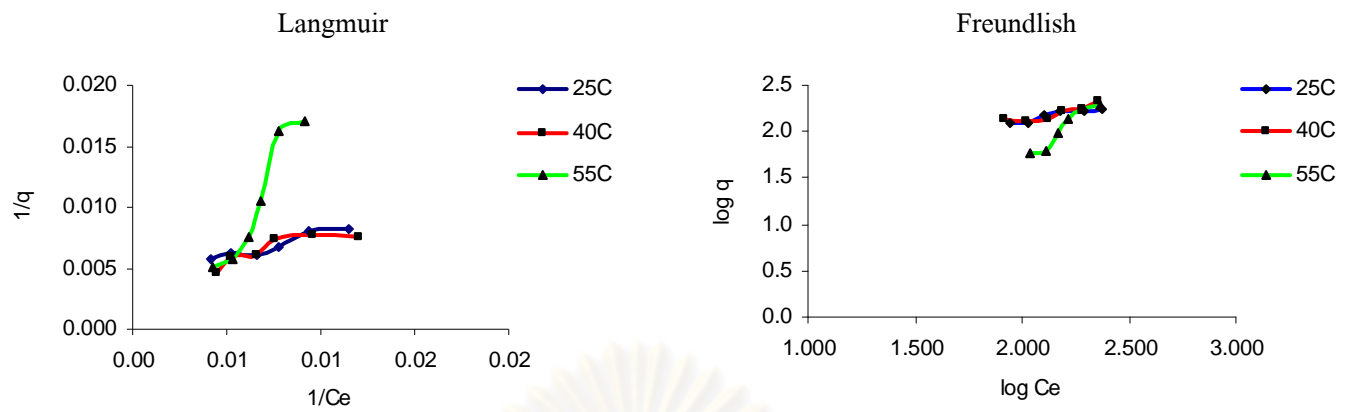
(ก) SAC



(ข) CH-SAC



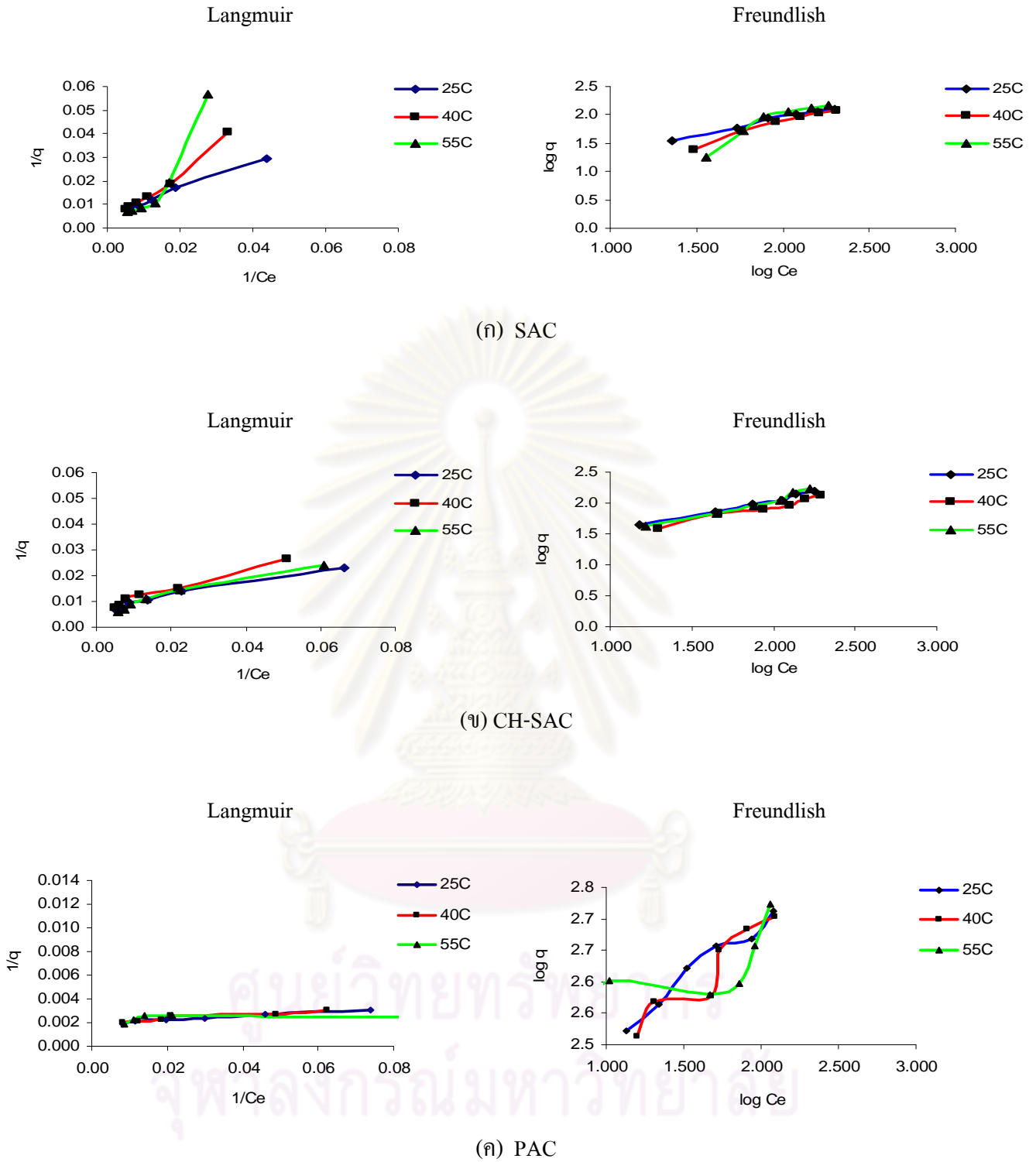
(ค) PAC



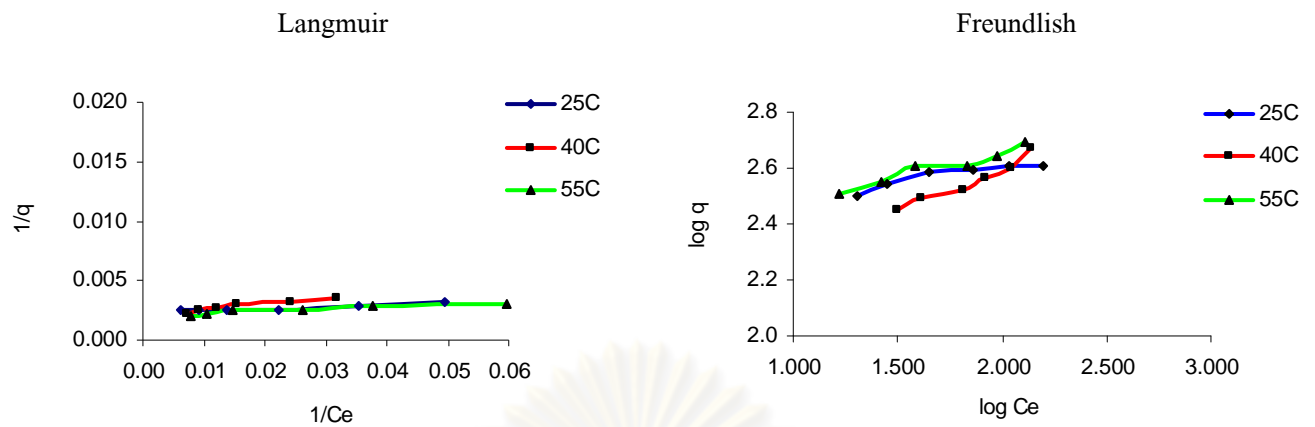
(ง) CH-PAC

รูปที่ ๑๗.17 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี RB 5 ที่อุณหภูมิ 25°C, 40°C, 55°C ภายใต้ค่าพีเอช 7 เดิมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.18 Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C ภายใต้ค่าพีเอช 7 เต็มอากาศด้วย Qg เท่ากับ 0.6 L/min ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC



(ง) CH-PAC

รูปที่ ๘.18 (ต่อ) Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ของการดูดซับสี BY 1 ที่อุณหภูมิ 25 °C, 40 °C, 55 °C ภายใต้ค่าพีเอช 7 เดิมอากาศด้วย Q_g เท่ากับ 0.6 L/min ด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) SAC (ข) CH-SAC (ค) PAC (ง) CH-PAC

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปนัดดา โลหะสาร เกิดวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย