

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับสารละลายสีย้อมคอง โกรเรดด้วยถ่านกัมมันต์ในเบดนิ่ง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONGO RED DRY ADSORPTION IN A FIXED BED OF ACTIVATED CARBON



MR. NOPPARAT PUTTASUWAN
MR. SUKSATIT BAMRUNGYA

**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR IN ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การคุชับสารละลายที่ย่อมคองโกเรดด้วยถ่านกัมมันต์ในเบดนิ่ง
โดย นายนพรัตน์ พุทธสุวรรณ
นายสุขสถิตย์ บำรุงยา
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุล

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ดิฉัน ผศ.ดร.สุวิมล

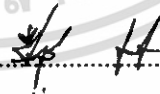
ประธานกรรมการ

(อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุล)



กรรมการ

(ดร.อนันท์ นัมคณิศร)



กรรมการ

(อาจารย์วันฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การดูดซับสารละลายสีของโกเรดด้วยถ่านกัมมันต์
ในเบคนิง

โดย

นายนพรัตน์ พุทธสุวรรณ

นายสุขสถิตย์ บำรุงยา

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์

ปริญญานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของโกเรด เพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นโครงการนี้จึงศึกษาการดูดซับสารละลายสีของโกเรด ออกจากน้ำเสียด้วยตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ในเบคนิง โดยใช้อัตราการไหลของสารป้อน 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และจากการศึกษาผลของความสูงของคอลัมน์ที่ 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรด เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณของสารละลายสีของโกเรด ที่ถูกดูดซับไว้เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของคอลัมน์มากขึ้น และจากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรดที่ 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ความสูงของคอลัมน์เป็น 10 เซนติเมตร พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรดเพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษานี้ใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่าการทดลองเป็นการดูดซับแบบ unfavorable isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Congo red dry adsorption in fixed bed of activated carbon adsorbent

By Mr.Nopparat Puttasuwan
Mr.Susatit Bamrungya

Advisor Mrs.Siripan Murathathanyaluk

Report for Bachelor's Degree of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project studied the efficiency of the adsorption of congo red dye which will be used as an alternative waste water treatment. The adsorption of the congo red dye from waste water was studied using a fixed bed which is packed with activated carbon adsorbent. At flow rate of 10 ml/min, initial concentration of activated carbon of 10 ml/l and room temperature, the amount of congo red being adsorbed was increased as the height of fixed bed increased from 5, 10, 15 and 20 cm. Upon varying the initial concentration of activated carbon from 10, 20, 30 and 40 mg/g while holding the height of a fixed bed constant at 10 cm, the saturated time decreased with increasing initial concentration of activated carbon. In addition, the adsorption of congo red followed an unfavorable isotherm.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณะ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า รวมทั้งยังตรวจแก้รายงานให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ และห้องทดลองในการดำเนินงาน

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยจัดหาเครื่องมือให้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

คณะผู้จัดทำ

นายนพรัตน์ พุทธสุวรรณ

นายสุขสถิตย์ บำรุงยา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ก
สารบัญภาพ	ข
สัญลักษณ์	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานปริญญาโท	2
1.3 ขอบเขตของงานปริญญาโท	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การดูดซับ	3
2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	5
2.3 สีเชื่อม	9
2.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	12
2.5 หลักการดูดซับในเบดนิ่ง	15
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 อุปกรณ์	24
3.2 สารเคมี	24
3.3 วิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสี	27
4.2 การศึกษาผลของความสูงของเบด	29
4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้น	30
4.4 การศึกษาผลค่าความสามารถของการดูดซับ	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	32
5.2 การศึกษาผลของความสูงของเบด	32
5.3 การศึกษาผลของความเข้มข้น	32
5.4 ข้อเสนอแนะ	33
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลาย สีกองโกเรด โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง	28
ตารางที่ ข.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สร้างกราฟมาตรฐาน	37
ตารางที่ ค.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของสารละลาย สีกองโกเรด โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง	39
ตารางที่ ง.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความสูงต่างๆ	42
ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายขาออกต่อความเข้มข้นของสารละลาย เริ่มต้นที่ความสูงต่างๆ	43
ตารางที่ ฉ.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นขาออกที่ความเข้มข้นต่างๆ	44
ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายขาออกส่วนด้วยความเข้มข้นของสารละลาย เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆ	45
ตารางที่ ฉ.1 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับที่ความสูง 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร	49
ตารางที่ ฉ.2 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้นขาเข้า 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	49

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นไอโซเทอร์มการดูดซับชนิดต่างๆ	5
รูปที่ 2.2 กราฟสำหรับสมการของแลงเมียร์	7
รูปที่ 2.3 กราฟสำหรับสมการของฟรุนดลิช	8
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสี่เหลี่ยมคางโกเรด	10
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของการดูดซับในเบคหนึ่งแบบอุดมคติ	15
รูปที่ 2.6 รูปแบบความเข้มข้นสำหรับการดูดซับในเบคหนึ่ง	17
รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับในเบคหนึ่ง	17
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการดูดซับสำหรับบริเวณถ่ายเทมวลลักษณะ (ก) แคบ และ (ข) กว้าง	19
รูปที่ 2.9 ผลของการเคลื่อนที่ของบริเวณการถ่ายเทมวลต่อไอโซเทอร์มของการดูดซับ	19
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับในเบคหนึ่ง	21
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p_2 กับ X	23
รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองการดูดซับแบบกะ	26
รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองการดูดซับแบบเบคหนึ่ง	26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับในรูปของน้ำหนักตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ	27
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ unfavorable isotherm	28
รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการดูดซับที่ความสูงของเบค 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร	29
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายคือ 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร	30
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p_2 กับ X	31
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสี่คองโกเรดที่อุณหภูมิห้อง	37

สัญลักษณ์

c	: ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ	(กรัม/มิลลิลิตร)
c_b	: ความเข้มข้นของสาร ณ จุด t_b	(กรัม/มิลลิลิตร)
c_0	: ความเข้มข้นของสารป้อน	(กรัม/มิลลิลิตร)
K	: ค่าคงที่การดูดซับ	
L_{ideal}	: ความยาวของเบดนิ่งที่ต้องมีค่าน้อยกว่า L_B (เซนติเมตร)	
L_B	: ความยาวของเบดนิ่ง	(เซนติเมตร)
LES	: ความยาวของเบดที่สภาวะสมดุล	(เซนติเมตร)
LUB	: ความยาวของเบดที่ไม่ถูกใช้งาน	(เซนติเมตร)
M	: มวลของตัวดูดซับที่ใช้	(กรัม)
n	: ค่าคงที่ของ Freundlich	
N_0	: ค่าความสามารถของการดูดซับ ณ จุดเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	
q	: ปริมาณการดูดซับแสดงในรูปของน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ	(มิลลิกรัม/กรัม)
q_b	: ปริมาณการดูดซับ ณ จุด t_b	(มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับ / กรัมของตัวดูดซับ)
q_{max}	: ปริมาณการดูดซับสูงสุดที่สภาวะสมดุล	(มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับ / กรัมของตัวดูดซับ)
q_0	: ปริมาณการดูดซับก่อนทำการดูดซับ	(มีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับตัวดูดซับใหม่)
q_{sat}	: ปริมาณการดูดซับทั้งหมดจนกระทั่งตัวดูดซับอิ่มตัว	(มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับ / กรัมของตัวดูดซับ)
t	: เวลา	(นาที)
t_b	: เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายขาออกมีค่าเท่ากับ 5% (นาที)	
t_{ideal}	: เวลาที่เริ่มถึงระยะที่ L_{ideal}	(นาที)
t^*	: เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบอุดมคติ	(นาที)
u_c	: ความเร็วในการเคลื่อนที่ของบริเวณการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นต่างๆ (เซนติเมตร/นาที)	
V	: อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที/ตารางเซนติเมตร)	
X	: ความสูงของชั้นดูดซับ	(เซนติเมตร)
WES	: น้ำหนักของตัวดูดซับในเบดที่สภาวะสมดุล (กรัม)	
WUB	: น้ำหนักของตัวดูดซับในเบดที่ไม่ถูกใช้งาน (กรัม)	
η	: ประสิทธิภาพการดูดซับ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศไทยในปริมาณที่สูง ขณะเดียวกันก็ก่อให้เกิดปัญหาทางภาวะทางน้ำจากการปนเปื้อนของสีย้อม ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมสูง และมีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในปริมาณมากเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมทั่วไป ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ผลเสียที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดปริมาณของออกซิเจนที่จะเข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และยังคงปริมาณแอสอนิกที่ตกสู่ผิวหน้าทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง เมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตายได้

โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่ จะมีการสร้างระบบบำบัดน้ำภายในโรงงาน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นระบบบำบัดทางชีววิทยา หรือระบบบำบัดทางเคมี และการบำบัดน้ำเสียของโรงงานนั้นมักจะทำแบบกะ ซึ่งไม่สามารถที่จะทำได้อย่างต่อเนื่องและจะได้ประสิทธิภาพที่ไม่แน่นอน ประกอบกับการที่กฎหมายกำหนดแต่เพียงว่าสีที่ออกมาจากน้ำทิ้งของโรงงานต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจเท่านั้น จึงทำให้โรงงานไม่ได้ใส่ใจกับการบำบัดอย่างจริงจัง

ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ กระบวนการดูดซับสารละลายสีด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ในเบคนิง เพราะถ่านกัมมันต์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงและหาได้ง่าย สำหรับการดูดซับสารละลายสีด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ในเบคนิงจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องกระบวนการที่ไม่ต่อเนื่องได้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายสีของโกเรด ด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์
ในเบคกิ้ง

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับในเบคกิ้ง
2. ทำการทดลองหาไอโซเทิร์มของการดูดซับเพื่ออธิบายประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของโกเรด ด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์
3. ศึกษาผลของความสูงในการบรรจุตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารป้อนที่มีผลต่อการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เข้าใจหลักการและขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ
2. เป็นการลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การดูดซับ[1],[2]

การดูดซับ คือ กระบวนการจับโมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซด้วยของแข็งหรือของเหลว โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับ(Adsorbate)จะอยู่บนผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง นิยมใช้สารประกอบที่มีรูพรุนเป็นสารดูดซับเพราะมีพื้นที่ผิวภายในมาก โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารถูกดูดซับ คุณสมบัติของทั้งสารถูกดูดซับและสารดูดซับ และขนาดรูพรุนของสารดูดซับ การดูดซับโมเลกุลของสารบนผิวของสารดูดซับ อาจเกิดจากแรงทางกายภาพหรือแรงจากทางเคมีหรือจากทั้งสองแรงร่วมกัน

2.1.1 กลไกการดูดซับ

โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

- 1) การแพร่ไปยังผิวของสารดูดซับ (Diffusion to adsorbent surface) โมเลกุลของสารถูกดูดซับแพร่ผ่าน ไปยังผิวด้านนอกของอนุภาคของสารดูดซับ
- 2) การแพร่เข้ารูพรุนของสารดูดซับ (Migration into pores of adsorbent) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอกซึ่งมีพื้นที่น้อย ไปยังรูพรุนภายในอนุภาค ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า และการดูดซับเกือบทั้งหมดจะยึดติดอยู่ภายในรูพรุน
- 3) การดูดซับชั้นเดียวของสารดูดซับอย่างรวดเร็ว (Monolayer build up of adsorption) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [5]

1) ขนาดของตัวดูดซับ

ในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นชนิดไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่มีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ

2) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

3) ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ

การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายและไปเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น ในกรณีที่สารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลายตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้(หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นการที่ยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามถ้ากล่าวข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

4) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่เป็นตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ และจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

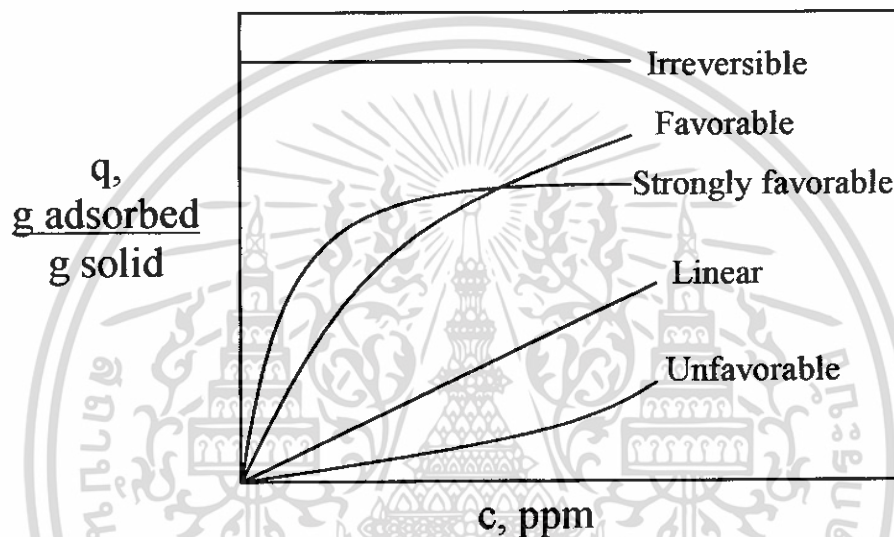
5) ความมีขั้ว (Polar) ของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

6) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะ H^+ เพิ่มขึ้นและ H^+ ยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (Neutralize) เสมอเนื่องจากคาร์บอนเป็นนอนโพลาร์ จึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาร์ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี

7) อุณหภูมิ อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิเพิ่ม แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับ [10]

ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นในเฟสของไหลและความเข้มข้นในอนุภาคของตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่ง สำหรับก๊าซ ความเข้มข้นจะแสดงในรูปร้อยละโดยโมลหรือความดันย่อย สำหรับของเหลว ความเข้มข้นมักแสดงในรูปหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตรหรือไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนของแข็งจะแสดงในรูปมวลที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ดังรูป



รูปที่ 2.1 เส้นไอโซเทอร์มการดูดซับชนิดต่างๆ

อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีการดูดซับส่วนใหญ่มักสมมติให้การจับของเหลวบนของแข็งเป็นแบบชั้นเดียว ซึ่งในส่วนของสมการที่อธิบายลักษณะของเส้นไอโซเทอร์มที่จับแบบชั้นเดียวนั้น ได้มีผู้เสนอสมการที่ใช้อธิบายในหลายรูปแบบด้วยกัน แต่สมการที่เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดมีเพียงสองสมการเท่านั้น ได้แก่ สมการของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

2.2.1 สมการไอโซเทอร์มชนิดต่างๆ

สมการไอโซเทอร์มเชิงเส้น (Linear Isotherm) เป็นเส้นไอโซเทอร์มชนิดที่พบน้อย มีสมการการดูดซับ ดังนี้

$$q = Kc \quad (1)$$

เมื่อ

q = ปริมาณที่ถูกดูดซับ (กรัมของตัวดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ)

c = ความเข้มข้นในเฟสของไหล (กรัมต่อมิลลิลิตร)

K = ค่าคงที่ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)

สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียว และโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว มีสมการการดูดซับดังนี้

$$q = \frac{q_0 c}{K + c} \quad (2)$$

q_0 = ค่าคงที่ (กรัมของตัวดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ)

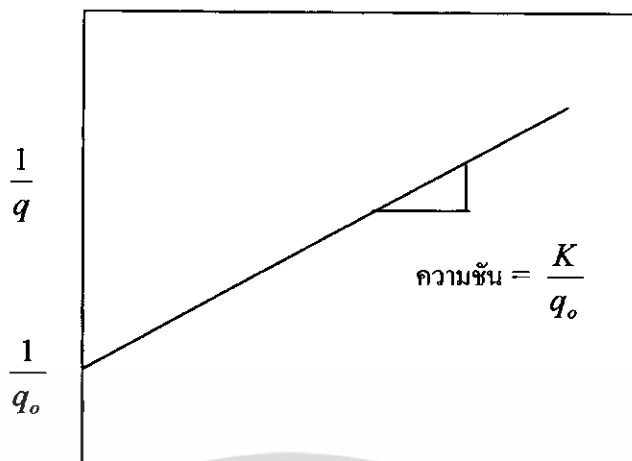
K = ค่าคงที่ (กรัมของตัวดูดซับต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า q_0 และ K ได้ด้วยวิธีพล็อตกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปสมการที่ (2) ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{K + c}{q_0 c}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{K}{q_0 c} + \frac{1}{q_0}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{K}{q_0} \cdot \frac{1}{c} + \frac{1}{q_0} \quad (3)$$



รูปที่ 2.2 กราฟสำหรับสมการของแลงเมียร์

จากสมการที่ (3) ให้ $\frac{1}{q}$ เป็นแกน y และให้ $\frac{1}{c}$ เป็นแกน x ก็จะได้จุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{q_0}$ และจะได้ความชันเป็นค่า $\frac{K}{q_0}$ ดังรูปที่ 2.2

สมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นต่ำ มีสมการการดูดซับดังนี้

$$q = Kc^{1/n} \quad (4)$$

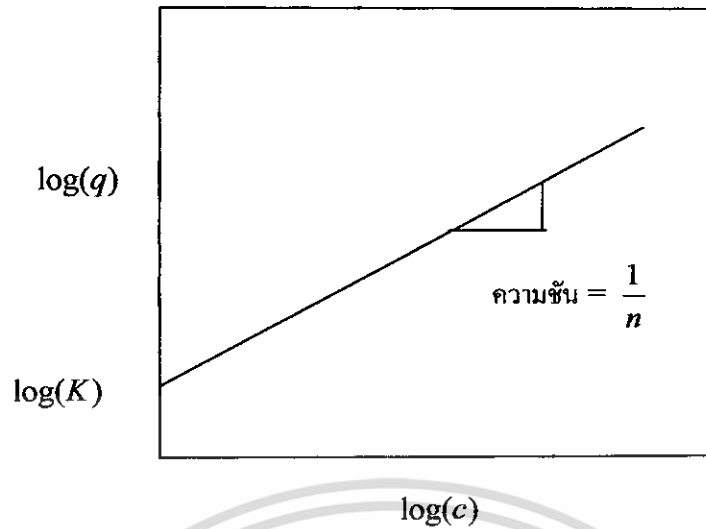
เมื่อ

K และ n = ค่าคงที่

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า K และค่า n ได้ด้วยวิธีพล็อตกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ลอการิทึมมาจัดรูปแบบสมการ(4) ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟสำหรับสมการของฟรอนคิช

จากสมการที่(5) ให้ $\log(q)$ เป็นแกน y และให้ $\log(c)$ เป็นแกน x ก็จะได้จุดตัดแกน y คือ $\log(K)$ และจะได้ความชันเป็นค่า $\frac{1}{n}$ ดังรูปที่ 2.3

2.3 ลีเทียม [6]

ลีเทียมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ คุณคิดเส้นใยได้ การนำลีเทียม ผ้ามาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของลีสกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของลีสกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของลีเทียมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการคูตติค (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการคูตติคกับเส้นใย คือ

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
2. แรงแวนเดอวาล์ (Van der Waal's forces)
3. แรงอิออนิก (Ionic forces)
4. พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond)

การคูตติคกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้ง อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) อิทธิพลของรูปร่างและขนาดโมเลกุลของลีสก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้เป็นอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของลีเทียมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดลีสดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของลีเทียมมีลักษณะแบน และมีความกว้างความยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดลีสที่มีความคงทนสูงมากขึ้น

2.3.1 คุณสมบัติของลีเทียม

ในลีเทียมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการใช้ ลีเทียม อัตรากาเกิด ปฏิกริยา การให้และรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของลีเทียมแต่ละชนิด มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของลีสดังนี้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับอนุมูลของเส้นใยและลีเทียม
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง ๆ
3. จลนพลศาสตร์ของลีเทียม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของลีส
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความชื้น
7. ความทนต่อความร้อน และอื่น ๆ

การเลือกลีเทียมต้องเลือกตามชนิดของวัตถุ ที่จะย้อมมีความคงทนพอดี สามารถย้อมออกมาได้เหมือน ลีสตามตัวอย่าง และมีราคาถูกพอตามต้องการ ลีเทียมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวน

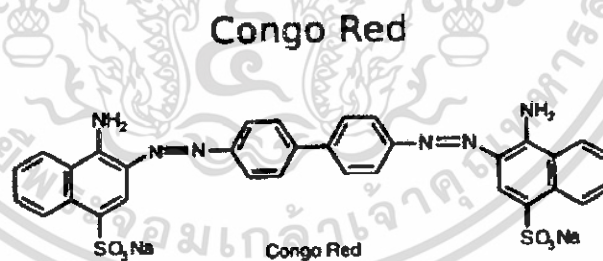
มากและมัก จะมีสีสันทันใกล้เคียงกัน หากต้องการจดจำ เช่น สีฟ้าอาจจะมีสีฟ้าอ่อน ไปทางแดง หรือฟ้าอ่อนไปทางเหลือง

2.3.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้หลายแบบ เช่น จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี จำแนกตามลักษณะตามกายภาพ จำแนกตามลักษณะการใช้งาน และจำแนกตามลักษณะการย้อม

- การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

1) สีย้อมอะโซ (Azo dyes) คือสีย้อมที่มีกลุ่มอะโซ ($N=N$) อยู่ในโครงสร้าง โมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณสมบัติที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสี แต่โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และสีดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง โดยสีย้อมคองโกเรดเป็นสีชนิดไอโอโซ สามารถละลายในน้ำได้ร้อยละ 40 ซึ่งเป็นสารละลายที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการย้อม สีย้อมคองโกเรด เมื่อละลายในน้ำจะมีสีแดงเข้ม และเหมาะสำหรับใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย สีย้อมคองโกเรดมีคุณสมบัติที่ไวต่อแสงและกรด มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสีย้อมคองโกเรด [3]

2) สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด สีที่มีความสำคัญ คือ สีม่วง ฟ้า เขียว และแดงแสด เป็นสีที่มีความเอกละเอียดเป็นเอกละเอียดที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สว่างสดใส และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มข้นของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

3) สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) เป็นสีซัลเฟอร์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีกลุ่มนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีซัลเฟอร์ทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูก นิยมใช้ย้อมสีที่บ่งต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีกลุ่มนี้มีให้เลือกไม่มาก ส่วนมากจะเป็นสีที่บ่งไม่สดใส

4) สีซัลฟอนิไดคอยด์ (Indigoid dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

2.3.3 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1) น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมผ้า

- กระบวนการต้มแป้ง เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มแป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้
- กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า
- กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออกโดยใช้สารเคมีคือ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อมเพื่อให้สีติดสีดียิ่งขึ้นและสีไม่เปลี่ยน
- กระบวนการชุบมัน เป็นการทำให้ผ้าเพิ่มความมันและดูสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่มทำได้โดยการชุบผ้าลงในน้ำยาโซดาไฟที่อุณหภูมิต่ำ
- กระบวนการย้อมสี และการตกแต่งพิเศษ
- กระบวนการพิมพ์ผ้า

2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

3) น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้นซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

4) น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน

2.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [5],[7]

ส่วนประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีววิทยาและบางส่วนมีพิษก่อให้เกิดกลิ่น สี และรส ซึ่งไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีธรรมดาได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยการดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีประมาณ 500 – 1,400 ตารางเมตร/กรัม และที่สำคัญรองลงมาได้แก่ ลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านกัมมันต์นั้น ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากพืชจะมีลักษณะผิวเป็นด่าง มีผลต่อการดูดซับสีและสารประกอบอินทรีย์ไม่อิ่มตัว และพื้นที่ของถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ (Nonpolar) ดูดซับสารอินทรีย์ได้ง่าย แต่ดูดซับสารอินทรีย์ที่มีประจุได้ยาก

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุน รูพรุนใหญ่ (Macropore) เป็นรูที่มีขนาดกว้าง 10 – 1,000 Å รูพรุนใหญ่มักอยู่ในบริเวณผิวนอกของถ่านกัมมันต์ เป็นทางให้โมเลกุลสารอินทรีย์ผ่านเข้าไปในระยะแรก โมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ต่อจาก นั้นจะแพร่เข้าไปในรูพรุนของถ่าน อัตราการดูดซับจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน

การดูดซับเป็นวิธีทางฟิสิกส์เคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบางชนิดในน้ำเสียซึ่งไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีอื่น วิธีนี้สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ซีโอดี บีโอดี ที กลิ่น และรส เป็นต้น ออกจากน้ำเสียได้

ถ่านที่ใช้ในกระบวนการดูดซับนั้นเป็นถ่านที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการเฉพาะทำให้เกิดรูพรุนมากมายบนพื้นผิว อาจทำได้จากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ไม้ ขี้เลื่อย ถ่านหิน กะลามะพร้าว ฯลฯ วัตถุดิบแต่ละชนิดจะให้ถ่านดูดซับที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ถ่านดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ทำจากถ่านหินและถ่านโค้กชนิดต่าง ๆ เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย

ถ่านดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ถ่านชนิดเกล็ด (Granular Carbon) และถ่านชนิดผง (Powdered Carbon) ถ่านชนิดเกล็ดมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงเบอร์ 50 ส่วนถ่านชนิดผงมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงเบอร์ 50

2.4.1 ชนิดของถ่านที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ

1) ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) แอคทีเวตเตดซิลิกา (Activated silica) ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 2,000 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากการดูดซับประเภทสารอินทรีย์มีจำกัดมาก

2) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์ต่างจากถ่านชนิดอื่น ๆ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ ถ่านกราไฟต์ คือ ถ่านกัมมันต์มีความพรุน (Porosity) มากกว่า ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกของถ่าน (Element crystallities) เพิ่มขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะได้รูพรุนเป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านธรรมชาติการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้กระทำได้โดยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบเสียก่อนจากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 400- 600 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้ยังมีอำนาจการดูดซับต่ำเนื่องจากโครงภายในคาร์บอนยังมีทาร์อุดตันอยู่ ถ่านนี้ต้องเผาต่อไปอุณหภูมิประมาณ 700 - 950 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อไล่ทาร์ ออกให้หมดจึงจะได้ถ่านกัมมันต์วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น กระดูกสัตว์ ถ่านหินบางชนิด กะลามะพร้าว เมล็ดในของผลไม้บางชนิด ฯลฯ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถทำให้ถ่านกัมมันต์หนัก 1 กรัม มีพื้นที่ผิวประมาณ 600 - 1,000 ตารางเมตร / กรัม

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวประมาณ 300 - 500 ตารางเมตร/กรัม แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่ามาก

2.4.2 รูปแบบถ่านที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ

1) ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC)

ถ่านกัมมันต์ผงมีขนาดประมาณ 10 - 50 ไมโครเมตร หรือน้อยกว่า การเติมถ่านกัมมันต์ผงอาจกระทำพร้อมกับการเติมโคแอกกูแลนต์ก็ได้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ด้วยเหตุนี้จึงนิยมเติมถ่านกัมมันต์ผงก่อนกระบวนการตกตะกอนหรือการกรองน้ำ

ถ่านกัมมันต์ผงใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและแต่งรสของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง มีรสดีขึ้น ช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ในการทำน้ำประปาให้มีรสและกลิ่นดีขึ้น ใช้ในการทำน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ผงยังใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆอีก เช่น ผงขุรส เครื่องคัมประเภทเบียร์และไวน์ ขี้ผึ้ง พลาสติก ก๊าซพิษ และในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

2) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon หรือ GAC)

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายกรองน้ำ แต่เพราะและเบาว่าทราย ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถบรรจุถึงให้น้ำไหลผ่านในลักษณะที่คล้ายกับการกรองน้ำเวลาสัมผัส ช่วงระหว่างน้ำเสียดกับถ่านอยู่ในช่วง 10-30 นาทีน้ำเสียก่อนที่จะเข้าถึงถ่านต้องกำจัดตะกอนแขวนลอยออกให้มากที่สุดก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้อำนาจการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากถูกอุดตันเร็วเกินไป

ถ่านกัมมันต์เกล็ดใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ ซึ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมโพลีเอทิลีน อุตสาหกรรมฟิล์มโปร่งใส อุตสาหกรรมคาร์บอน อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมเคลือบสี อุตสาหกรรมก๊าซ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้เป็นวัสดุทำหน้ากักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ



2.5 หลักการดูดซับในเบดนิ่ง [4],[10],[11]

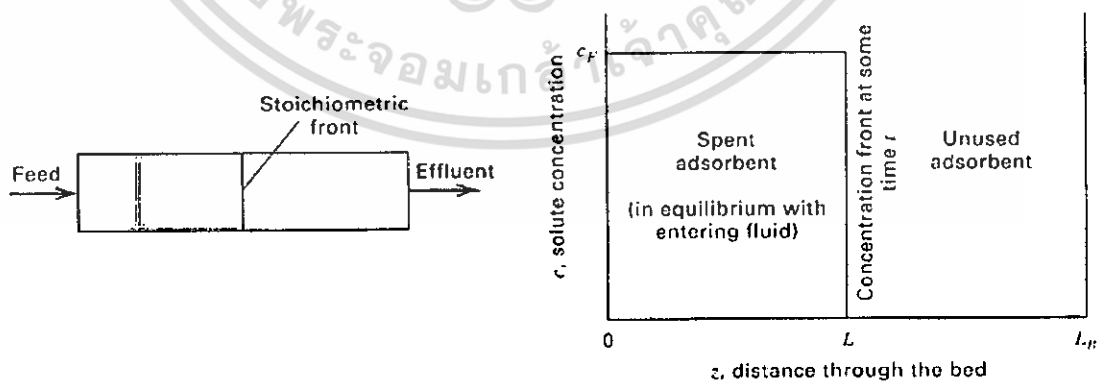
สำหรับกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยอาศัยหลักการการดูดซับในเบดนิ่งพบว่า สารละลายที่ทางออกของเบดนิ่ง จะไม่พบตัวถูกดูดซับเนื่องจากตัวดูดซับในเบดนิ่งได้ทำการดูดซับสารดังกล่าวไว้ การดูดซับจะกระทำต่อไปจนกระทั่งตัวดูดซับทำการดูดซับจนอิ่มตัว จึงจะไม่สามารถแยกตัวถูกดูดซับจากสารละลายได้

สมมติฐานที่ใช้พิจารณาการดูดซับแบบเบดนิ่ง

- (1) ความต้านทานการถ่ายเทมวลภายนอกและภายในมีค่าน้อยมาก
- (2) เป็นการไหลที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในแนวรัศมี (plug flow)
- (3) ไม่คิดผลของการแพร่ในแนวแกน
- (4) ตัวดูดซับที่นำมาเป็นตัวดูดซับใหม่
- (5) การดูดซับที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่สมดุลในทันที ทำให้สามารถนำค่าจากเส้น ไอโซเทอรั่มการดูดซับมาคำนวณได้

จากสมมติฐานทั้ง 5 ข้อ ทำให้ลักษณะของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของเบด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเรียกการดูดซับนี้ว่า เป็นการดูดซับในเบดนิ่งแบบอุดมคติ

บริเวณที่ตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยตัวถูกดูดซับ ปริมาณการดูดซับ (q) จะอยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารป้อน ความยาวและน้ำหนักของเบดที่สถานะสมดุล คือ length equilibrium section (LES) และ weight equilibrium section (WES) โดยเรียกว่า Equilibrium Zone เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเป็นศูนย์ ตัวดูดซับจะไม่ถูกใช้งานซึ่งส่วนนี้จะเรียกว่า length unused bed (LUB) และ weight unused bed (WUB)



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของการดูดซับในเบดนิ่งแบบอุดมคติ[10]

สำหรับการดูดซับในเบคหนึ่งแบบอุดมคติปริมาณการดูดซับซึ่งแสดงอยู่ในรูปของประมาณ
 ตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของสารละลายที่ป้อนเข้าสู่เบคหนึ่ง
 $q = f\{c\}$ เมื่อ $f\{c\}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$Qc_0 t_{ideal} = qM \left(\frac{L_{ideal}}{L_B} \right) \quad (6)$$

เมื่อ Q	คือ อัตราการไหลของสารป้อน	(มิลลิลิตร/นาที)
c_0	คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	(มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
t_{ideal}	คือ เวลาที่เริ่มถึงระยะที่ L_{ideal}	(นาที)
q	คือ ปริมาณการดูดซับแสดงในรูปของน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ	(มิลลิกรัม/กรัม)
M	คือ น้ำหนักรวมของตัวดูดซับในเบคหนึ่ง	(กรัม)
L_B	คือ ความยาวของเบคหนึ่ง	(เซนติเมตร)

$$L_{ideal} = LES = \left(\frac{Qc_0 t_{ideal}}{qM} \right) L_b \quad (7)$$

$$LUB = L_b - LES \quad (8)$$

$$WES = M \left(\frac{LES}{L_b} \right) \quad (9)$$

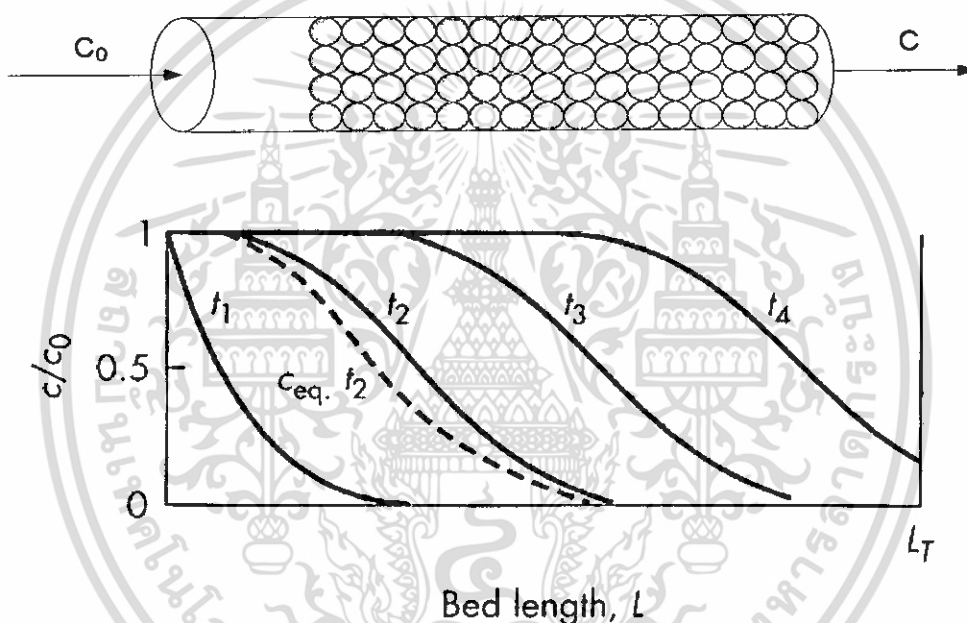
$$WUB = M - WES \quad (10)$$

สำหรับการดูดซับที่ไม่ใช่การดูดซับในเบคหนึ่งแบบอุดมคติ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของไหลและเฟสของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่งในเบค หากขณะเริ่มต้นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของแข็ง(ตัวดูดซับ)มีค่าเป็นศูนย์ การถ่ายเทมวลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณ ใกล้ทางเข้าของเบคซึ่งเป็นบริเวณที่ของไหลเริ่มสัมผัสกับตัวดูดซับ โดยความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหลจะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลจนถึงศูนย์เมื่อเทียบกับระยะทางก่อนที่ของไหลจะมาถึงปลายเบค รูปแบบความเข้มข้นนี้แสดงดังเส้นโค้ง η ในรูปที่ 2.6 เมื่อ c/c_0 คือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหลที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารป้อน

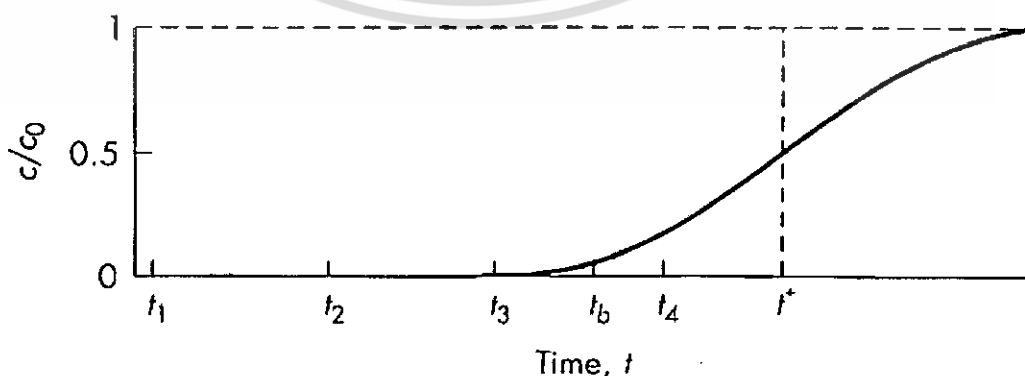
สุ่วหักหอสุมคกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หลังจากเวลาผ่านไปเล็กน้อย ของแข็งบริเวณใกล้ทางเข้าของเบดเกือบอิมด้วทำให้การถ่ายเทมวลจึงเกิดขึ้นบริเวณห่างจากทางเข้าของเบด โดยมีลักษณะการกระจายด้วของความเข้มข้นเป็นรูปด้ว S แสดงด้งเส้นโค้ง t_2 บริเวณการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เรียกว่า บริเวณถ่ายเทมวล (mass transfer zone ; MTZ) ซึ่งมีขอบเขตจำกัดของค่า c/c_0 คือ 0.05 ถึง 0.95

เมื่อเวลาผ่านไปบริเวณถ่ายเทมวลจะเลื่อนลงจากเบดแสดงด้วเส้นโค้ง t_3 และ t_4 โดยความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปด้วเวลาสามารถพิจารณาด้คือ ที่บริเวณทางเข้ามีความเข้มข้นของด้วถูกดูดซับบนของแข็งเกือบอิมด้ว ที่บริเวณการถ่ายเทมวลจะมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น และที่ปลายเบดจะมีความเข้มข้นเป็นศูนย์



รูปที่ 2.6 รูปแบบความเข้มข้นสำหรับการดูดซับในเบดหนึ่ง [11]



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับในเบดหนึ่ง [11]

2.5.1 เส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough Curve) [4],[11]

เส้นโค้งในรูปที่ 2.6 นี้ สามารถใช้ในการทำนายและคำนวณหาเส้นกราฟของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลที่ออกจากเบดกับเวลา ดังแสดงลักษณะกราฟในรูปที่ 2.7 ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการดูดซับ ที่เวลา t_1 และ t_2 ความเข้มข้นขาออกมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อความเข้มข้นมีค่าถึงค่าจำกัดหรือจุดยุติ(break point) การไหลของสารป้อนจะหยุดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลไปที่เบดอื่น จุดยุตินี้อ้างอิงที่ค่า c/c_0 เท่ากับ 0.05 ถึง 0.10 โดยสัดส่วนเฉลี่ยของตัวถูกละลายที่ถูกแยกออกจากตัวทำละลายตอนเริ่มต้นถึงจุดยุติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.99

ถ้าการดูดซับที่เกิดขึ้นเลยจุดยุติไปจะทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึงประมาณ 0.5 และจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงดังรูปที่ 2.7 ด้วยการคูณมวลสารทำให้เห็นว่าพื้นที่ระหว่างเส้นโค้งการดูดซับและเส้นที่ c/c_0 เท่ากับ 1 เป็นสัดส่วนกับปริมาณตัวถูกละลายทั้งหมดที่ถูกดูดซับไว้ และปริมาณที่ถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่สี่เหลี่ยมจนถึงซ้ายมือของเส้นประ ที่ t^* ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบอุดมคติสำหรับเส้นโค้งที่สมมาตรค่า t^* จะเป็นเวลาเมื่อ c/c_0 เท่ากับ 0.5

การเคลื่อนที่ของการดูดซับในเบดและผลของตัวแปรกระบวนการต่อค่า t^* สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

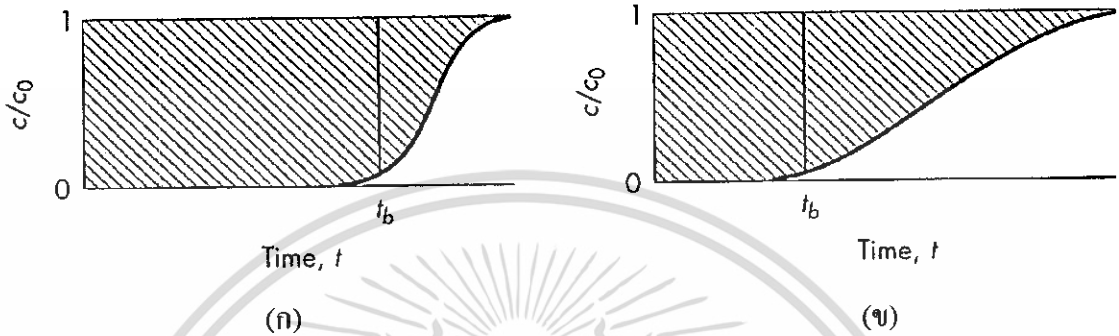
$$Qc_0t^* = M(q_{sat} - q_0) \quad (11)$$

เมื่อ q_{sat} คือ ปริมาณการดูดซับทั้งหมดจนกระทั่งตัวดูดซับอิ่มตัว (มีลิกนด์ของตัวถูกละลาย / กรัมของตัวดูดซับ)

q_0 คือ ปริมาณการดูดซับก่อนทำการดูดซับ (มีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับตัวดูดซับใหม่)

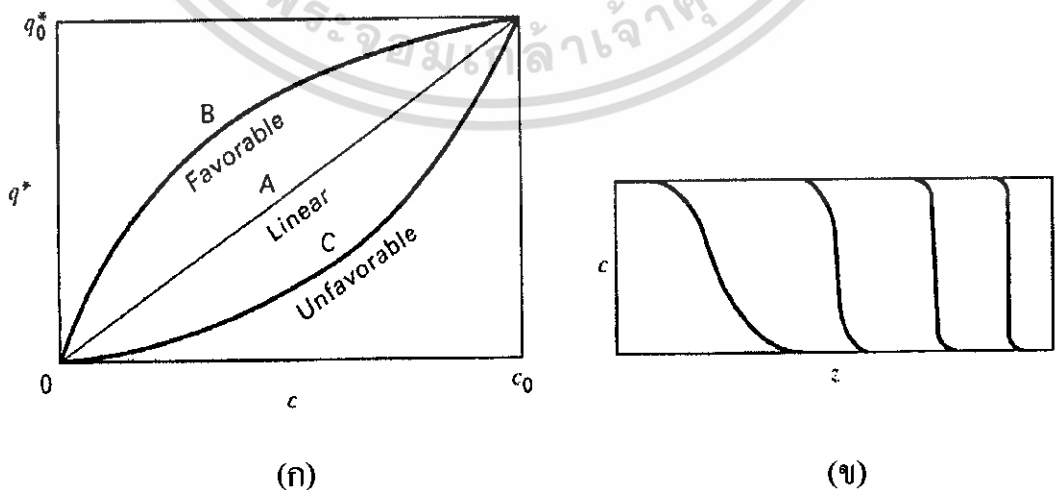
ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับสามารถทำนายได้จากความชันของเส้นโค้งการดูดซับ ซึ่งลักษณะรูปร่างของเส้นโค้งการดูดซับยังช่วยในการออกแบบความสูงของคอลัมน์ได้ด้วย ลักษณะของบริเวณถ่ายเทมวลแต่ละเส้นจะมีรูปแบบที่เป็นเฉพาะตัว โดยถ้าบริเวณถ่ายเทมวลมีช่วงแคบเมื่อเทียบกับความยาวของเบด เส้นโค้งการดูดซับจะค่อนข้างชันดังแสดงในรูป 2.8 (ก) ทำให้ความสามารถโดยส่วนใหญ่จะใช้ประโยชน์ได้มากจนถึงจุดยุติ เมื่อบริเวณถ่ายเทมวลเป็นความยาวเกือบทั้งหมดของเบด เส้นโค้งการดูดซับจะถูกขยายออกดังแสดงดังรูป 2.8 (ข) และความสามารถของเบดที่ถูกใช้ประโยชน์จะน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่ง บริเวณถ่ายเทมวลที่มีลักษณะ

แคบจะเป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพและเพื่อลดต้นทุนพลังงานที่ใช้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีที่ไม่มี ความต้านทานในการถ่ายเทมวลและไม่มี การกระจายตัวในแนวแกน จะทำให้ความกว้างของบริเวณถ่ายเทมวลมีค่าน้อยมาก และเส้น โค้งการดูดซับจะเป็นเส้นแนวตั้ง จาก 0 ถึง 1 เมื่อตัวดูดซับทั้งหมดอิ่มตัว



รูปที่ 2.8 เส้น โค้งการดูดซับสำหรับบริเวณถ่ายเทมวลลักษณะ (ก) แคบ และ (ข) กว้าง [11]

สำหรับความเป็นจริงระหว่างของบริเวณถ่ายเทมวลแต่ละเส้นจะไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับเส้น A คือ linear isotherm ความกว้างของบริเวณถ่ายเทมวลที่ความสูงของเบคต่างๆ กันจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน เส้น B คือ favorable isotherm ที่ช่วงบริเวณถ่ายเทมวลที่มีความเข้มข้นสูง มีการเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่ช่วงบริเวณถ่ายเทมวลที่มีความเข้มข้นต่ำ จนทำให้เส้น โค้งการดูดซับมีความชันดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข) เส้น C คือ unfavorable isotherm การเคลื่อนที่ของช่วงบริเวณถ่ายเทมวลที่มีความเข้มข้นต่ำมีการเคลื่อนที่ได้เร็ว ดังนั้นการดูดซับในเบคหนึ่งจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อเป็นแบบ favorable isotherm



รูปที่ 2.9 ผลของการเคลื่อนที่ของบริเวณการถ่ายเทมวลต่อไอโซเทอร์มของการดูดซับ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่กล่าวมาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของความกว้างของบริเวณถ่ายเทมวล เกิดจากลักษณะของไอโซเทิร์มการดูดซับที่ต่างกัน ซึ่งสามารถพิสูจน์การเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากการคูณมวลสารที่เป็นของไหลไหลผ่านเบดที่เวลาใดๆ จะได้สมการ

$$\varepsilon_b u A_b c|_z = \varepsilon_b u A_b c|_{z+\Delta z} + \varepsilon_b A_b \Delta z \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \varepsilon_b) A_b \Delta z \frac{\partial q}{\partial t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

จากกฎลูกโซ่จะได้ว่า

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} \quad (14)$$

เมื่อ

$$c = f\{z, t\}$$

$$u_c = \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_c = - \frac{\left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)}{\left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)} \quad (15)$$

เมื่อนำสมการที่ (13) กับสมการที่ (15) มารวมกันจะได้เป็น

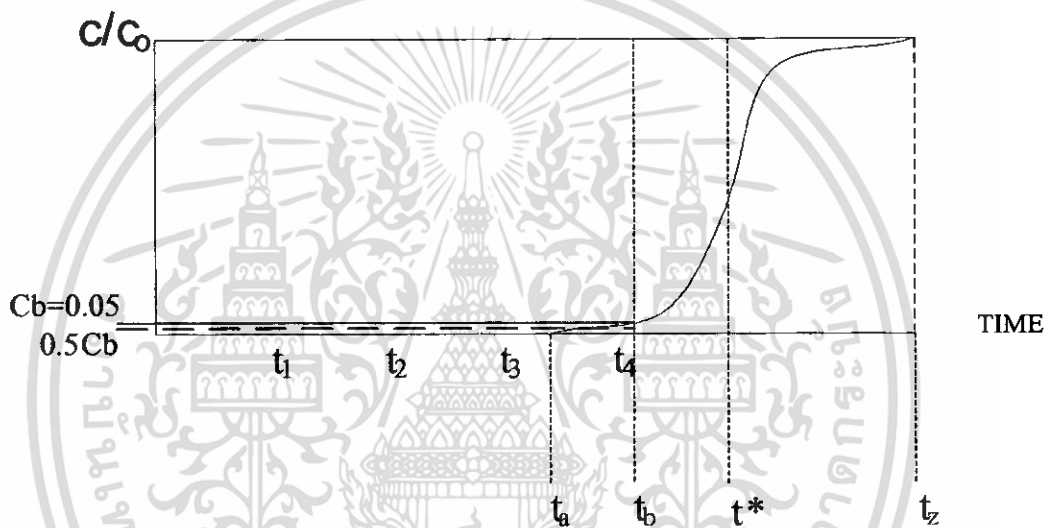
$$u_c = \frac{u}{1 + \left(\frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) \frac{dq}{dc}} \quad (16)$$

โดยสมการที่ (16) ใช้คำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของบริเวณการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นสูง โดยผลของ $\left(\frac{dq}{dc} \right)$ มีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ ถ้า $\left(\frac{dq}{dc} \right)$ เป็นค่าคงที่จะทำให้การเคลื่อนที่ของบริเวณการถ่ายเทมวลคงที่ไปด้วย

2.5.2 การคำนวณหาค่า t_d

1.) การคำนวณค่า t_d สำหรับการดูดซับแบบอุดมคติ [1],[11]

ในการใช้งานจริง จะไม่ใช่หอดูดซับจนประสิทธิภาพการดูดซับเป็นศูนย์ เพราะการใช้งานจริงต้องการแยกสารละลาย ดังนั้นจึงมีการใช้งานถึงจุด t_1 และจุด t_2 คือเวลาที่ทำให้ปริมาณของสารละลายขาออกมีค่าเท่ากับ 5% นั่นคือ ค่า c/c_0 เท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และที่จุด t_2 ต้องทำการเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ แล้วนำตัวดูดซับที่ใช่แล้วไปบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต หรือนำไปทิ้ง



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับในเบดนิ่ง

ซึ่งในการออกแบบแบบหอดูดซับ นิยมหาเวลาการใช้งานของตัวดูดซับในหอดูดซับ (t_d) ดังนั้นจะได้สมการหา t_d จะได้เป็น

$$t_b = \frac{q_b M}{Q(c_0 - 0.5c_b)} \quad (17)$$

เมื่อ q_b คือ ปริมาณการดูดซับ ณ จุด t_b (กรัมของตัวถูกดูดซับ / กรัมของตัวดูดซับ)
 c_b คือ ความเข้มข้นของสาร ณ จุด t_b (กรัม/มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การคำนวณค่า t_b ของ Bohrat และ Adams [1],[2],[12]

ในการคำนวณออกแบบขนาดถังดูดซับนั้นสามารถคำนวณหาความสูงของเบดที่ต่ำที่สุด และระยะเวลาที่ถึงจุดเริ่มหมดสภาพของเบด เพื่อให้ทราบถึงช่วงเวลาที่ถึงจุดซับเกิดการหมดสภาพ และจำเป็นต้องนำสารดูดซับออกมาปรับสภาพสารดูดซับให้คงสภาพเดิม ให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แล้วได้ระบบที่มีประสิทธิภาพตลอดเวลาที่ดำเนินการอยู่ จากการวิเคราะห์ระบบทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง สามารถคำนวณหาค่าระยะเวลาที่ถึงจุดเริ่มหมดสภาพได้ดังแสดงไว้ในสมการที่ (18) จากการคำนวณของ Bohrat และ Adams[9] ดังนี้

$$t_b = \frac{N_0}{c_0 V} X - \frac{1}{c_0 K} \ln\left(\frac{c_0}{c_b} - 1\right) \quad (18)$$

เมื่อ

t_b = ระยะเวลา ณ จุดเริ่มหมดสภาพ

N_0 = ค่าความสามารถของการดูดซับ ณ จุดเริ่มต้น

C_0 = ปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำเสียเข้าระบบ

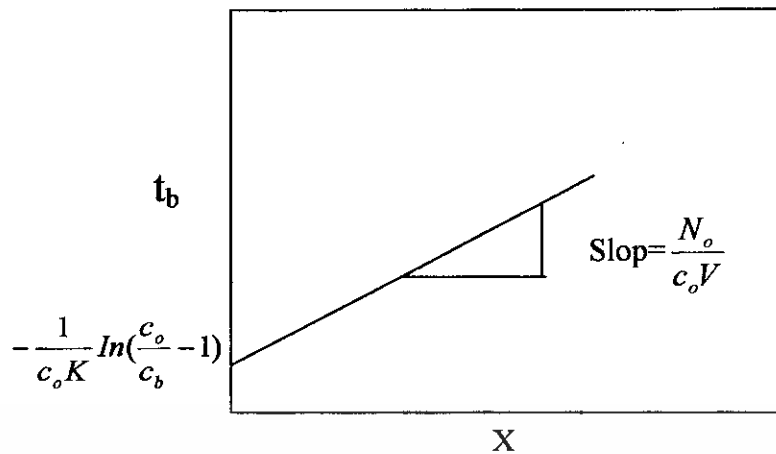
C_b = ปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำไหลออกจากระบบ ณ จุดเริ่มหมดสภาพ

V = อัตราการไหลเข้าระบบต่อพื้นที่หน้าตัดของถังดูดซับ

K = อัตราการดูดซับ

X = ขนาดความสูงของชั้นดูดซับ

และเมื่อพิจารณาสมการ (18) สามารถนำมาวาดกราฟระหว่าง t_b กับ X ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะได้เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{N_0}{c_0 V}$ และจุดตัดแกน t_b ได้เท่ากับ $-\frac{1}{c_0 K} \ln\left(\frac{c_0}{c_b} - 1\right)$



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t_b กับ X

และการหาค่าความสูงของเบคที่ต่ำที่สุดได้โดยการกำหนดให้สมการที่ (18) $t_b = 0$ เราก็จะได้ค่า X_0 ซึ่งเป็นค่าการใช้ความสูงของเบคที่ต่ำที่สุดดังสมการ (19)

$$X_0 = \frac{V}{KN_0} \ln\left(\frac{c_o}{c_b} - 1\right) \quad (19)$$

2.5.2 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับ [9]

ประสิทธิภาพการดูดซับสามารถหาได้จากการคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{Q \cdot c_o \int_0^t \left(1 - \frac{c}{c_o}\right) dt}{Q \cdot c_o \cdot t} \times 100 \quad (20)$$

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
2. เครื่องชั่งละเอียด
3. เครื่องปั่นกวน
4. ปิ๊ม
5. คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 10 และ 20 เซนติเมตร
6. ขวดเก็บสารละลายตัวอย่าง 80 ขวด
7. บีกเกอร์ 250 และ 500 มิลลิลิตร
8. ขวดวัดปริมาตร 250 และ 1000 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด
9. หลอดฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 หลอด
10. นาฬิกาจับเวลา

3.2 สารเคมี

1. สีทองโกเรด
2. ถ่านกัมมันต์ (HR 830 Granular activated carbon)

3.3 การทดลอง

1. การสร้างกราฟมาตรฐาน

- 1.1 เตรียมสารละลายสีทองโกเรดที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 1.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่เตรียมไว้ แล้วบันทึกผล
- 1.3 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานโดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารละลาย

2. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

- 2.1 เตรียมสารละลายสีทองโกเรดที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 นำสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเตรียมไว้ เทใส่บีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร

2.3 นำถ่านกัมมันต์ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 2.2

2.4 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1

2.5 นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งจับเวลา แล้วเก็บสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงทุก 10 นาที จนครบ 120 นาที

2.6 เปลี่ยนความเข้มข้นใหม่ ทำตามข้อ 2.2 ถึง 2.5 จนกระทั่งครบทุกความเข้มข้น

3. ศึกษาผลของความสูงของเบด

3.1 เตรียมสารละลายสีของโกเรดที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 ลิตร

3.2 ชั่งถ่านกัมมันต์ 9 18 27 และ 36 กรัม

3.3 นำถ่านกัมมันต์ 9 กรัม ใส่คอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จะได้ความสูงของถ่านกัมมันต์ 5 เซนติเมตร

3.4 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2

3.4 ปรับปั๊มให้มีอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

3.5 เก็บตัวอย่าง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายสีของโกเรด ขาออกมีค่า 90 % ของความเข้มข้นสารละลายสีของโกเรด เริ่มต้น จึงหยุดการทดลอง

3.6 เปลี่ยนปริมาณของถ่านกัมมันต์จะได้ความสูงของถ่านกัมมันต์ 10 15 และ 20 เซนติเมตร แล้วทำตามข้อ 3.3 ถึง 3.5

4. ศึกษาผลของความเข้มข้น

4.1 เตรียมสารละลายสีของโกเรดที่ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 ชั่งถ่านกัมมันต์ 36 กรัม เพื่อใส่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จะได้ความสูง 20 เซนติเมตร

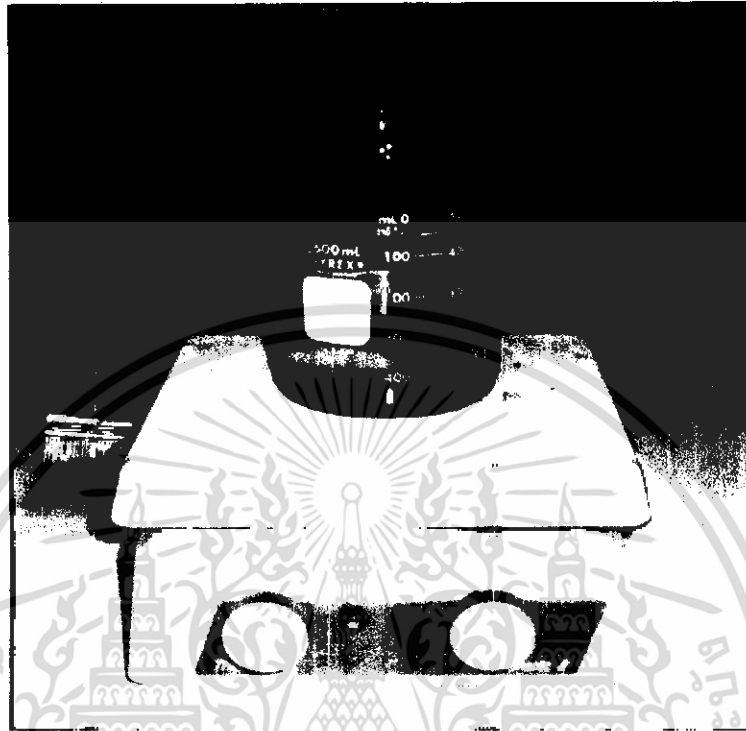
4.3 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2

4.4 ปรับปั๊มให้มีอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

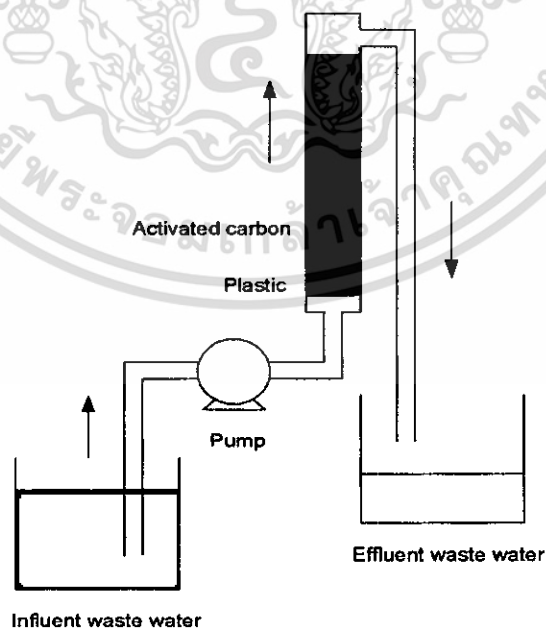
4.5 เก็บตัวอย่าง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายสีของโกเรดขาออกมีค่า 90 % ของความเข้มข้นสารละลายสีของโกเรดเริ่มต้น จึงหยุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 กลับไปทำข้อ 4.2 ถึง 4.5 ใหม่ โดยเปลี่ยนสารละลายสีของโกเรดเป็นความเข้มข้นที่ 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองการดูดซับแบบกะ



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองการดูดซับแบบเบดนิ่ง

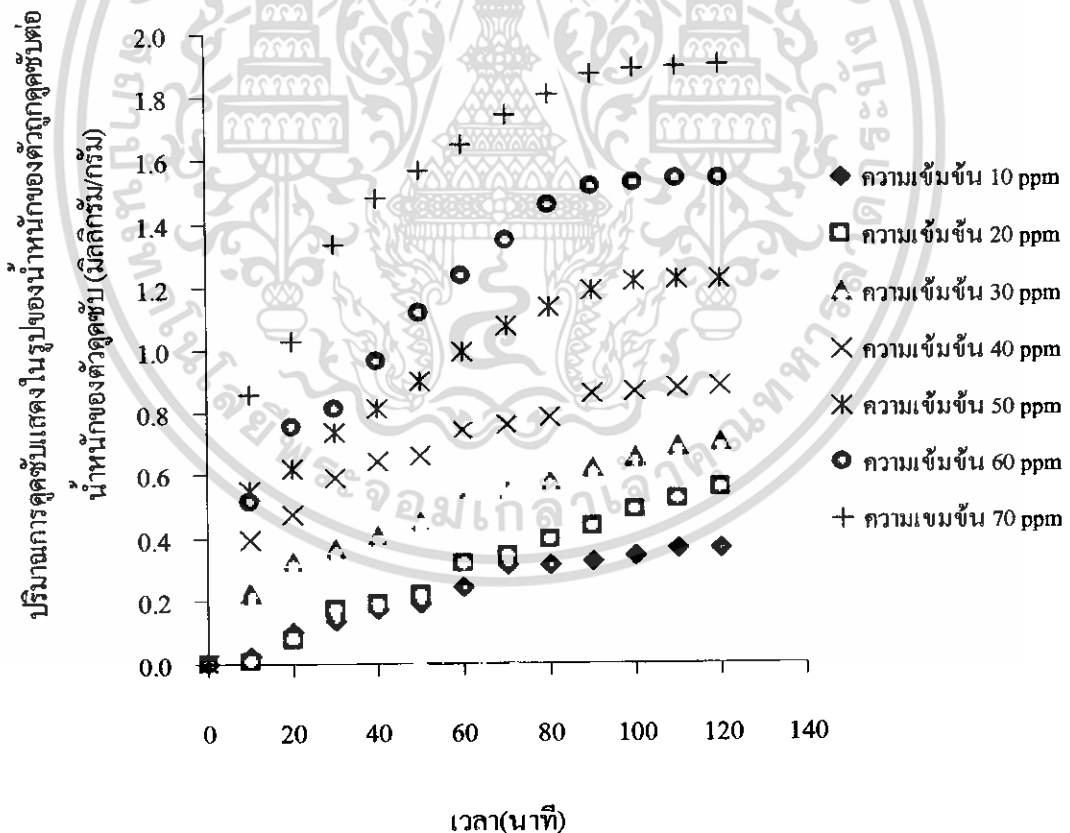
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

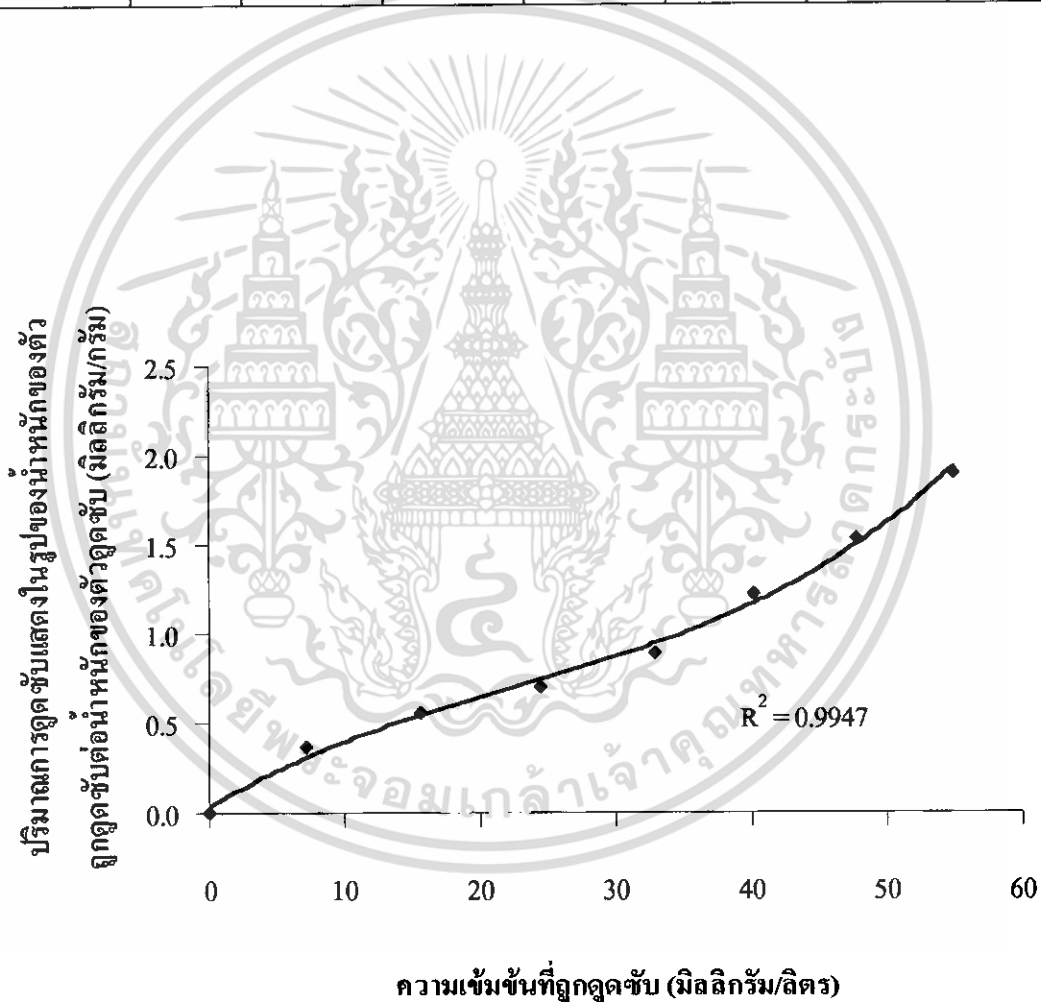
จากการทดลองโดยใช้สารละลายสีของโคเรดที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิตร ตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ 2 กรัม ทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง เมื่อนำข้อมูลจากภาคผนวก ข.1 สร้างกราฟระหว่างปริมาณการดูดซับในรูปของน้ำหนักตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับเวลา ได้ผลดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวจะได้ปริมาณการดูดซับในรูปของน้ำหนักตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้น 10 ถึง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลดังตารางที่ 4.1 เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 1 สร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.2 เมื่อนำลักษณะของเส้นกราฟที่เทียบกับรูปที่ 2.1 ปรากฏว่าเป็นการดูดซับแบบ unfavorable isotherm



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับในรูปของน้ำหนักตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของสารละลาย
ทีคองโกเรด โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง

ตัวแปร	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร : ppm)						
	10	20	30	40	50	60	70
c(ppm)	7.08	15.54	24.40	32.92	40.21	47.71	54.79
q(mg/g)	0.36	0.56	0.70	0.89	1.22	1.54	1.90



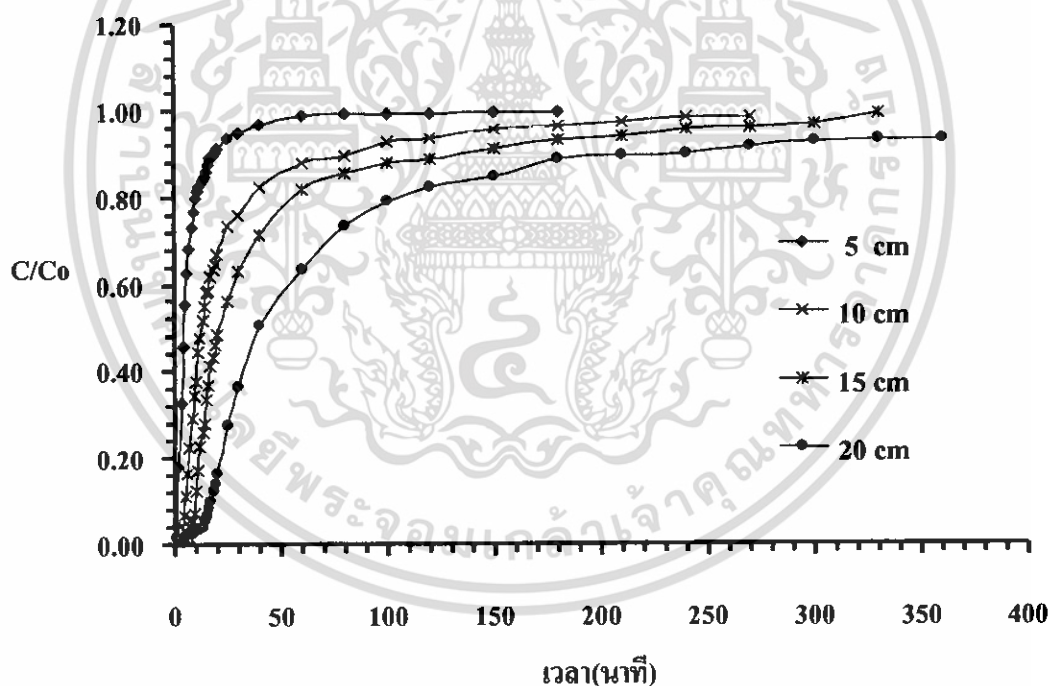
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ unfavorable isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของความสูงของเบด

การทดลองใช้ความสูงในการบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์เป็น 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายสีทองโกเรด 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยอัตราการไหลของสารป้อน 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากภาคผนวก ง ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3

พบว่าเมื่อความสูงในการบรรจุตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ใช้เวลาที่ใช้ในการดูดซับสีทองโกเรด ถึงจุดอิ่มตัวเพิ่มขึ้นด้วย และจากผลการคำนวณในตัวอย่างที่ ฉ-3 พบว่าประสิทธิภาพที่ได้ในการบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์เป็น 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 5.55 16.31 18.33 และ 29.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

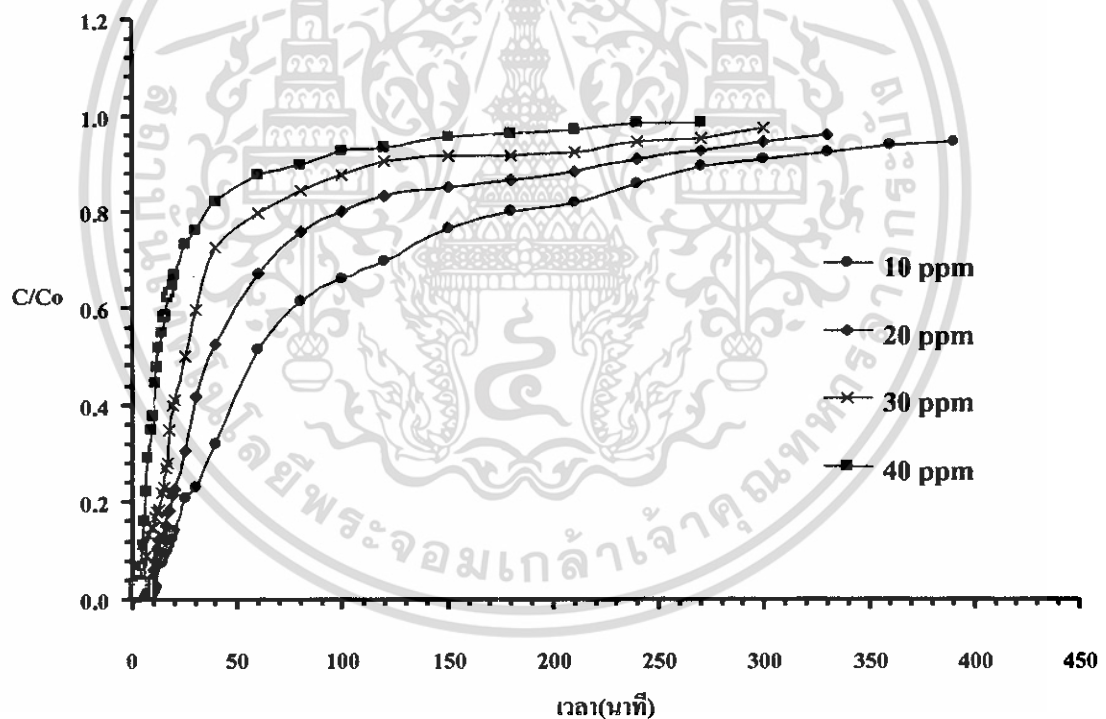


รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการดูดซับที่ความสูงของเบดที่ 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร

4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้น

การทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรดเท่ากับ 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยบรรจุตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ในเบคกิ้งความสูง 10 เซนติเมตร และอัตราการไหลของสารป้อน 10 มิลลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากภาคผนวก ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4

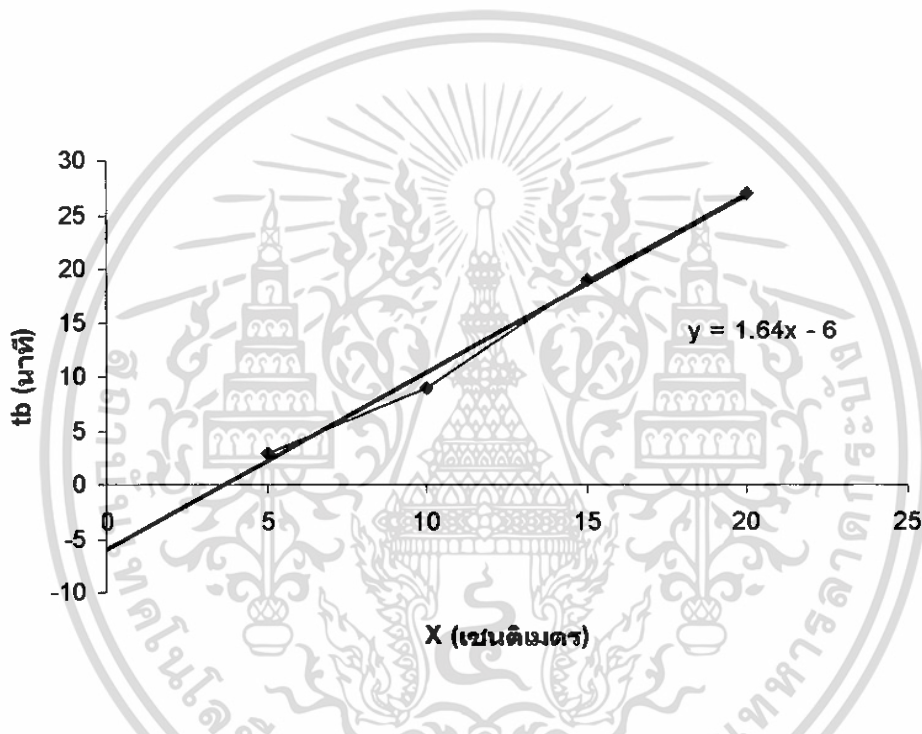
พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรดเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวจะมีค่าลดลง และจากการคำนวณในตัวอย่างที่ ๓ พบว่าประสิทธิภาพที่ได้ในการใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโกเรดเป็น 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 29.45 24.28 18.34 และ 16.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสี 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4 การศึกษาผลค่าความสามารถของการดูดซับ ณ จุดเริ่มต้นและอัตราการดูดซับ

การทดลองระบบถึงดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และมีชั้นถ่านกัมมันต์สูง 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร โดยนำตัวอย่างสารละลายสีของโกเรดที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณการไหลเข้าเท่ากับ 10 มิลลิตรต่อนาที มีระยะเวลาที่ถึงดูดซับแต่ละถังเริ่มหมดสภาพเท่ากับ 3 8 18 และ 27 นาที ตามลำดับ จนได้คุณภาพสารละลายสีของโกเรดเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการคำนวณหาค่าความสามารถของการดูดซับ ณ จุดเริ่มต้น(N_0)ได้เท่ากับ 209 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอัตราการดูดซับ(K) ได้เท่ากับ 1.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ได้จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t_b กับ X

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมโคเรดของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะอุณหภูมิห้องโดยวัดได้จากความเข้มข้นของสารละลายสีที่เหลืออยู่ จะพบว่าในช่วงแรกจะเกิดการดูดซับได้อย่างดีจนเมื่อเวลาผ่านไปขณะหนึ่งการดูดซับสีจะเริ่มคงที่โดยสังเกตได้จากความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงว่าตัวดูดซับเริ่มอิ่มตัวจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

และอัตราการเพิ่มขึ้นของการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงมีค่ามากกว่าความเข้มข้นต่ำ และมีลักษณะเส้น ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบ unfavorable isotherm ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการดูดซับสารละลายสีของโคเรด ด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้องเป็นการดูดซับแบบ unfavorable isotherm

5.2 การศึกษาผลของความสูงของเบด

จากการศึกษาผลของความสูงของคอลัมน์ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีของโคเรดบนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความสูงของคอลัมน์เป็นการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับให้มากขึ้น โดยที่ความสูงของคอลัมน์ 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 5.55 16.31 18.33 และ 29.17 % ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาค่าความสามารถของการดูดซับ ณ จุดเริ่มต้น (N_0) ได้เท่ากับ 209 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้อัตราการดูดซับ (K) 1.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่ออนาที

5.3 การศึกษาผลของความเข้มข้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโคเรด ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของโคเรด 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 29.45 24.28 18.34 และ 16.31 % ตามลำดับ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรรีความสนใจกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ กันเพิ่มเติม
2. การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการนำวิธีการดูดซับมาดูดซับเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้ใช้แล้วทิ้งไปจะเป็นการสิ้นเปลืองต้นทุนในการดูดซับ ดังนั้นควรจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เรื่องการนำกลับมาใช้ใหม่(regenerate) เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. ในการวัดอัตราการไหลของสารป้อนเข้าคอลัมน์ เพื่อใช้ในการทดลองและคำนวณ จะต้องใช้ค่าอัตราการไหลของสารขณะทำการทดลอง เพราะอัตราการไหลที่วัดได้ก่อนเข้าคอลัมน์ จะมีค่าสูงกว่าอัตราการไหลขณะทำการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากผลของความดันตกภายในคอลัมน์นั่นเอง
4. ในขณะทำการทดลองควรควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพราะอุณหภูมิมิผลต่อความสามารถในการดูดซับ



เอกสารอ้างอิง

- [1] เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. มิตรนราการพิมพ์. หน้า 264-284
- [2] เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2547. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 5. มหาวิทยาลัยรังสิต
- [3] นิมิ จงเทพ และคณะ การดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้วัสดุทางธรรมชาติ
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
- [4] เบญจมาศ บุญสงค์. พรพิรุณ สุดเจดีย์ว. 2548. การดูดซับน้ำมันอิสระจากน้ำยาหล่อเย็นใน
กระบวนการโดยใช้ตัวดูดซับพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
- [5] พ.อ.สุจินต์ เอี่ยมปี. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วย
ถ่านกัมมันต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] อติศักดิ์ อัญชลิสังการศ. 2546. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วย
ทรายและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ และคณะ การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำด้วยถ่านคาร์บอนกัมมันต์ประเภท
ต่าง ๆ การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
- [8] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เคมีทั่วไป เล่ม 1 สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2535
- [9] Christiano C. Rodrigues, Deovaldo de Moraes Jr, 2006 Ammonia adsorption in a fixed bed
of activated carbon, Bioresource Technology
- [10] J.D.Seader. Ernest J.Henley. **Separation Process Principles**
- [11] McCabe. Warren L. Smith. Julian C. and Harriott Peter. 2005. **Unit Operation
of Chemical Engineering**. 7 th ed. Singapore : McGraw – Hill.
- [12] Upendra Kumar. Manas Bundyopadhyay. 2005. **Fixed bed column study for Cd(II)
removal from wastewater using treated rice husk**. Indian Insitute of Technology



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ HR 830 Granular activated carbon มีคุณสมบัติดังนี้

Specification

Iodine Number, mg/g	1000 (min)
Carbon Tetrachloride Adsorption, wt %	55 (min)
Moisture as packed, %	5 (max)
Hardness Number, %	98 (min)
Ash Content, %	3 (max)
Oversize, %	5 (max)
Undersize, %	5 (max)
Particle size, %	8 - 28 (8-28 mesh)
Surface Area, m ² /g	1150-1200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

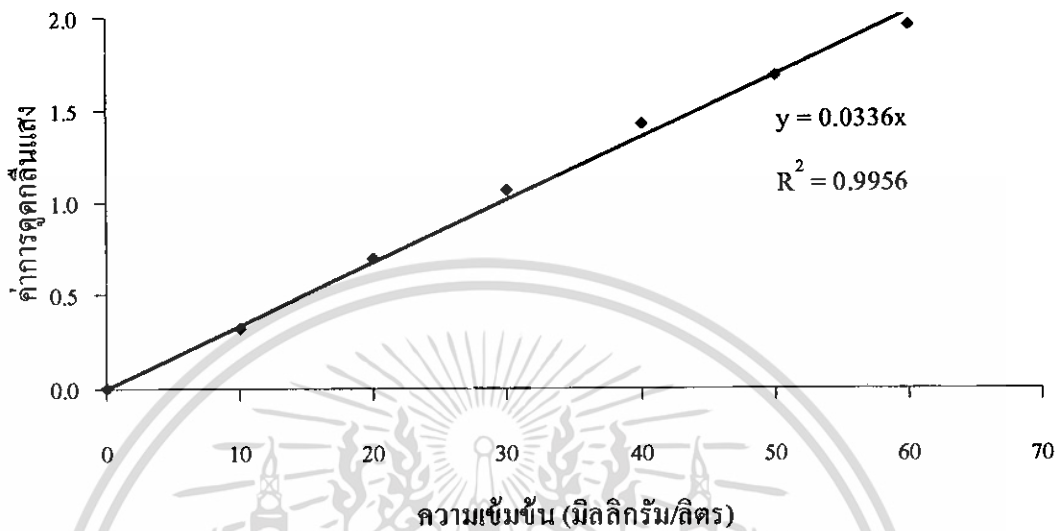
ภาคผนวก ข

การสร้างกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	
		เฉลี่ย
0	0	0
	0	
	0	
10	0.326	0.322
	0.320	
	0.320	
20	0.694	0.695
	0.695	
	0.695	
30	1.059	1.059
	1.059	
	1.060	
40	1.415	1.416
	1.416	
	1.416	
50	1.680	1.680
	1.680	
	1.681	
60	1.944	1.944
	1.944	
	1.944	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย Congo Red ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของสารละลาย สีทองโกเรคโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง

t (min)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร : ppm)								
	10 ppm			20 ppm			30 ppm		
	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)
0	0	10.00	0	0	20.00	0	0	30.00	0
10	0.329	9.79	0.03	0.670	19.94	0.01	0.948	28.21	0.22
20	0.310	9.23	0.10	0.652	19.40	0.07	0.922	27.44	0.32
30	0.300	8.93	0.13	0.627	18.66	0.17	0.910	27.08	0.36
40	0.290	8.63	0.17	0.621	18.48	0.19	0.900	26.79	0.40
50	0.285	8.48	0.19	0.614	18.27	0.22	0.887	26.40	0.45
60	0.271	8.07	0.24	0.587	17.47	0.32	0.870	25.89	0.51
70	0.253	7.53	0.31	0.581	17.29	0.34	0.861	25.63	0.55
80	0.253	7.53	0.31	0.566	16.85	0.39	0.853	25.39	0.58
90	0.249	7.41	0.32	0.556	16.55	0.43	0.841	25.03	0.62
100	0.245	7.29	0.34	0.541	16.10	0.49	0.832	24.76	0.65
110	0.238	7.08	0.36	0.532	15.83	0.52	0.823	24.49	0.69
120	0.238	7.08	0.36	0.522	15.54	0.56	0.820	24.40	0.70

ตารางที่ ก.1(ต่อ) แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของสารละลายสีของโกเรดโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง

t (min)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร : ppm)								
	40 ppm			50 ppm			60 ppm		
	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)
0	0	40	0.00	0	50	0.00	0	60	0.00
10	1.239	36.88	0.39	1.532	45.60	0.55	1.878	55.89	0.51
20	1.216	36.19	0.48	1.514	45.06	0.62	1.813	53.96	0.76
30	1.186	35.30	0.59	1.482	44.11	0.74	1.798	53.51	0.81
40	1.171	34.85	0.64	1.461	43.48	0.81	1.756	52.26	0.97
50	1.167	34.73	0.66	1.438	42.80	0.90	1.716	51.07	1.12
60	1.145	34.08	0.74	1.412	42.02	1.00	1.684	50.12	1.24
70	1.140	33.93	0.76	1.391	41.40	1.08	1.654	49.23	1.35
80	1.133	33.72	0.78	1.375	40.92	1.13	1.625	48.36	1.45
90	1.113	33.13	0.86	1.361	40.51	1.19	1.609	47.89	1.51
100	1.111	33.07	0.87	1.353	40.27	1.22	1.605	47.77	1.53
110	1.108	32.98	0.88	1.351	40.21	1.22	1.603	47.71	1.54
120	1.106	32.92	0.89	1.351	40.21	1.22	1.603	47.71	1.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของสารละลายสีทองโกเรคโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิห้อง

t (min)	ความเข้มข้นเริ่มต้น 70 ppm		
	Abs (-)	c (ppm)	q (mg/g)
0	0	70.00	0.00
10	2.121	63.13	0.86
20	2.076	61.79	1.03
30	1.994	59.35	1.33
40	1.954	58.15	1.48
50	1.931	57.47	1.57
60	1.909	56.82	1.65
70	1.884	56.07	1.74
80	1.867	55.57	1.80
90	1.849	55.03	1.87
100	1.844	54.88	1.89
110	1.842	54.82	1.90
120	1.841	54.79	1.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความสูงของเบด

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความสูงต่างๆ

เวลา (นาทีก)	ความสูงที่ใช้ศึกษาค่าการดูดกลืนแสง			
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	0.058	0.017	0.011	0.022
2	0.241	0.028	0.011	0.021
3	0.445	0.053	0.014	0.023
4	0.614	0.091	0.019	0.020
5	0.747	0.150	0.019	0.027
6	0.843	0.219	0.025	0.029
7	0.918	0.301	0.058	0.031
8	0.984	0.393	0.078	0.030
9	1.028	0.466	0.099	0.037
10	1.075	0.509	0.169	0.041
11	1.094	0.600	0.230	0.046
12	1.113	0.644	0.305	0.048
13	1.125	0.696	0.349	0.053
14	1.138	0.739	0.379	0.078
15	1.153	0.784	0.452	0.092
16	1.175	0.789	0.497	0.111
17	1.200	0.833	0.557	0.136
18	1.204	0.851	0.584	0.166
19	1.216	0.867	0.620	0.190
20	1.222	0.899	0.653	0.220
25	1.256	0.987	0.757	0.372
30	1.275	1.022	0.847	0.493
40	1.301	1.104	0.958	0.682
60	1.328	1.179	1.102	0.850
80	1.335	1.205	1.151	0.988
100	1.335	1.248	1.182	1.060
120	1.335	1.256	1.191	1.104
150	1.335	1.283	1.222	1.136
180	1.335	1.293	1.253	1.192
210		1.303	1.261	1.204
240		1.322	1.282	1.210
270		1.323	1.287	1.229
300			1.301	1.246
330			1.332	1.250
360				1.254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายขาออกต่อความเข้มข้นของสารละลาย
เริ่มต้นที่ความสูงต่างๆ

เวลา (นาที)	c/c ₀			
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	0.04	0.01	0.01	0.02
2	0.18	0.02	0.01	0.02
3	0.33	0.04	0.01	0.02
4	0.46	0.07	0.01	0.01
5	0.56	0.11	0.01	0.02
6	0.63	0.16	0.02	0.02
7	0.68	0.22	0.04	0.02
8	0.73	0.29	0.06	0.02
9	0.76	0.35	0.07	0.03
10	0.80	0.38	0.13	0.03
11	0.81	0.45	0.17	0.03
12	0.83	0.48	0.23	0.04
13	0.84	0.52	0.26	0.04
14	0.85	0.55	0.28	0.06
15	0.86	0.58	0.34	0.07
16	0.87	0.59	0.37	0.08
17	0.89	0.62	0.41	0.10
18	0.90	0.63	0.43	0.12
19	0.90	0.65	0.46	0.14
20	0.91	0.67	0.49	0.16
25	0.93	0.73	0.56	0.28
30	0.95	0.76	0.63	0.37
40	0.97	0.82	0.71	0.51
60	0.99	0.88	0.82	0.63
80	0.99	0.90	0.86	0.74
100	0.99	0.93	0.88	0.79
120	0.99	0.93	0.89	0.82
150	0.99	0.95	0.91	0.85
180	0.99	0.96	0.93	0.89
210		0.97	0.94	0.90
240		0.98	0.95	0.90
270		0.98	0.96	0.91
300			0.97	0.93
330			0.99	0.93
360				0.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้น

ตารางที่ จ.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นขาออกที่ความเข้มข้นต่างๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นที่ใช้ศึกษาค่าการดูดกลืนแสง			
	10 ppm	20 ppm	30 ppm	40 ppm
1	0.001	0.002	0.020	0.017
2	0.001	0.004	0.020	0.028
3	0.001	0.005	0.021	0.053
4	0.001	0.006	0.024	0.091
5	0.002	0.008	0.032	0.150
6	0.002	0.008	0.040	0.219
7	0.002	0.009	0.090	0.301
8	0.002	0.024	0.135	0.393
9	0.003	0.027	0.148	0.466
10	0.004	0.041	0.150	0.509
11	0.006	0.053	0.172	0.600
12	0.008	0.071	0.181	0.644
13	0.024	0.083	0.185	0.696
14	0.025	0.084	0.222	0.739
15	0.030	0.088	0.231	0.784
16	0.033	0.102	0.273	0.789
17	0.034	0.121	0.282	0.833
18	0.037	0.124	0.351	0.851
19	0.042	0.144	0.402	0.867
20	0.047	0.153	0.412	0.899
25	0.070	0.206	0.505	0.987
30	0.077	0.281	0.600	1.022
40	0.107	0.353	0.731	1.104
60	0.173	0.452	0.803	1.179
80	0.207	0.509	0.851	1.205
100	0.222	0.538	0.883	1.248
120	0.234	0.561	0.911	1.256
150	0.257	0.572	0.922	1.283
180	0.269	0.581	0.925	1.293
210	0.275	0.595	0.930	1.303
240	0.289	0.610	0.953	1.322
270	0.301	0.622	0.959	1.323
300	0.305	0.634	0.980	
330	0.310	0.645		
360	0.315			
390	0.318			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายขาออกต่อความเข้มข้นของสารละลาย
เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆ

เวลา (นาที)	c/c ₀			
	10 ppm	20 ppm	30 ppm	40 ppm
1	0.00	0.00	0.02	0.0
2	0.00	0.01	0.02	0.0
3	0.00	0.01	0.02	0.0
4	0.00	0.01	0.02	0.1
5	0.01	0.01	0.03	0.1
6	0.01	0.01	0.04	0.2
7	0.01	0.01	0.09	0.2
8	0.01	0.04	0.13	0.3
9	0.01	0.04	0.15	0.3
10	0.01	0.06	0.15	0.4
11	0.02	0.08	0.17	0.4
12	0.02	0.11	0.18	0.5
13	0.07	0.12	0.18	0.5
14	0.07	0.13	0.22	0.5
15	0.09	0.13	0.23	0.6
16	0.10	0.15	0.27	0.6
17	0.10	0.18	0.28	0.6
18	0.11	0.18	0.35	0.6
19	0.13	0.21	0.40	0.6
20	0.14	0.23	0.41	0.7
25	0.21	0.31	0.50	0.7
30	0.23	0.42	0.60	0.8
40	0.32	0.53	0.73	0.8
60	0.51	0.67	0.80	0.9
80	0.62	0.76	0.84	0.9
100	0.66	0.80	0.88	0.9
120	0.70	0.83	0.90	0.9
150	0.76	0.85	0.91	1.0
180	0.80	0.86	0.92	1.0
210	0.82	0.89	0.92	1.0
240	0.86	0.91	0.95	1.0
270	0.90	0.93	0.95	1.0
300	0.91	0.94	0.97	
330	0.92	0.96		
360	0.94			
390	0.95			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณ

ตัวอย่างที่ ฉ-1. การคำนวณหาเส้นกราฟไอโซเทอรั่ม

จากการทดลองความเข้มข้นของสารละลายสีของโกเรด(c_0) เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ 2 กรัม ที่เวลา 120 นาที ค่าดูดกลืนแสง 0.238 ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ ค.1

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ } (c) = \left(\frac{0.238}{0.0336} \right) \text{mg/l}$$

$$= 7.08$$

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ} = c_0 - c$$

$$= (10 - 7.08)$$

$$= 2.92 \text{ mg/l}$$

หาปริมาณการดูดซับในรูปของน้ำหนักของตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q)

จากสูตร $q = \frac{(c_0 - c)}{M} \times V$

$$q = \frac{(2.92 \text{ mg/l})}{2 \text{ g}} \times 0.250 \text{ L}$$

$$= 0.36 \text{ mg/g}$$

ตัวอย่างที่ ๓-2. การคำนวณหาค่า N_0 และ K

จากผลการทดลองระบบถังคูค้ำด้วยถ้ำนถ้ำม้นค้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และมีชั้นถ้ำนถ้ำม้นค้ำสูง 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร โดยนำตัวอย่างสารละลายสี Cong Red ที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณการไหลเข้า 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีระยะเวลาที่ถึงคูค้ำแต่ละถ้ำงเริ่มหมดสภาพเท่ากับ 3 8 18 และ 27 นาที ตามลำดับ จนได้คุณภาพสารละลายสี Cong Red 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากตารางที่ ๓.2 ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าความสามารถของการคูค้ำ ณ จุดเริ่มต้น (N_0) และอัตราการคูค้ำ (K) ได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

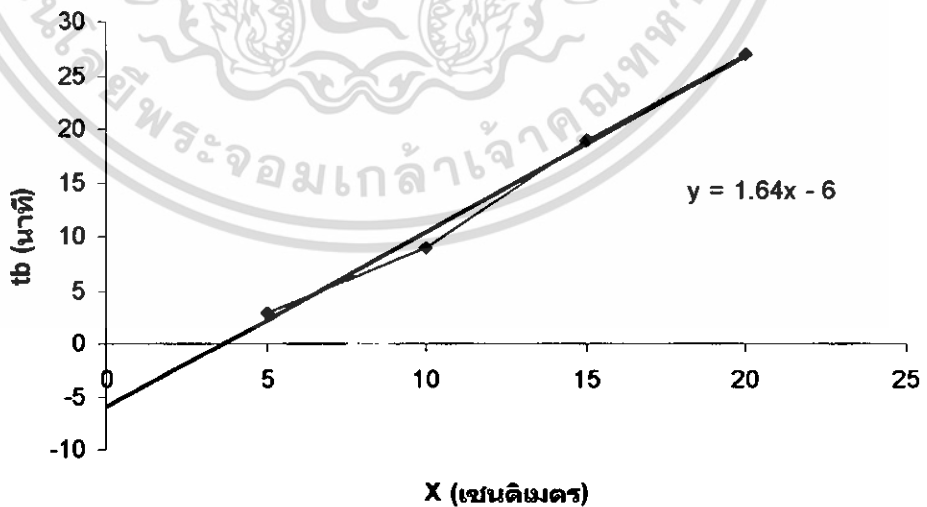
คำนวณขนาดของถังคูค้ำ

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.5)^2}{4} = 3.14 \text{ cm}^2$$

คำนวณค่าการไหล (V)

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{10 \text{ cm}^3 / \text{min}}{3.14 \text{ cm}^2} = 3.18 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 \cdot \text{min}$$

สร้างกราฟ t_b กับ X ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t_b กับ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่า N_0 และ X

จากสมการ

$$\text{ความชื้น} = 1.64 = \frac{N_0}{c_0 V}$$

$$N_0 = 1.64 \times 40 \times 3.18 = 209 \text{ mg/cm}^3$$

เส้นตัดแกน t_b ที่ X เท่ากับ 0 จะได้เท่ากับ -6 นาที

$$-6 = -\frac{1}{Kc_0} (\ln(\frac{c_0}{c_b}) - 1)$$

$$6 = \frac{1}{K(40)} (\ln(\frac{40}{10}) - 1)$$

$$K = 1.6(\text{mg/cm}^3)^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

และเมื่อจะคำนวณค่าความสูงของเบคที่ต่ำที่สุดได้จากสมการที่(21) ดังนี้

$$X_0 = \frac{V}{KN_0} \ln(\frac{c_0}{c_b} - 1)$$

(21)

$$X_0 = \frac{3.18}{1.6(209)} \ln(\frac{40}{10} - 1)$$

$$X_0 = 0.00357 \text{ cm}$$

ตารางที่ ๑.1 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับที่ความสูง 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร

c_0 (mg/l)	X (cm)	M_E (mg)	M_{ads} (mg)	η (%)
40	5	7.92	0.440	5.55
	10	5.30	0.866	16.31
	15	4.44	0.814	18.33
	20	4.00	1.167	29.17

ตารางที่ ๑.2 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้นขาเข้า 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

X (cm)	c_0 (mg/l)	M_E (mg)	M_{ads} (mg)	η (%)
10	10	2.13	0.628	29.45
	20	3.67	0.891	24.28
	30	5.29	0.971	18.34
	40	6.05	0.986	16.31

ตัวอย่างที่ ๑-3. การคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณที่น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 18 กรัม อัตราการไหล 10 มิลลิิตรต่อนาที และความเข้มข้นขาเข้า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากตารางที่ ๑.2

$$\eta = \frac{Q \cdot c_0 \int_0^t \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt}{Q \cdot c_0 \cdot t} \times 100$$

$$\eta = \frac{10 \cdot 20 \cdot 0.89}{10 \cdot 20 \cdot 80.15} \times 100$$

$$\eta = 24.28\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้