

การดูดซับลิแกนด์และแทนนินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน
จากกระบวนการเอเอสแล้ว



นางสาวอิสริยาภรณ์ บุญยืน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF LIGNIN AND TANNIN BY WASTED ACTIVATED CARBON USED AS
BALLASTING AGENT FROM ACTIVATED SLUDGE PROCESS



Miss Isariyaporn Boonyuen

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 2009

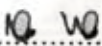
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับลิแกนด์และแทนนินด้วยด่างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้ เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนจากกระบวนการเอเอสแล้ว
โดย	นางสาวอิสริยาภรณ์ บุญยีน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ปริญญาณ ปัญญาพลกุล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงค์)

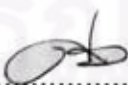
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเรียร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ปริญญาณ ปัญญาพลกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาทันธุ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศรายุทธ ราชู)

อิสริยาภรณ์ บุญยยืน : การดูดซับลิกนินและแทนนินด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็น
 วัสดุช่วยตกตะกอนจากกระบวนการเอเอสแล้ว (ADSORPTION OF LIGNIN AND
 TANNIN BY WASTED ACTIVATED CARBON USED AS BALLASTING AGENT
 FROM ACTIVATED SLUDGE PROCESS). อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. ชัยพร
 ภูประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพกุล, 153 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดลิกนินและแทนนินด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ใช้เป็นวัสดุช่วย
 ตกตะกอนจากกระบวนการเอเอส โดยเปรียบเทียบตัวกลางดูดซับ 5 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์
 ชนิดผง(PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน(PACB) ถ่านกัมมันต์
 ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว(PACB-Di) ตะกอนจุลินทรีย์(S) และ
 ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di) โดยทำการทดลองแบบที่ละเทเพื่อศึกษา
 จลนพลศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ รวมถึงผลกระทบของพีเอชต่อการดูดซับ จาก
 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางดูดซับโดยวิธี Thermogravimetric
 Analysis (TGA) พบว่ามีปริมาณจุลชีพเกาะติดอยู่บนพื้นผิว PACB ประมาณ 25 % (w/w)
 จลนพลศาสตร์การดูดซับลิกนินของกลุ่ม PAC, PACB และPACB-Di เข้าสู่สมดุลของการดูด
 ซับเร็วกว่ากลุ่ม S และ S-Di ที่ 1 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ เช่นเดียวกับเวลาที่เข้าสู่สมดุล
 ในการดูดซับ แทนนินของกลุ่ม PAC, PACB และPACB-Di เร็วกว่าของกลุ่ม S และ
 S-Di ซึ่งได้แก่ 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยทั้งหมดสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน
 ไอโซเทอร์มในการดูดซับลิกนินและแทนนินของตัวกลางดูดซับทั้งหมดสอดคล้องกับแบบจำลอง
 ไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช PACB และ PACB-Di สามารถดูดซับลิกนินและแทนนินได้สูงกว่า S
 และ S-Di แต่ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงบริสุทธิ์ (PAC) การย่อยตะกอน
 จุลินทรีย์ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับลิกนินและแทนนิน การเพิ่มขึ้นของพีเอชสูงกว่า
 pH_{PZC} ทำให้ PAC PACB และ PACB-Di ดูดซับลิกนินได้ดีขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่ส่งผลต่อการดูดซับ
 ของ S และ S-Di ส่วนการดูดซับของแทนนินโดยตัวกลางดูดซับทุกชนิดไม่สอดคล้องกับ
 ความสัมพันธ์เชิงประจ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....อิสริยาภรณ์ บุญยยืน.....
 ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5070649221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / LIGNIN / TANNIN / USED BALLASTING AGENT /
ACTIVATED CARBON / ACTIVATED SLUDGE PROCESS

ISARIYAPORN BOONYUEN : ADSORPTION OF LIGNIN AND TANNIN BY
WASTED ACTIVATED CARBON USED AS BALLASTING AGENT FROM
ACTIVATED SLUDGE PROCESS. THESIS ADVISOR : CHAIYAPORN PUPRASERT,
Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D., 153 pp.

Removal of lignin and tannin by wasted powdered activated carbon as used ballasting agent from AS process was studied by comparing with five adsorbents; powdered activated carbon(PAC), powdered activated carbon as used ballasting agent(PACB), digested powdered activated carbon as used ballasting agent(PACB-Di), sludge(S) and digested sludge(S-Di). Batch experiments were conducted for studying the adsorption kinetics and isotherms of lignin and tannin, including effects of pH. Physical characterization of adsorbents obtained by thermogravimetric analysis (TGA) indicated approximately 25% (w/w) of microorganism on PACB. Equilibrium adsorption state of lignin by PAC, PACB and PACB-Di can be reached faster than S and S-Di as 1 and 20 hours, respectively. And adsorption kinetics of tannin showed that adsorption of PAC, PACB and PACB-Di can be reached the equilibrium state faster than the S and S-Di as 2 and 6 hours, respectively. The results showed that the all adsorption kinetics and isotherms of lignin and tannin could be fitted to pseudo-second order and Freundlich isotherm model. The obtained results indicated that PACB and PACB-Di had higher adsorption capacities of lignin and tannin comparing with S and S-Di, however, virgin PAC performed highest adsorption capacities of lignin and tannin. Sludge digestion processes did not affect to adsorption capacities of lignin and tannin. Increase of pH higher than pH_{pZC} could a little bit enhance lignin adsorption capacities of PAC PACB and PACB-Di, but did not affect to S and S-Di significantly. Moreover, it was found that adsorption capacities of tannin did not related to electrostatic interaction.

Department : Environmental Engineering

Student's Signature Isariyaporn Boonyuen.

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature 

Academic Year : 2009

Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

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

กราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันได้แก่ รองศาสตราจารย์ สุธา ขาวเถียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิก และ ดร.ศรายุทธ ราชู ที่ให้คำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เพื่อสถานที่และอุปกรณ์ รวมทั้งเครื่องมือทางเทคนิคตลอดงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ได้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร และ บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด ที่เอื้อเฟื้อให้หัวเชื้อสลัดจ์ จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท คาร์โบแก๊ส จำกัด ที่เอื้อเฟื้อถ่านกัมมันต์ชนิดผงเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณมูลนิธิธิดาเก๋ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนสนับสนุนค่าเล่าเรียน

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ธนพร คำขจร ที่มีส่วนช่วยเหลือให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ สุเมธ คุณแม่ อารยา บุญยืน และคุณป้า อุดมพร ชลประทาน ที่ได้ให้การสนับสนุนค่าเล่าเรียน คอยช่วยเหลือค่าใช้จ่ายบางส่วนในงานวิจัย และคอยให้กำลังใจอันเป็นแรงผลักดันสำคัญยิ่งให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ง
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส.....	4
2.2 กระบวนการตกตะกอน.....	22
2.3 สลัดจ์.....	23
2.4 วัสดุบัลลัสต์ หรือ วัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent)	28
2.5 กระบวนการดูดซับ.....	31
2.6 ถ่านกัมมันต์.....	35
2.7 การผลิตเยื่อกระดาษ.....	41
2.8 ลิกนิน (Lignin) และ แทนนิน (Tannin).....	45
2.9 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	50
2.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	59
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	67
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	67
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	69
3.3 โมเดลในการทดลอง.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ตัวกลางดูดซับและสารถูกดูดซับ.....	71
3.5 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	73
3.6 การศึกษาการดูดซับลิแกนด์ และแทนนิน.....	75
3.6.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของลิแกนด์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	75
3.6.2 การศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มในการดูดซับอัลคาไลน์ ลิแกนด์และแทนนิกแอซิด.....	77
3.6.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลน์ ลิแกนด์และแทนนิกแอซิด.....	79
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	82
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	82
4.1.1 พื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	82
4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	83
4.1.3 ค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์.....	86
4.1.4 การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์.....	87
4.2 การดูดซับลิแกนด์และแทนนิน.....	99
4.2.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับลิแกนด์และแทนนินบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ.....	99
4.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์และแทนนิน.....	106
4.2.3 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	112
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดีกับความเข้มข้นของลิแกนด์ และแทนนิน.....	125
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	127
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	127
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	128
รายการอ้างอิง.....	129
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับลิแกนด์และแทนนิน.....	134
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์ม.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอเอสแต่ละประเภท.....	20
ตารางที่ 2.2	ลักษณะทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบ แอกทิเวเต็ดสลัดจ์.....	24
ตารางที่ 2.3	สัดส่วนของพันธะต่างๆ ในลิกนิน.....	47
ตารางที่ 3.1	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์.....	67
ตารางที่ 3.2	สมบัติของสารดูดซับ.....	73
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิก แอซิดบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ.....	76
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิด.....	78
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลน์ ลิกนินและแทนนิกแอซิด.....	80
ตารางที่ 4.1	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับ.....	83
ตารางที่ 4.2	ค่า pH_{pzc} และประจุของตัวกลางดูดซับในสารละลายที่เอชต่างๆ.....	87
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบของตัวกลางดูดซับคิดเป็นน้ำหนัก.....	97
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบของตัวกลางดูดซับคิดเป็นเปอร์เซ็นต์.....	98
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับลิกนินที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	105
ตารางที่ 4.6	เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับแทนนินที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	105
ตารางที่ 4.7	เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์และ ฟรุนดลิช.....	109
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์ และฟรุนดลิชที่ พีเอช 5, 7 และ 9 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	112
ตารางที่ 4.9	ความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนินที่ ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ซีไอดี ของลิกนินและแทนนิน เท่ากับ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ข-18 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PAC ที่พีเอช 9	146
ตารางที่ ข-19 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 5	147
ตารางที่ ข-20 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 7	147
ตารางที่ ข-21 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 9	147
ตารางที่ ข-22 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 5	148
ตารางที่ ข-23 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 7	148
ตารางที่ ข-24 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 9	148
ตารางที่ ข-25 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 5	149
ตารางที่ ข-26 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 7	149
ตารางที่ ข-27 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 9	150
ตารางที่ ข-28 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 5	150
ตารางที่ ข-29 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 7.....	151
ตารางที่ ข-30 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 9	144

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 4.2	ลักษณะพื้นผิวของด่านกัมมันต์ ที่ยังไม่ได้ถูกใช้เป็นตัวช่วยตกตะกอน (PAC).....	84
ภาพที่ 4.3	ลักษณะพื้นผิวของด่านกัมมันต์ ที่ผ่านการเป็นตัวช่วยตกตะกอนแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (PACB).....	84
ภาพที่ 4.4	ลักษณะพื้นผิวของด่านกัมมันต์ที่ผ่านการเป็นตัวช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (PACB-Di).....	85
ภาพที่ 4.5	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนจุลินทรีย์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (S).....	85
ภาพที่ 4.6	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนจุลินทรีย์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (S-Di).....	85
ภาพที่ 4.7	ความหนาแน่นของประจุที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	86
ภาพที่ 4.8	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PAC.....	88
ภาพที่ 4.9	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ W.....	89
ภาพที่ 4.10	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ น้ำตาลที่นำไปเตรียมเป็นน้ำเสีย.....	90
ภาพที่ 4.11	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ S.....	91
ภาพที่ 4.12	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ S-Di.....	92
ภาพที่ 4.13	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ PACW.....	93
ภาพที่ 4.14	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PACB.....	94
ภาพที่ 4.15	เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PACB-Di.....	95
ภาพที่ 4.16	จลนศาสตร์การดูดซับลิกลินและแทนนิน บนพื้นผิวดักกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	100
ภาพที่ 4.17	อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับลิกลินด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่ พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	102
ภาพที่ 4.18	อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับลิกลินด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 4.19	ผลของการดูดซับลิแกนด์ ของตัวกลางชนิดต่างๆที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	107
ภาพที่ 4.20	ผลของการดูดซับลิแกนด์ ของตัวกลางชนิดต่างๆที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	108
ภาพที่ 4.21	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ PAC ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	114
ภาพที่ 4.22	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ PACB ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	115
ภาพที่ 4.23	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ PACB-Di ที่ อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	116
ภาพที่ 4.24	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ S ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	117
ภาพที่ 4.25	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ S-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	118
ภาพที่ 4.26	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PAC ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	119
ภาพที่ 4.27	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PACB ที่ อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	120
ภาพที่ 4.28	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PACB-Di ที่ อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	121
ภาพที่ 4.29	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ S ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	122
ภาพที่ 4.30	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ S-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์.....	123
ภาพที่ 4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดีกับความเข้มข้นของลิแกนด์และแทนนิน..	125
ภาพที่ ข-1	ไอโซเทอมการดูดซับลิแกนด์.....	152
ภาพที่ ข-2	ไอโซเทอมการดูดซับแทนนิน.....	152

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1	กราฟการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเทียบกับเวลา..... 6
ภาพที่ 2.2	ส่วนประกอบของระบบเอเอส..... 8
ภาพที่ 2.3	ชนิดของระบบเอเอส..... 17
ภาพที่ 2.4	กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดและกำจัดสัลดิจ์..... 26
ภาพที่ 2.5	การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในระบบเอเอส..... 28
ภาพที่ 2.6	ฟล็อกจุลินทรีย์ของทาล..... 29
ภาพที่ 2.7	ฟล็อกจุลินทรีย์ของยาง..... 30
ภาพที่ 2.8	ฟล็อกจุลินทรีย์ของด้านกัมมันต์ชนิดผง..... 30
ภาพที่ 2.9	ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน 5 แบบ..... 34
ภาพที่ 2.10	ลักษณะการแบ่งชั้นของโครงสร้างด้านกัมมันต์..... 37
ภาพที่ 2.11	หมู่ฟังก์ชันนัลบนพื้นผิวด้านกัมมันต์..... 38
ภาพที่ 2.12	ภาพตัดขวางด้านกัมมันต์ชนิดเกล็ด..... 39
ภาพที่ 2.13	หน่วยโมโนเมอร์พีนิลโพรเพน..... 46
ภาพที่ 2.14	พันธะระหว่างหน่วยพีนิลโพรเพน..... 47
ภาพที่ 2.15	โครงสร้างโมเลกุลลิกนิน..... 48
ภาพที่ 2.16	โครงสร้างโมเลกุลแทนนิน..... 49
ภาพที่ 2.17	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์..... 51
ภาพที่ 2.18	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช..... 52
ภาพที่ 2.19	ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท..... 54
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... 69
ภาพที่ 3.2	รายละเอียดของดังปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมตัวกลางดูดซับ..... 70
ภาพที่ 3.3	โมเดลดังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ..... 70
ภาพที่ 3.4	โครงสร้างโมเลกุลของอัลคาไลน์ลิกนิน..... 72
ภาพที่ 3.5	โครงสร้างโมเลกุลของแทนนิก แอซิด..... 72
ภาพที่ 4.1	ลักษณะพื้นผิวของด้านกัมมันต์ ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน ก่อนนำไปอบให้แห้งเพื่อนำมาเป็นตัวกลางดูดซับ..... 84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาดัวยกระบวนการเอเอส (AS Process) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากการออกแบบ การก่อสร้าง และการควบคุมดูแลระบบไม่ยากเกินไปนัก แต่ในบางครั้งก็อาจมีปัญหาดังกล่าวได้ กระบวนการเอเอสประกอบไปด้วยส่วนสำคัญๆ สามส่วน คือ ถังปฏิกรณ์หรือถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และส่วนตะกอนเวียนกลับ ซึ่งในส่วนของการตกตะกอนเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปัญหามากและมีมากที่สุด เช่น การเกิดสลัดจ์หลุดออกมากับน้ำทิ้งมาก การเกิดสลัดจ์เบาและน้ำทิ้งขุ่น การเกิดสลัดจ์จมไม่ลง เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวอาจมีวิธีแก้ไข โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยการใส่ วัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting agent) เช่น ไมโครแซนด์ (Microsand) ทาล (Talc) และ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon ; PAC) โดยวัสดุช่วยตกตะกอนเหล่านี้จะไปแทรกตัวระหว่างโครงสร้างของฟล็อก (Floc) ก่อนเข้าสู่ส่วนตกตะกอน ก่อให้เกิดตะกอนวัสดุตกตะกอนที่ใช้แล้วซึ่งเป็นที่เหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียต้องนำไปกำจัด ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ

ถ่านกัมมันต์แบบผงมีคุณสมบัติ สามารถช่วยตกตะกอนได้ดี และมีคุณสมบัติ สามารถดูดซับมลสารต่างๆ ได้ดีมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่มากและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่ซับซ้อน นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าตะกอนจุลินทรีย์ สามารถดูดซับมลสารบางชนิดออกจากรน้ำเสียได้ ดังนั้นการนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้ช่วยตกตะกอนอาจช่วยดูดซับมลสารอื่นๆ ในน้ำเสีย และตะกอนที่ได้ก็นำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับสำหรับกำจัดมลสารอื่นๆ ได้อีกครั้งหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำถ่านกัมมันต์แบบผงที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของตะกอนจุลินทรีย์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบผงอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ การกำจัดมลสารได้ทั้งแ่งบวกและลบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ และอธิบายปรากฏการณ์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์แบบผงที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วกลับมาใช้ใหม่สำหรับเป็นตัวกลางดูดซับซึ่งเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ลิกนินและแทนนินเกิด จากกระบวนการฟอกเยื่อของโรงงานเยื่อกระดาษ มักมีสีน้ำตาลเข้ม ย่อยสลายได้ยาก ทำให้น้ำในแม่น้ำลำคลองมีสีเข้ม ระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปไม่สามารถย่อยสลายลิกนินและแทนนินในน้ำเสียให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง

ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน โดยใช้ตัวกลางดูดซับที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว ตะกอนจุลินทรีย์และตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยทางเคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน และแทนนินโดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้แล้ว โดยใช้ตัวกลางดูดซับ ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว ตะกอนจุลินทรีย์ และ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพ- เคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษา จลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองแบบที่ละเทโดยใช้ โดยใช้ ตัวกลางดูดซับ ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว ตะกอนจุลินทรีย์ และ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว
2. ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ทำจากกะลามะพร้าว (บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด) ขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 800 ตารางเมตรต่อกรัม โดยเตรียมตัวกลางดูดซับ 5 ชนิด ดังนี้
 - ถ่านกัมมันต์ชนิดผง
 - ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว เตรียมโดยเริ่มระบบโดยใช้กระบวนการเอเอส นำหัวเชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง ใช้ ถึงปฏิบัติการแบบที่ละเท มีปริมาตร 10 ลิตร ควบคุมระบบให้มีค่า F/M เท่ากับ 0.3 และควบคุมค่าอายุสลัดจ์เท่ากับ 10 วันโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง เติมลงไปจนถึงปฏิบัติการด้วยสัดส่วน 100% ($W_{\text{ถ่านกัมมันต์}}/W_{\text{MLSS}}$) เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว เตรียมโดยนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วมาทำการหมักในถัง 50 ลิตรประมาณ 1 เดือน
 - ตะกอนจุลินทรีย์ นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง
 - ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว นำตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสีย ชุมชนดินแดงมาทำการหมักในถัง 50 ลิตร เป็นเวลาประมาณ 1 เดือน
- 3. สารตกค้างคือ บ งานวิจัยนี้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสารอัลคาไลนิกนิน (Alkaline Lignin) และ แทนนิก แอซิด (Tannic Acid)
- 4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาด รูพรุน และปริมาตรรูพรุนของ ตัวกลางดูดซับ ทำการหาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นประจุเป็นศูนย์ โดยวิธีการไตเตรทกรดเบส ศึกษารูปร่างและขนาดอนุภาคของตัวกลางดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีเทอโมกราฟีเมทริก
- 5. ทำการศึกษาทางกายภาพ คือ ศึกษาค่าพีเอช (พีเอช 5, 7 และ 9)ที่มีผลต่อการดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ
- 6. สถานที่ทำการวิจัย คือภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนินจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว
2. เพื่อทราบความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำให้เกิดประโยชน์กับระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
3. เป็นการลดพลังงานและต้นทุนในการผลิตและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

2.1.1 บทนำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (Activated Sludge Process) เป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพประเภทเติมอากาศ ซึ่งได้รับความนิยมมาช้านานโดยอาศัยจุลินทรีย์พวกแบคทีเรียต่างๆ ในการ กิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับหรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง จุลชีพในระบบจะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณมากขึ้น ในลักษณะที่เรียกว่า การเจริญเติบโตแบบแขวนลอย (Suspended Growth) โดยหลักแล้วระบบนี้จะประกอบไปด้วย ถังปฏิกรณ์หรือถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และระบบหมุนเวียนตะกอน

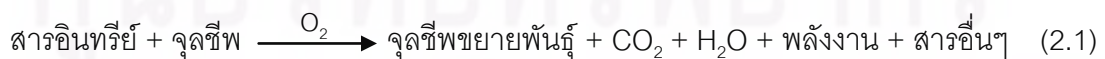
กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสมีลักษณะที่สำคัญที่แตกต่างจากระบบอื่นๆ คือ

- 1) ใช้จุลินทรีย์ซึ่งจับตัวกันเป็นฟล็อก กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย
- 2) ใช้การตกตะกอนแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้ง
- 3) มีการเวียนตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้นออกจากถังตกตะกอน กลับไปยังถังเติมอากาศ
- 4) การทำงานของกระบวนการขึ้นอยู่กับอายุเฉลี่ยของจุลินทรีย์ในระบบ

2.1.2 กลไกในการทำงาน

2.1.2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบเอเอส

ในกระบวนการเอเอส น้ำเสียจะประกอบไปด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิด จุลชีพจำพวกแบคทีเรียจัดเป็นหลักสำคัญในปฏิริยาของการบำบัดน้ำเสียกระบวนการนี้ โดยปฏิริยาที่เกิดขึ้นจะเขียนได้เป็น



สมการดังกล่าวสรุปได้ว่า จุลชีพจะนำสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย มาเผาผลาญด้วยก๊าซออกซิเจน และนำสารอินทรีย์ไปเป็นอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ ในปฏิริยาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงาน และน้ำ โดยส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยขึ้นไปในอากาศ พลังงานจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการดำเนิน

ชีวิต ส่วนของน้ำจะกลายเป็นน้ำใสแล้วปล่อยออกไปจากระบบได้ และอีกสิ่งหนึ่งที่สรุปได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็คือ สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นจุลชีพที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจุลชีพนั้นมีน้ำหนักมากกว่าน้ำ ดังนั้นจึงสามารถแยกจุลชีพออกจากน้ำได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอนต่อไป

2.1.2.2 การเกิดเอเอส

กลไกของการเกิดเอเอส (Activated Sludge) เกิดต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอนในถังปฏิกิริยา คือ

- 1) ขั้นส่งถ่าย (Transfer Step)
- 2) ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion Step)
- 3) ขั้นรวมตะกอน (Flocculation Step)

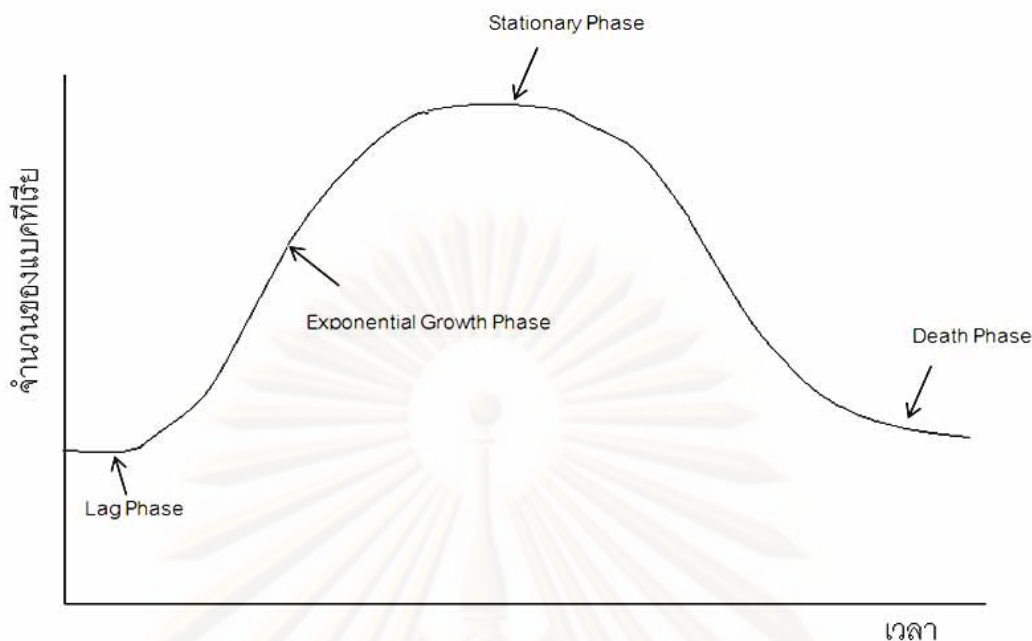
ในขั้นที่สาม ขั้นรวมตะกอน จุลชีพจะถูกกวนผสมรวมกันในถังปฏิกิริยาโดยจับตัวกันในลักษณะของคอลลอยด์ จนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เรียกลักษณะตะกอนนี้ว่า ฟล็อก (Floc) หรือ Activated Sludge ซึ่งจะมีน้ำหนักมากกว่าเซลล์เดี่ยวสามารถตกตะกอนแยกจากน้ำเสียได้ง่าย และเมื่อฟล็อกไปสัมผัสกับ สารแขวนลอย (Suspended Material) หรือสารคอลลอยด์ ก็จะจับมวลสารนี้เอาไว้และทำการย่อยสลายเป็นอาหาร

2.1.3 จุลินทรีย์ในระบบ

2.1.3.1 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโต (Growth) ในทางแบคทีเรียวิทยาหมายถึง การเพิ่มจำนวนของแบคทีเรีย ซึ่งมีความหมายตรงกับการสืบพันธุ์ของแบคทีเรียมากกว่าที่จะหมายถึงการเพิ่มขนาดหรือมวลของแต่ละเซลล์ ทั้งนี้เพราะเป็นการยากที่จะวิเคราะห์ห่มวลแต่ละเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขนาดที่เล็กมากของแบคทีเรีนั่นเอง

จากการนำแบคทีเรียมาเลี้ยงในอาหารเหลวที่จำกัด (Batch Culture) และนับจำนวนแบคทีเรียที่มีอยู่ เป็นระยะตามเวลาที่ผ่านไป แล้วนำจำนวนของแบคทีเรีย มาเขียนกราฟในกราฟ log จะได้เส้นโค้ง เรียกว่า Population Growth Curve ใช้สำหรับแบ่งช่วงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ (Phase) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กราฟการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเทียบกับเวลา (Qasim, 1999)

ช่วงที่ 1 Lag Phase

เป็นช่วงที่จำนวนแบคทีเรียยังไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยังไม่มี การแบ่งเซลล์ แม้เวลาจะผ่านไปช่วงหนึ่งก็ตาม แต่เซลล์ในระยะนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีมวลเพิ่มขึ้น เพราะแต่ละเซลล์จะใช้สารอาหารนำมาสร้างเป็น protoplasm และสารประกอบอื่นๆ เช่น DNA, RNA และ enzyme เป็นต้น หรืออีกนัยหนึ่งเป็นช่วงเวลาที่แบคทีเรียไปใช้ในการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่เพื่อให้พร้อมที่จะแบ่งเซลล์ต่อไป ช่วงเวลา lag phase จะสั้นยาวแตกต่างกันไปตามชนิดของแบคทีเรีย อาหารเพาะเลี้ยง และ สภาพแวดล้อม ตลอดจนระยะการเจริญของแบคทีเรียที่นำมาเพาะเลี้ยง เช่น ถ้านำเอาแบคทีเรียที่เพาะเลี้ยงในอาหารชนิดหนึ่งไปเพาะเลี้ยงใหม่ในอาหารชนิดเดิม ช่วงระยะ lag phase จะสั้นลง เนื่องจากแบคทีเรียไม่จำเป็นต้องสร้าง enzyme อีกครั้ง ซึ่งเหมือนกับการหมุนเวียนเซลล์แบคทีเรีย ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแอส ก็เป็นวิธีหนึ่งที่น่าเอาแบคทีเรียที่ผ่านพ้นระยะ lag phase ไปแล้วกลับในถังปฏิกิริยาใหม่ ทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารประกอบต่างๆ ในน้ำทิ้งได้ทันที แบคทีเรียในช่วงนี้จะมีอัตราการเกิดและการตายต่ำ

ช่วงที่ 2 Log Phase หรือ Exponential Growth Phase

เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตสูงสุด มีการแบ่งตัวอย่างรวดเร็วในอัตราที่สม่ำเสมอ เซลล์แต่ละเซลล์ในระยะนี้จะมีกิจกรรมของกระบวนการเมตาบอลิซึมเกิดขึ้น สารอาหารและออกซิเจนถูกใช้เป็นจำนวนมากและรวดเร็ว ซึ่งการเจริญเติบโตในระยะนี้ จะให้ผลดีกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยจะทำให้ลดสารประกอบอินทรีย์ไปได้มาก ระยะของ log phase

ขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ คือ ปริมาณ สารอาหาร อุณหภูมิ พีเอช รวมทั้งสารพิษที่อาจเกิดจาก กระบวนการเมตาบอลิซึมเอง จำนวนประชากรใน ช่วงนี้ มีอัตราการเกิดสูงมากกว่า การตาย ของ แบคทีเรีย ซึ่งการตายของแบคทีเรีย จะเกิดขึ้นในทุกๆ ช่วง เพียงแต่ในแต่ละช่วงจะมีอัตราการตาย ไม่เท่ากัน

ช่วงที่ 3 Stationary Phase

ระยะนี้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะช้าลง มีประชากรสูงขึ้นสูงสุดและ คงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจากสารอาหารถูกใช้จนเกือบหมดและสารพิษที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์ มีมากขึ้น ซึ่งช่วงนี้จะมีจำนวนประชากรสมดุลกันคือ การเกิดใกล้เคียงกับการตาย

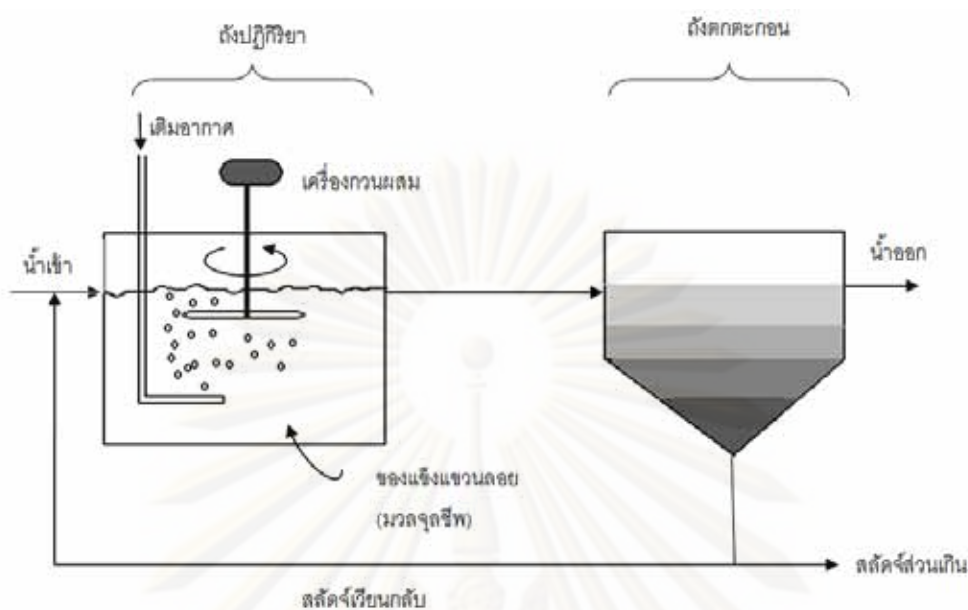
ช่วงที่ 4 Death Phase

ช่วงก่อนนี้จะมีการตายอย่างช้าๆ และเข้าระยะนี้การตายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเหลืออยู่บางเซลล์ในเวลาอันสั้น เซลล์ของแบคทีเรียที่ตายแล้วจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย ด้วยตัวเอง ทำให้มวลลดลง ส่วนที่ย่อยไม่หมดก็จะกลายเป็นตะกอนตกอยู่ที่ก้นถังปฏิกริยา

2.1.4 ส่วนประกอบของระบบ

ระบบการบำบัดน้ำเสียเอเอสมีส่วนประกอบสำคัญ ที่สามารถนำไปใช้ตัดสินใจได้ว่า ระบบบำบัดน้ำเสียใดเป็นระบบเอเอสหรือไม่ ส่วนประกอบสำคัญดังกล่าวมีด้วยกัน 3 ส่วน คือ ถัง ปฏิกริยา ถังตกตะกอน และ ส่วนหมุนเวียนตะกอน ส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 2.2

ส่วนที่หนึ่ง ถังปฏิกริยา หรือโดยทั่วไปเรียกว่าถังเติมอากาศ มีด้วยกันหลาย ลักษณะตามแต่ละชนิดของระบบเอเอส หน้าที่สำคัญ ของถังปฏิกริยาคือการเติมอากาศ หรือก๊าซ ออกซิเจนให้กับระบบเพื่อให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และทำหน้าที่ กวนผสมจุลินทรีย์ในน้ำเสียให้มีโอกาสสัมผัสสารอินทรีย์เพื่อให้เกิดปฏิกริยาได้ทั่วถึงแล้วทำให้เกิด ฟลอคของจุลินทรีย์ขึ้นมาซึ่งมี น้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย ตลอดจนมีหน้าที่อื่นๆ เช่น ในการ จำกั้ไนโตรเจนในน้ำเสียถึงปฏิกริยา นี้จะทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันเปลี่ยนแอมโมเนีย เป็นไนเตรทเพื่อทำการบำบัดต่อไป เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของระบบเอเอส (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2525)

ส่วนที่สอง ตั้งตกตะกอน มีหน้าที่คือทำการแยกของแข็ง ซึ่งในที่นี้คือมวลของ จุลินทรีย์ออกจากของเหลวหรือน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง โดยจุลินทรีย์ที่กินสารอินทรีย์เข้าไปก็จะเกิด การเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของเซลล์จุลินทรีย์ และจับตัวกันเป็นฟล็อก ซึ่งฟล็อกนี้จะตกตะกอนได้ ดีในถังตกตะกอน และน้ำที่แยกออกมาจะเป็นน้ำใสสามารถปล่อยออกทิ้งได้ ส่วนตะกอน จุลินทรีย์หรือสลัดจ์ จะถูกปล่อยทิ้งจากก้นถังเพื่อนำไปบำบัดหรือเข้าสู่ระบบหมุนเวียนตะกอน กลับไปยังส่วนแรกต่อไป

ส่วนที่สาม ส่วนหมุนเวียนตะกอน เป็นส่วนที่สำคัญ และ เป็นส่วนที่บ่งบอกความ เป็นระบบ เอเอส การหมุนเวียนตะกอนเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการควบคุมระบบ กล่าวคือ ในการ ควบคุมระบบให้ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบเกิดความสมดุลกับสารอินทรีย์เป็นสิ่งสำคัญ มาก เช่น ถ้าในระบบมีจุลินทรีย์ในระบบน้อยแต่มีสารอินทรีย์ในระบบมาก ก็ เกิดความไม่สมดุล ก็ต้องทำการเพิ่มตะกอน จุลินทรีย์มากขึ้นเพื่อให้ระบบสมดุล เป็นต้น ดังนั้นถ้าไม่มีส่วนหมุนเวียน ตะกอนการควบคุมระบบก็ต้องเปลี่ยนไปรับส่วนอื่นๆ แทนซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากกว่ามาก

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ

ประสิทธิภาพในการทำงาน ของระบบบำบัดน้ำเสียเอเอส ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายชนิด ถ้าการควบคุมดูแลไม่ดีในสิ่งหนึ่งสิ่งใด ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเป็นไปได้ไม่ ตรงตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งปัจจัยที่ต้องควบคุมให้ดีและมีผลต่อระบบ คือ

2.1.5.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ในระบบเบเอสจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหาร ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยอาจทำให้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์สูงคือมีอาหารมาก ทำให้จุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกระจายไปรวมกันในฟล็อก ทำให้ตกตะกอนไม่ดี น้ำออกมีความขุ่นสูง ซึ่งสรุปได้ว่าต้องควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีความสมดุลพอเหมาะ จึงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ และถ้าหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเข้ามามีมากเกินไปเกินความสามารถที่ระบบจะรับได้ (Shock load) ก็จะทำให้เกิดความอันตรายต่อระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์ปรับตัวเพื่อรับสารอินทรีย์ ไม่ทันทำให้จุลินทรีย์ตาย ระบบก็จะไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้

2.1.5.2 ธาตุอาหาร

จุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหาร (Nutrient) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก โดยปกติแร่ธาตุเหล่านี้มีครบในน้ำเสียชุมชน แต่อาจมีไม่พอในน้ำเสียอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารทำให้ จุลินทรีย์สร้างฟล็อก (Floc forming organism) เติบโตได้ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานในระบบต่ำลงไป โดยปกติจะควบคุมอัตราส่วนบีโอดีต่อธาตุอาหารคือ BOD : N : P : Fe เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5 การเติมไนโตรเจนมักใส่ในรูปแบบแอมโมเนีย หรือ ยูเรีย สำหรับฟอสฟอรัสมักใส่ในรูปแบบฟอสฟอริก ส่วนเหล็กมักใส่ในรูปแบบของเฟอร์ริกคลอไรด์

2.1.5.3 ออกซิเจนละลาย

ในถังเติมอากาศต้องมีค่าออกซิเจนละลาย (DO) อยู่ในน้ำระหว่าง 1 ถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ระบบดำเนินไปได้อย่างเป็นปกติ โดยทั่วไปการเติมออกซิเจนละลาย จะใช้การเติมอากาศ (aeration) ด้วยเครื่องเติมอากาศ (aerator)

2.1.5.4 ระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ จะต้องมีมากเพียงพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ หากมีเวลาน้อยเกินไปสารที่ย่อยยากๆ จะถูกย่อยได้ไม่ถึงขั้นสุดท้ายที่ทำให้มีค่า บีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก และในถังตกตะกอนก็เช่นกันถ้าเวลาในการตกตะกอนมีน้อยเกินไปจะทำให้สลัดจ์ตกได้ไม่ดี แต่ถ้ามีเวลามากเกินไปเกิดการสะสมของสลัดจ์ก็จะทำให้สลัดจ์ขาดออกซิเจนและเกิดการเน่าเสียได้

2.1.5.5 ค่าพีเอช

พีเอช (pH) เป็นค่าแสดงความเป็นกรด-ด่าง จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชเหมาะสม ที่อยู่ในช่วง 6.5-8.5 จึงควรควบคุมระบบให้มีพีเอชอยู่ในช่วงดังกล่าว ถ้าต่ำกว่า 6.5 ว่าจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง และการตกตะกอนก็จะไม่ดี ถ้าพีเอชสูงกว่า 8.5 ฟอสฟอรัสจะแยกตัวออกมาจากน้ำ และจุลินทรีย์ก็ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ถ้าพีเอชมีค่าต่ำมากๆ หรือสูงมากๆ จุลินทรีย์ก็จะตายหมดไม่สามารถดำรงชีวิตได้

2.1.5.6 สารพิษ

สารพิษแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ พิษเฉียบพลัน ซึ่งจุลินทรีย์จะตายกันหมดในเวลาไม่กี่ชั่วโมง และแบบพิษออกฤทธิ์ช้า ซึ่งจะใช้เวลาและค่อยๆ ตายลงไป สารพิษเฉียบพลันสังเกตง่าย เนื่องจากมีผลเกิดขึ้นเร็ว เช่น ไซยาไนต์ อาร์ซินิค เป็นต้น ส่วนพวกออกฤทธิ์ช้า เช่น โลหะหนักต่างๆ นอกจากนั้นสารพิษก็เกิดจากสารอินทรีย์เอง ได้แก่ แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูง เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น

2.1.5.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียสจะทำให้จุลินทรีย์ เติบโตเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวจนถึงอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นการเจริญเติบโตจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป แต่ในประเทศไทยอุณหภูมิในฤดูร้อนและฤดูหนาวไม่มีความแตกต่างกันมากนักทำให้ อุณหภูมิไม่มีผลกับระบบมาก นอกจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีน้ำเสียมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก และพบว่าอุณหภูมิ มีผลต่อการตกตะกอนคือ ถ้าอุณหภูมิต่ำการตกตะกอนจะดีกว่า อุณหภูมิสูง แต่ถ้ามีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างกันเกิน 2 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำเนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกันได้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

2.1.5.8 การกวน

ภายในถังปฏิกรณ์ต้องมีการกวนอย่างทั่วถึงเพื่อป้องกัน ไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์ ตกตะกอน และเพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียจนกระทั่งจับตัวกันเป็น ฟลอคที่ดี การกวนที่ถูกต้องป้องกันน้ำเสียไม่ให้ไหลลัดวงจรและทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูง ลักษณะการกวนนั้นต้องมีความพอดีไม่น้อยเกินไปจนจุลินทรีย์ไม่จับตัวกัน และไม่มากเกินไป จนทำให้ฟลอค จุลินทรีย์แตกเสียหาย

2.1.5.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ส่ง เข้ามาในระบบ มีผลโดยตรงต่อการทำงานของกระบวนการทางชีววิทยาและกระบวนการตกตะกอน เช่น หากน้ำเสียมีอัตราการไหลมากขึ้นจนทำให้เวลาในการบำบัดน้อยลง จุลินทรีย์ก็ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไม่ทัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงไปด้วย ดังนั้นต้องมีการควบคุมให้มีอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้ามาบำบัดมีความสม่ำเสมอในอัตราใกล้เคียงกับที่ทำการออกแบบไว้

2.1.6 หลักการออกแบบและควบคุมระบบ

2.1.6.1 ปัจจัยในการดำเนินการ

ในการออกแบบและควบคุมระบบต้องมีความรู้ในหลักการพื้นฐาน และปัจจัยต่างๆ ดังที่จะอธิบายต่อไปนี้

1. ของแข็งแขวนลอยในน้ำตะกอน (Mixed liquor suspended solid, MLSS) ความเข้มข้นของของแข็งในถังเติมอากาศทั้ง MLSS และ MLVSS (Mixed liquor volatile suspended solid) เป็นค่าที่ใช้ประมาณมวลจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบเอเอส โดย MLVSS คือปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้ ซึ่งแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสีย แต่ MLSS หมายถึงของแข็งแขวนลอยทั้งหมดซึ่งรวมถึงสารอนินทรีย์เข้าไปด้วยโดยในทางทฤษฎี ยิ่งค่า MLSS ในถังปฏิกริยาสูง ประสิทธิภาพการบำบัดก็จะสูง แต่ถ้า MLSS สูงมากจะถูกกำจัดโดยปริมาณออกซิเจนในถังปฏิกริยาซึ่งออกซิเจนที่เติมเข้าไปจะไม่เพียงพอ และเมื่อ MLSS ในระบบสูงมากเกินไปตะกอน จุลชีวะจะตกตะกอนได้ไม่ดีในถังตกตะกอน

2. อายุสลัดจ์ (Sludge age หรือ Solid retention time, SRT)

อายุของสลัดจ์จะมีผลต่อลักษณะสมบัติ และสภาพของสลัดจ์ในถังเติมอากาศ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนน้ำหนักของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศต่อน้ำหนักของแข็งแขวนลอยที่ระบายออกจากระบบในแต่ละวัน ซึ่งเขียนได้เป็นสมการ

$$\theta_c = \frac{\text{MLSS}}{\text{MLSS}_{\text{OUT}} \text{ ต่อวัน}} \quad (2.2)$$

เมื่อ θ_c คือ อายุสลัดจ์มีหน่วยเป็น วัน

MLSS คือ น้ำหนักของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกริยามีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
 MLSS_{OUT} คือ น้ำหนักของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบต่อวันมีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

3. ภาระบรรทุก (Plant loading)

ภาระบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบระบบเอเอสมีด้วยกัน 3 ค่า คือ ภาระบรรทุกเชิงปริมาตร (volumetric loading) คือปริมาณการไหลของน้ำเสียที่สัมพันธ์กับปริมาตรของถังปฏิกริยา ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading) คือค่าบีโอดี ที่สัมพันธ์กับปริมาตรของถังปฏิกริยา และภาระบรรทุกสลัดจ์ (sludge loading) คือค่าบีโอดี ที่สัมพันธ์กับปริมาณมวลจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบเอเอส

1) ภาระบรรทุกเชิงปริมาตร (volumetric loading)

คือเวลาที่เก็บน้ำเสียในถังปฏิกริยา เรียกว่าเวลาที่เก็บน้ำ (hydraulic retention time, HRT) คำนวณจาก

$$\frac{HRT}{Q} = V \quad (2.3)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของของเหลวในถังเติมอากาศหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร
 Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสียสู่ถังเติมอากาศ เวลาเก็บกักน้ำมีหน่วยเป็น ชั่วโมง

2) ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading)

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เป็นอัตราส่วนค่าภาระบีโอดีที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาตรถังปฏิกริยา แสดงค่าภาระบรรทุกในรูปของกิโลกรัมบีโอดี ต่อปริมาตรของถังต่อวัน ดัง สมการ

$$\text{Organic loading} = \frac{Q \times BOD_5}{V \times 1000} \quad (2.4)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของของเหลวในถังเติมอากาศหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร
 Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสียสู่ถังเติมอากาศ เวลาเก็บกักน้ำมีหน่วยเป็น ชั่วโมง
 BOD₅ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในเวลา 5 วัน

3) ภาระบรรทุกสลัดจ์ (sludge loading)

ภาระบรรทุกของบีโอดี สัมพันธ์กับปริมาณของสลัดจ์ในถังปฏิกริยา ภาระบรรทุกตะกอนหมายถึงอัตราส่วนของอาหาร (F=food) ต่อ จุลชีพ (M=micro-organism) คำนวณได้จาก

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \times \text{BOD}_5}{V \times \text{MLSS}} \quad (2.5)$$

- เมื่อ V คือ น้ำหนักของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่อวันมีหน่วยเป็น กก./วัน
 Q คือ น้ำหนักของจุลชีพในถังเติมอากาศมีหน่วยเป็น กก.
 BOD_5 คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในเวลา 5 วัน
 MLSS คือ น้ำหนักของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกริยามีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

4) ดัชนีปริมาตรสลัดจ์(sludge volume index, SVI)

เป็นค่าที่ใช้วัดลักษณะการตกตะกอนในระบบเอเอส ว่ามีคุณภาพการตกตะกอนดีหรือไม่โดยคำนวณจากค่าปริมาตรของตะกอนจุลินทรีย์ที่ทิ้งให้ตกตะกอนในกระบอกตวงเป็นเวลา 30 นาที (SV_{30}) หารด้วยความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย โดยมีหน่วยเป็น มล./ก. ดังเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$\text{SVI} = \frac{(\text{SV}_{30}) \times 100}{\text{MLSS}} \quad (2.6)$$

- เมื่อ SVI คือ ดัชนีปริมาตรตะกอนมีหน่วยเป็น มล./ก.
 SV_{30} คือ ค่าปริมาตรของตะกอนจุลินทรีย์ที่ทิ้งให้ตกตะกอนในกระบอกตวงเป็นเวลา 30 นาทีมีหน่วยเป็น มล.
 MLSS คือ น้ำหนักของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกริยามีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

ในระบบบเอเอสพบว่าการตกตะกอนจะเกิดได้ดีถ้า $\text{SVI} < 100$ มล./ก. ถ้า $\text{SVI} > 150$ มล./ก. แสดงว่าการตกตะกอนเริ่มมีปัญหา อาจมีสลัดจ์จืด และถ้ามากกว่า 250 มล./ก. แสดงว่าตกตะกอนไม่ดี ต้องแก้ไข

2.1.6.2 หลักการออกแบบระบบเอเอส

หลักในการออกแบบและควบคุมระบบเอเอส ที่นำมาใช้ในการดำเนินการวิจัย แบ่งได้เป็น 2 วิธีการ คือ วิธีคำนวณอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ (F/M) และวิธีทางจลนพลศาสตร์

1. การออกแบบเอเอสโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ (F/M)

ค่าอาหาร (F) คือปริมาณ (มวล) ของสารอินทรีย์ที่วัดได้ในรูปบีโอดีมีน้ำหนักเป็น กิโลกรัมต่อวัน ที่เข้าสู่ระบบ โดยคำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าอาหาร} \quad F &= \text{น้ำหนักของสารอินทรีย์ (กก./วัน)} \\ &= \text{ค่าบีโอดีที่เข้าระบบ (กก./วัน)} \end{aligned}$$

$$= \text{บีโอดี(มก./ล.)} \times \text{อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)}$$

ค่าน้ำหนักของจุลชีพ (M) คือปริมาณ (มวล) ของจุลชีพที่วัดอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยระเหยได้ในสลัดจ์ (MLVSS) หรือของแข็งแขวนลอย (MLSS) ซึ่งเป็นตัวแทนของมวลจุลชีพที่มีอยู่ในถังเติมอากาศ (V) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม โดยคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าน้ำหนักจุลชีพ } M &= \text{น้ำหนักของ MLVSS ในถังเติมอากาศ} \\ &= \text{MLVSS (มก./ล.)} \times V \text{ (ลบ.ม.)} \div 1000 \end{aligned}$$

ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ คืออัตราส่วนของสารอินทรีย์ หรือ BOD (F) ต่อ น้ำหนักของ จุลชีพ (M) ในถังเติมอากาศ โดยปกติค่า F/M ของระบบเอเอสแบบธรรมดาควรควบคุมเป็น 0.2-0.4 กก.BOD/กก.MLSS-วัน ค่า F/M สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{F}{M} = \frac{\text{BOD} \times Q}{\text{MLVSS} \times V} \quad (2.7)$$

โดยที่ BOD คือ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่วัดอยู่ในรูป BOD (มก./ล.)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ (ลบ.ม./วัน)

MLSS คือ ของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (มก./ล.)

V คือ ปริมาณถังเติมอากาศ (ลบ.ม.)

ในการออกแบบด้วยวิธีนี้ ค่า F/M จะถูกกำหนดจากการเลือกประเภทของระบบเอเอส เช่น ระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS) จะมีค่า F/M เท่ากับ 0.2-0.4 ในการเลือกประเภทของเอเอสควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ เช่น ความยาก-ง่าย ในการควบคุมระบบ พื้นที่ในการก่อสร้าง เป็นต้น และนำข้อมูลจากค่าบีโอดี และอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย และค่าเอ็มแอลวีเอเอส จากถังปฏิกิริยาที่ทำการตรวจวัด หรือจากการประมาณการณโดยขึ้นอยู่กับชนิดของระบบเอเอส มาคำนวณในสมการก็จะสามารถประมาณขนาดของถังปฏิกิริยาได้

2. การออกแบบระบบเอเอสโดยใช้วิธีทางจลนพลศาสตร์

หลังจากทำการศึกษาทฤษฎีจลนพลศาสตร์แล้ว จะสามารถคำนวณออกแบบถังปฏิกิริยา เอเอสได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญจะสามารถเปิดหาได้จากตารางโดยเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

$$\text{จากสมการ} \quad X = \frac{\theta_c Y (S_0 - S)}{\theta (1 + k_d \theta_c)} \quad (2.8)$$

เมื่อ θ_c คือ ค่าอายุสลัดจ์ (วัน)

X คือความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังเติมอากาศหรือเอ็มแอลเอสเอส (มิลลิกรัม/ ลูกบาศก์เมตร)

θ คือ เวลาเก็บกักน้ำ

2.1) ทำการกำหนดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากตารางค่ามาตรฐาน เช่น Y จะอยู่ในช่วง 0.4-0.8 และ k_d จะอยู่ในช่วง 0.06-0.15 เป็นต้น

2.2) คำนวณค่า θ หรือเวลาเก็บกักน้ำโดย $\theta = V / Q$ ซึ่งจะประมาณขนาดของถังปฏิกิริยา (V) ได้

2.3) คำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะสุทธิ u ซึ่ง $u = E \frac{F}{M} = \left[\frac{S_0 - S}{\theta X} \right]$ กำหนดให้การทำงานของระบบ (E) เป็น 100%

2.4) คำนวณหาค่า θ_c จริงในระบบ จากสมการ $\frac{1}{\theta_c} = Yu - k_d$ เพื่อใช้ในการควบคุมระบบต่อไป

จากการศึกษาพบว่าการออกแบบโดยวิธีทางจลนพลศาสตร์ สามารถคำนวณออกแบบได้ยากกว่าวิธีใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ โดยความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าทางจลนพลศาสตร์ ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงกว้าง ต้องอาศัยประสบการณ์จากผู้ออกแบบโดยตรงในการเลือกค่าพารามิเตอร์ การออกแบบด้วยวิธีนี้จึงควรคำนวณควบคู่กันไปกับวิธีการออกแบบโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ จึงจะได้งานออกมาถูกต้องมากที่สุด

2.1.6.3 การควบคุมการทำงานของระบบเอเอสโดยการควบคุมอายุสลัดจ์

การควบคุมการทำงานของ ระบบเอเอส มีการควบคุมหลากหลายวิธี เช่น การควบคุมอัตราส่วนอาหารต่อจุลชีพ (F/M) การควบคุมอัตราส่วนภาระอินทรีย์ต่อปริมาตรถังปฏิกิริยา การควบคุมอายุสลัดจ์ (Sludge Age) เวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) การควบคุมอัตราการผลิตสลัดจ์ส่วนเกิน ซึ่งวิธีที่ใช้มากและใช้มาก และใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการควบคุมอายุสลัดจ์

อายุสลัดจ์ในระบบเอเอส หมายถึง ระยะเวลาเฉลี่ยที่จุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกิริยา (Mean Cell Residence Time) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนน้ำหนักรวมของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกิริยาต่อน้ำหนักรวมของแข็งแขวนลอยที่ระบายออกจากระบบในแต่ละวันซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{อายุสลัดจ์} = \frac{MLSS}{MLSS_{OUT} \text{ ต่อวัน}} \quad (2.9)$$

เมื่อ MLSS	คือ	น้ำหนักของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกริยามีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
MLSS _{OUT}	คือ	น้ำหนักของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบต่อวันมีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

2.1.7 ประเภทของ กระบวนการ เอเอส (จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

โดยปกติระบบเอเอสประกอบด้วยถังปฏิกริยา ถังตกตะกอนและส่วนหมุนเวียนตะกอน ประเภทของระบบเอเอสขึ้นอยู่กับการจัดวางรูปแบบของถังปฏิกริยา ซึ่งเกิดจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในแต่ละรูปแบบของถังปฏิกริยาจะมีลักษณะการเติมอากาศที่ต่างกัน ทำให้การเกิดปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินท รียก็จะต่างกัน และลักษณะตะกอนจุลินทรีย์หรือสลัดจ์ก็จะมี ความแตกต่างกัน ซึ่งล้วนแล้วแต่จะทำให้มีประสิทธิภาพของระบบแตกต่างกันออกไป

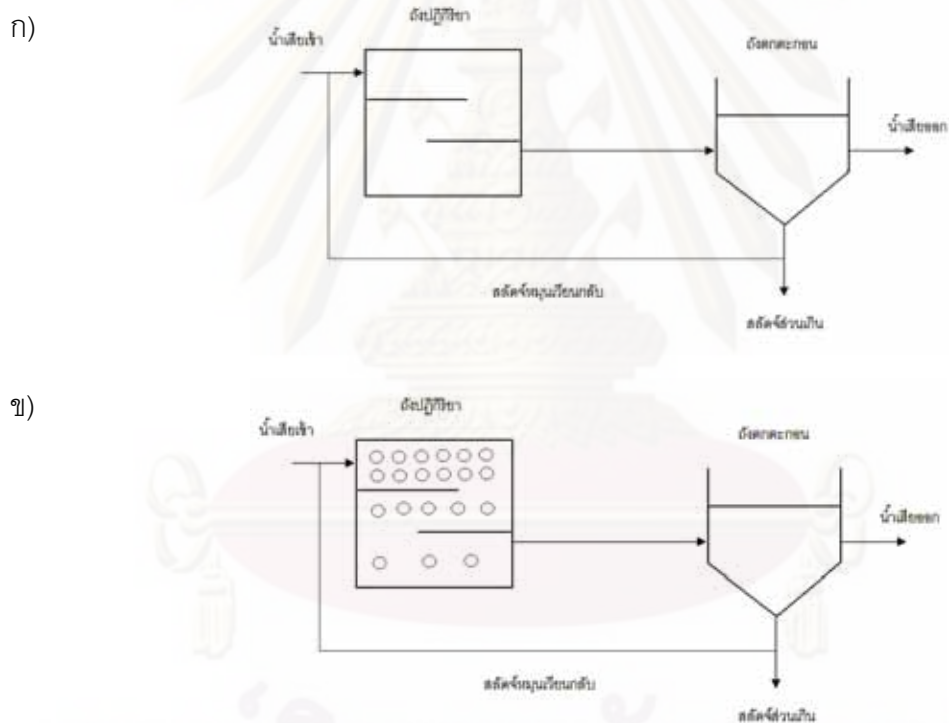
การออกแบบและการควบคุมระบบ เมื่อได้ทำการเลือกรูปแบบของระบบเอเอสแล้ว การนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาใช้ เช่น ความสัมพันธ์ ระหว่างอาหารกับปริมาณจุลชีพ และค่าอายุสลัดจ์ เป็นต้น ต้องทราบชนิดของรูปแบบถังปฏิกริยาเพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาใช้ในการควบคุมการทำงาน และการออกแบบระบบเอเอส ให้ได้ประสิทธิภาพตามที่กำหนดไว้ ประเภทของระบบเอเอสได้แก่

1. ระบบเอเอสแบบธรรมดา(Conventional Activated Sludge, CAS)
2. ระบบเอเอสแบบที่มีการเติมอากาศแบบเรียว (Tapered Aeration Activated Sludge, TAAS)
3. ระบบเอเอสแบบมีการเติมน้ำเสียเป็นขั้น (Step-feed Aeration Activated Sludge, SAAS)
4. ระบบเอเอสแบบผสมอย่างสมบูรณ์ (Completely Mixed Activated Sludge, CMAS)
5. ระบบเอเอสแบบดัดแปลง (Modified Aeration System)
6. ระบบเอเอสแบบอัตราการบำบัดเร็ว (High-rate Activated Sludge)
7. ระบบเอเอสแบบเติมอากาศยืดเวลา (Extended Aeration Activated Sludge, EAAS)
8. ระบบเอเอสแบบเติมและถ่ายออก (Fill and Draw Activated Sludge)
9. ระบบเอเอสแบบคอนแทกต์สเตบิไลเซชัน (Contact Stabilization System)
10. ระบบเอเอสแบบเคราส์ (Kraus Process)
11. ระบบเอเอสแบบให้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (High-Purity Oxygen Process)

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกการเดินระบบ เอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS) เป็นระบบเอเอสแบบแรกที่ใช้กันทั่วไป มีลักษณะเป็นถังปฏิกริยา

สี่เหลี่ยมผืนผ้ายาวๆ มีกระแสน้ำเข้าและกระแสน้ำเวียนกลับที่ปลายด้านหนึ่ง และมีกระแสน้ำออกอีกปลายด้านหนึ่ง ถึงปฏิบัติการเป็นแบบไหลผ่าน (Plug Flow) โดยปกติจะใช้ตัวกระจายอากาศวางห่างกันสม่ำเสมอตลอดความยาวด้านหนึ่งของผนังให้อากาศเท่ากัน พบว่าการเวียนสลับจ็กลับที่ด้านหนึ่งของถังปฏิกริยานั้นทำให้สภาวะแวดล้อมของจุลชีพเปลี่ยนไปตามจุดต่างๆ ความต้องการออกซิเจนมีมากที่สุดที่จุดที่จุดเข้าและมีลดลงไปจนถึงจุดออก จึงทำให้ส่วนแรกของถังเดิมอากาศมีออกซิเจนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง ระบบนี้มีความอ่อนไหวกับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้ามาอย่างกะทันหัน (Shock loads) และไม่สามารถรับสารพิษได้มากนัก

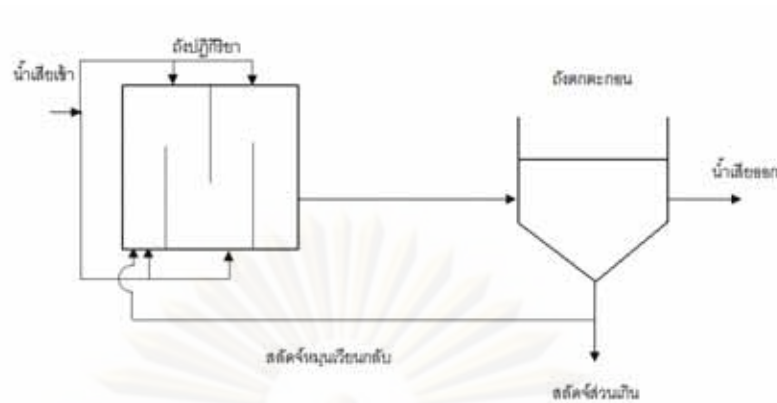
แผนภาพของระบบเอเอสทั้ง 11 ชนิด แสดงอยู่ในภาพที่ 2.3 และ ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอเอส แต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.1



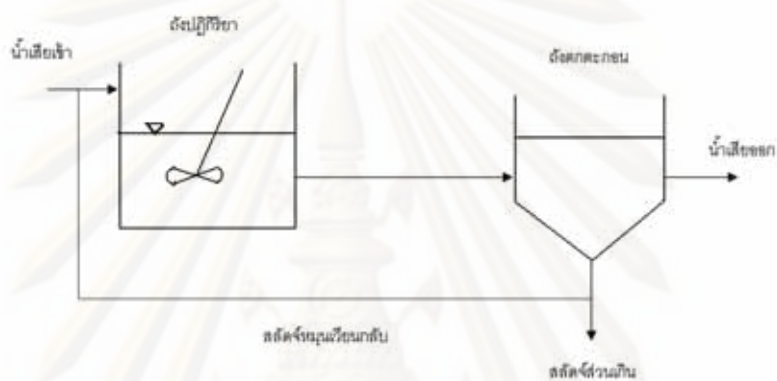
ภาพที่ 2.3 ชนิดของระบบเอเอส : ก) CAS, ข) TAAS

(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

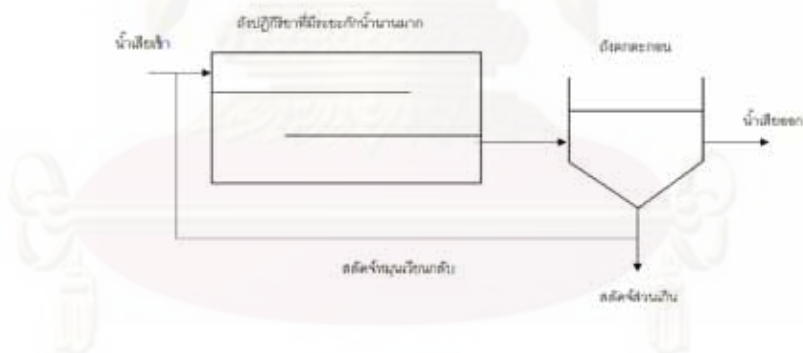
ค)



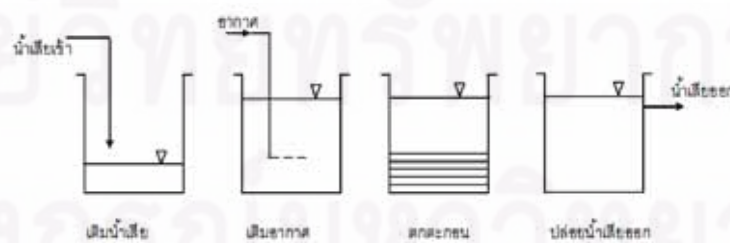
ง)



จ)



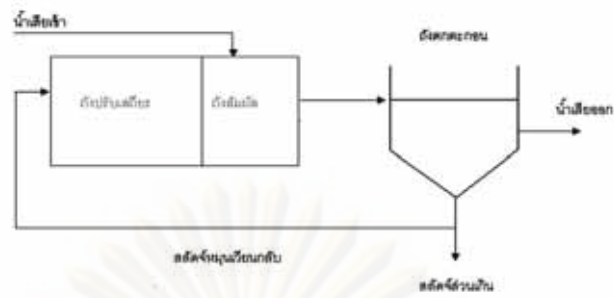
ฉ)



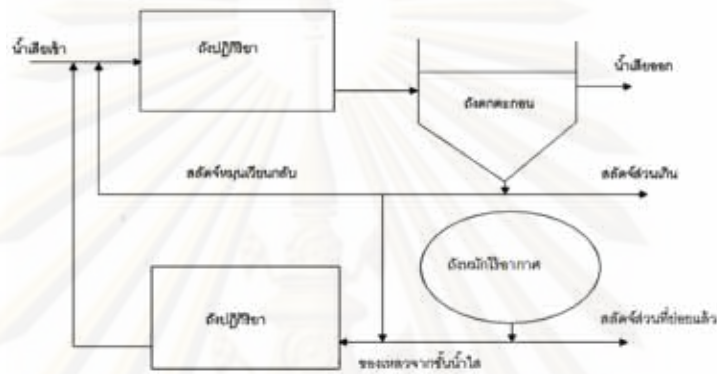
ภาพที่ 2.3 (ต่อ) ชนิดของระบบแอกทีฟ : ค) SAAS, ง) CMAS, จ) EASS, ฉ) Fill and Draw AS

(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

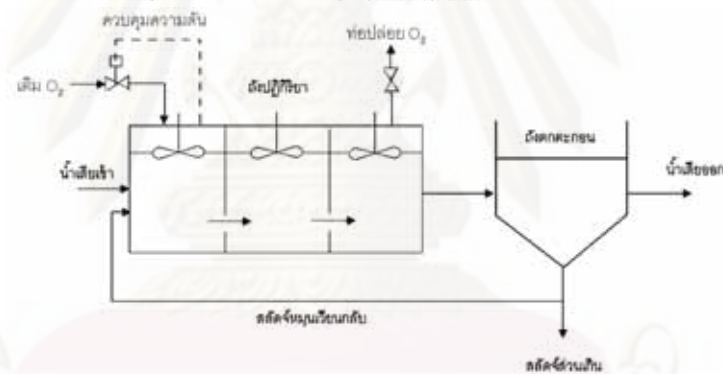
ข)



ข)



ค)



ภาพที่ 2.3 (ต่อ) ชนิดของระบบเอเอเอส : ข) Contact-Stabilization, ข) Kraus Process, ค) High-Purity Oxygen Process (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอเอสแต่ละประเภท

รูปแบบของระบบเอเอส	รูปแบบการไหล	อายุสลัดจ์ (d)	F/M (d^{-1})	Aerator loading (kg/m^3d)	MLSS (mg/L)	เวลาเก็บกักน้ำ (h)	อัตราการหมุนเวียน
Conventional	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1500-3000	4-8	0.25-0.5
Tapered aeration	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.3-0.6	1500-3000	4-8	0.25-0.5
Step-feed aeration	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.4	0.6-1.0	2000-3500	3-5	0.25-0.75
Complete- mix	กวนสมบูรณ์	5-15	0.2-0.6	0.8-0.2	3000-6000	3-5	0.25-1.0
Modified aeration	ไหลต่อเนื่อง	0.2-0.5	1.5-5.0	1.2-2.4	200-1000	1.5-3	0.05-0.25
Higrate aeration	ไหลต่อเนื่อง	3-10	0.4-1.5	2.0-15	3000-6000	2-4	0.5-2.0
Extended aeration	กวนสมบูรณ์	20-30	0.05-0.15	0.1-4	3000-6000	18-36	0.5-2.0

ที่มา : Qasim, 1999

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)ค่าพารามิเตอร์ของระบบเอเอสแต่ละประเภท

รูปแบบของระบบเอเอส	รูปแบบการไหล	อายุสลัดจ์ (d)	F/M (d^{-1})	Aerator loading (kg/m^3d)	MLSS (mg/L)	เวลาที่เก็บกักน้ำ (h)	อัตราการหมุนเวียน
Sequencing batch reactor	กวนผสมบวม	ไม่ใช้	0.05-0.3	0.2-0.7	1500-5000	4-9	ไม่ใช้
Contact stabilization	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.2-0.6	1.0-1.2	1000-4000 4000-1000	0.5-1.0 3.0-6.0	0.5-1.0
Kraus process	ไหลต่อเนื่อง	5-15	0.3-0.1	0.5-1.5	2000-3500	4-8	0.5-1.0
Hish-purity oxygen	กวนผสมบวม	8-20	0.25-1.0	1.6*3.3	6000-8000	2-5	0.25-0.5

ที่มา : Qasim, 1999

2.2 กระบวนการตกตะกอน

การตกตะกอน เป็นวิธีแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงดึงดูดของโลก ผลจากการตกตะกอน ทำให้ได้ 2 ส่วนคือ น้ำใส และ ตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge) ถ้าจุดมุ่งหมายของการ ตกตะกอน เป็นไปเพื่อให้ได้น้ำใส การตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่า Clarification แต่ถ้าจุด มุ่งหมายเป็นไปเพื่อให้ได้ สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด การตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่า Thickening โดยการบำบัดน้ำเสียจะมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้น้ำใสมากกว่า เพื่อให้สลัดจ์เข้มข้น

2.2.1 ประเภทของการตกตะกอน

การตกตะกอนอาจจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ตามแต่ระดับความเข้มข้น และ ลักษณะของสมบัติของของแข็งที่อยู่ในน้ำดังนี้

1. การตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling)
2. การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling)
3. การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling)
4. การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression Settling)

น้ำที่มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยต่ำ อาจตกตะกอนเป็นแบบโดด หรือรวมกลุ่มก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของตะกอนหรืออนุภาค ถ้าตะกอนแขวนลอย ไม่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่ม การตกตะกอนจะเป็นแบบโดด ตัวอย่างของการตกตะกอนแบบนี้ ได้แก่ การตกตะกอนของเม็ดกรวดหรือทรายขนาดต่างๆ ถ้าตะกอนแขวนลอยมีแนวโน้มในการจับกันเป็นกลุ่มหรือเป็นก้อน การตกตะกอนจะเป็นแบบรวมกลุ่ม ตัวอย่าง ได้แก่ การตกตะกอนของน้ำเสีย หรือฟล็อกของสารส้ม หรือฟล็อกที่เกิดจากสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ชนิดอื่นๆ เป็นต้น น้ำที่มีตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับปานกลางหรือสูง (เช่น มีความเข้มข้นสูงกว่า 1,000-2000 มก./ล.) มักมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคแต่ละอนุภาคอยู่ติด กัน และเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเดียวกัน ทำให้เห็นเป็นชั้นแยกกันระหว่างน้ำใสและอนุภาค ซึ่งการตกตะกอนของระบบแอกทีฟ (Activated sludge) เป็นตัวอย่างของการตกตะกอนที่เป็นชั้นที่เห็นได้ชัดกว่าตัวอย่างอื่น สำหรับการตกตะกอนแบบอัดตัว เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีตะกอนแขวนลอยอยู่ ในระดับสูงมาก และมักเกิดขึ้นที่ก้นถังตกตะกอน การตกตะกอนแบบอัดตัวอาจถือได้ว่า เกิดขึ้นหลังจากที่การตกตะกอนแบบอื่นๆ ได้เกิดขึ้นแล้ว การอัดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคต่างๆ วางซ้อนกัน ในลักษณะที่มีการถ่ายเทน้ำหนักให้กับอนุภาคที่อยู่ข้างล่าง

2.2.2 หน้าที่ของถังตกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (Activated Sludge) ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนของถังตกตะกอนเป็นส่วนสำคัญไม่ใช่เป็นเพียงแต่มีหน้าที่แยกของแข็งออกจากของเหลวเท่านั้น ถังตกตะกอนยังมีหน้าที่เป็นที่พักตะกอนสลัดจ์ชั่วคราว และยังมีหน้าที่ควบคุมอัตราการทิ้งและหมุนเวียนตะกอนกลับสู่ถังปฏิบัติการอีกด้วย ถังตกตะกอนจัดว่าเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำทิ้ง ซึ่งจะบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้โดยตรง

2.3 สลัดจ์ (มันลิน ตันจูลเวศม์, 2542)

2.3.1 ประเภทของสลัดจ์

ประเภทของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียมีดังนี้

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

2.3.1.1 สลัดจ์ดิบ

สลัดจ์ดิบ หมายถึงสลัดจ์ขั้นแรก และสลัดจ์ขั้นสองที่ยังไม่คงตัว (สามารถเน่าเหม็นได้ง่าย) ไม่ควรนำสลัดจ์ไปตากแห้งหรือบีบน้ำ เนื่องจากมักมีกลิ่นเหม็น ในระหว่างดำเนินการควรย่อยสลัดจ์ดิบให้กลายเป็นสลัดจ์คงตัวที่ย่อยแล้ว (Digested Sludge) ก่อนนำไปตากหรือบีบน้ำ สลัดจ์ดิบจำแนกเป็น 2 ประเภทคือ

- 1) สลัดจ์ชีวภาพหมายถึง สลัดจ์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบต่างๆ ส่วนประกอบหลักของสลัดจ์ชีวภาพจึงเป็นแบคทีเรียที่ถูกกำจัดทิ้ง รวมทั้งสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนเบื้องต้นของน้ำเสีย
- 2) สลัดจ์เคมีหมายถึงสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยวิธีเคมี ซึ่งอาจเป็นสลัดจ์ดังต่อไปนี้
 - สลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันของสารแขวนลอยต่างๆ รวมทั้งน้ำมันและไขมัน

- สลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการตกผลึก (Precipitation) ของโลหะหนักสลัดจ์เคมีอาจเป็น สลัดจ์อินทรีย์หรือสลัดจ์อนินทรีย์ก็ได้

2.3.1.2 สลัดจ์ขั้นแรก

สลัดจ์ขั้นแรกหมายถึง สลัดจ์ที่ระบายออกมาจากก้นถังตกตะกอนขั้นแรกสลัดจ์ ส่วนนี้จะเป็นตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสียที่มีน้ำหนักรวมมากจนสามารถตกตะกอนได้เองในก้นถัง ตกตะกอนขั้นแรก ถ้าใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนสลัดจ์ที่เกิดขึ้น ก็จะเรียกว่าสลัดจ์เคมี สลัดจ์ ขั้นแรกจึงมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์รวมกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย

2.3.1.3 สลัดจ์ขั้นที่สอง

สลัดจ์ขั้นที่สอง หมายถึง สลัดจ์อินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียทาง ชีวภาพแบบต่างๆ สลัดจ์ส่วนนี้จึงมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะ ทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์ขั้นแรกและขั้นที่สองจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอเอส

ตารางที่ 2.2 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอเอส

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

ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2542

2.3.1.4 สลัดจ์เคมี (chemical sludge)

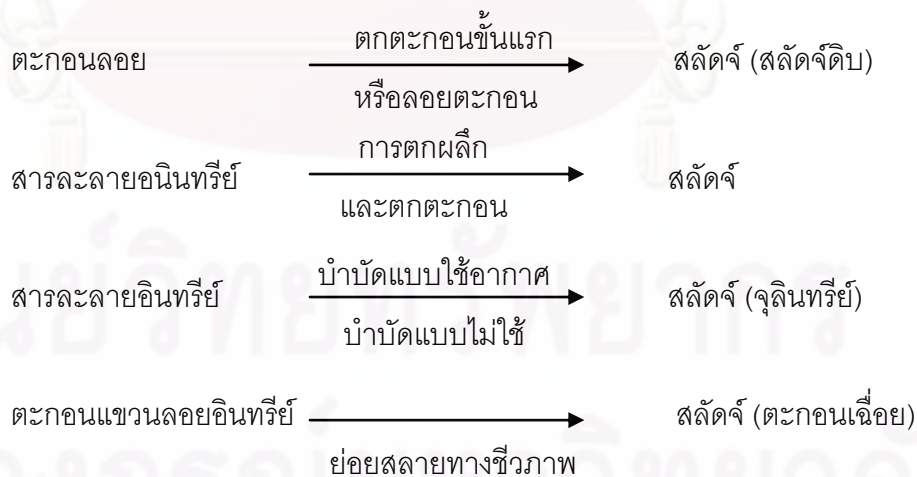
สลัดจ์เคมีเป็นสลัดจ์ส่วนเกินที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึก (precipitation) เป็นต้น ดังนั้นสลัดจ์เคมีย่อมประกอบด้วยสารประกอบระหว่างสารมลพิษที่ต้องการกำจัดกับสารเคมีที่เติมลงไป

2.3.1.5 สลัดจ์ย่อยแล้ว (digested sludge)

สลัดจ์ย่อยแล้วเป็นสลัดจ์ที่มีความคงตัว และไม่มี ปัญหาการเน่าเหม็นเมื่อนำไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้ายหรือนำไปใช้ประโยชน์ สลัดจ์ย่อยแล้วอาจเป็นสลัดจ์ขั้นต้นหรือสลัดจ์ขั้นสองที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรสลัดจ์แล้ว เช่น ถังย่อยสลัดจ์แเอโรบิก ถังย่อยสลัดจ์แอนแเอโรบิก เป็นต้น หรืออาจเป็นสลัดจ์ขั้นสองในบางกรณี เช่น ระบบเอเอสแบบเติมอากาศยัดเวลา เป็นต้น

2.3.2 แหล่งกำเนิดของสลัดจ์

ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำเสียเป็นแหล่งกำเนิดของสลัดจ์แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ตะกอนแขวนลอย และสารละลาย ตะกอนแขวนลอยที่ถูกตกตะกอนหรือลอยตะกอนจะกลายเป็นสลัดจ์โดยตรง ส่วนสารละลายนั้นเป็นแหล่งกำเนิดสลัดจ์ที่ซับซ้อนกว่าสลัดจ์โดยตรง ส่วนสารละลาย อนินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนของโลหหนัก จะกลายเป็นตะกอนแขวนลอย สารละลายอนินทรีย์บางส่วนจะกลายเป็นจุลินทรีย์ซึ่งกลายเป็นสลัดจ์ที่ต้องการบำบัด การเกิดสลัดจ์จากน้ำเสียโดยผ่านแหล่งกำเนิดต่างๆ ดังกล่าวแสดงได้ดังนี้



2.3.3 วิธีการบำบัดและกำจัดสลัดจ์

สลัดจ์ส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำจะต้องถูกบำบัดอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำสลัดจ์ไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้ายหรือนำสลัดจ์ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ต่อไป กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดสลัดจ์ขึ้นอยู่กับประเภทหรือลักษณะทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ แต่โดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดและกำจัดสลัดจ์

(หมายเหตุ - หน่วยกระบวนการที่เป็นเส้นประอาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสลัดจ์ เช่น ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 1 การทำชั้นสลัดจ์อาจจะไม่มีมีความจำเป็น ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความคงตัวแล้วก็ไม่จำเป็นต้องปรับเสถียรสลัดจ์อีก ถ้าแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยลานตากสลัดจ์ ก็ไม่จำเป็นต้องมีการปรับสภาพสลัดจ์ก่อน เป็นต้น)

2.3.3.1 การทำชั้นสลัดจ์ (sludge thickening)

การทำชั้นสลัดจ์เป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดสลัดจ์ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นสลัดจ์ ซึ่งทำให้มีปริมาตรรวมลดลงจนเหมาะสมสำหรับการบำบัดในขั้นตอนต่อไป เช่น การย่อยสลัดจ์ (sludge digestion) การแยกน้ำจากสลัดจ์ (sludge dewatering) เป็นต้น แต่ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความเข้มข้นสูงอยู่แล้ว สามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้ การทำชั้นสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ การทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickener) การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ (dissolved air flotation, DAF) และการหมุนเหวี่ยง (centrifugation)

2.3.3.2 การปรับเสถียรสลัดจ์ (sludge stabilization)

การปรับเสถียรสลัดจ์เป็นขั้นตอนที่ทำให้สลัดจ์มีความคงตัว ซึ่งเป็นการลดเชื้อโรค และการป้องกันการเน่าเหม็นของสลัดจ์ ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความคงตัวอยู่แล้วก็สามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้

การปรับเสถียรสลัดจ์ทำได้หลายวิธี ครอบคลุมทั้งกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยแบบแอนแอโรบิก (anaerobic sludge digestion) การย่อยแบบแอโรบิก (aerobic sludge digestion) และการหมักทำปุ๋ย (composting) กระบวนการทางเคมี เช่น การปรับเสถียรด้วยปูนขาว และกระบวนการทางกายภาพ เช่น การปรับสภาพด้วยความร้อน

อย่างไรก็ตามวิธีที่มีงบประมาณในการควบคุมดำเนินระบบต่ำที่สุด ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพโดยเฉพาะถึงย่อยแบบแอนแอโรบิกเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด และได้ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.3.3.3 การแยกน้ำจากสลัดจ์ (sludge dewatering)

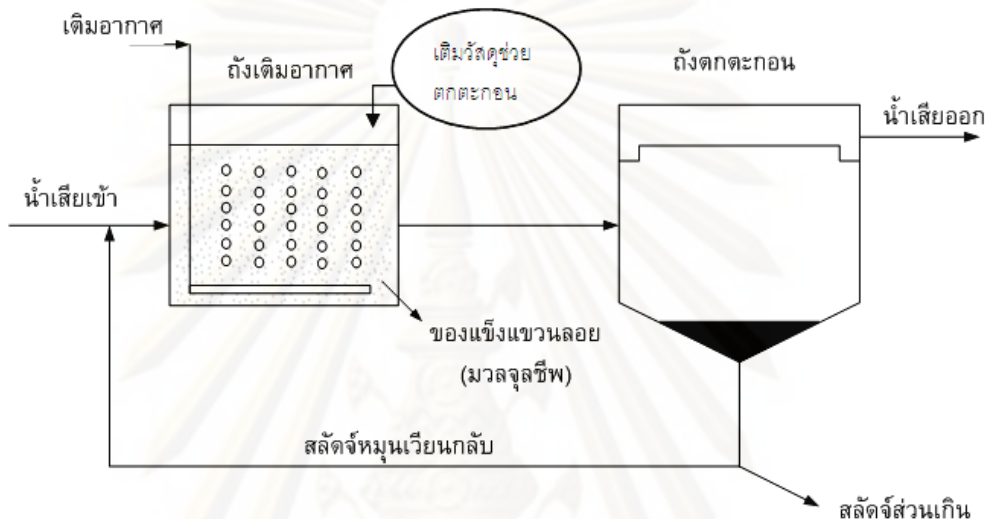
การแยกน้ำจากสลัดจ์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นและลดปริมาตรของสลัดจ์ก่อนนำไปกำจัดในขั้นสุดท้าย ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อความสะดวกในการขนย้ายและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เช่น การขนส่ง ลดขนาดของพื้นที่สำหรับฝังกลบ เป็นต้น การแยกน้ำจากสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ ลานตากสลัดจ์ (sludge drying bed) สายพานรีดน้ำ (belt press) เครื่องอัดกรอง (filter press) และเครื่องหมุนเหวี่ยง

2.3.3.4 การกำจัดสลัดจ์ (sludge disposal)

การกำจัดสลัดจ์ หรือ กากตะกอน เป็นการนำสลัดจ์ที่ผ่านการบำบัดในขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้นไปใช้ประโยชน์ เช่น ปรับสภาพดินสำหรับการเกษตร เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีกำจัดในหลายประเทศ (เยอรมัน ออสเตรเลีย อิตาลี ฯลฯ) หรือนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill)

2.4 **วัสดุบัลลัสต์ หรือ วัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent) (สถิตรัตน์ รอดอารีย์,2552)**

วัสดุบัลลัสต์ คือ วัสดุช่วยตกตะกอน ที่มีคุณสมบัติ ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ ทั้งกับจุลชีพ และน้ำเสียที่เติมลงในถังปฏิกริยาระบบเอเอส (Activated Sludge) เพื่อทำให้เกิดเป็นเป้าสัมผัสให้ออนุภาคของ จุลชีพมาจับตัวกัน ซึ่งได้มีการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนนี้เพื่อการผลิตน้ำประปา และการบำบัดน้ำเสียในต่างประเทศมานานแล้ว เช่น โพลิเมอร์ และ ไมโครแซนด์



ภาพที่ 2.5 การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในระบบเอเอส (เอกลักษณ์ ไชยพันธุ์,2551)

การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนในระบบเอเอสจะเป็นการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้งใส่ลงในถังปฏิกริยาซึ่งวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน โดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีน้ำหนักจะเป็นเป้าสัมผัสให้จุลินทรีย์มายึดเกาะกันเพื่อเพิ่ม ปริมาณจุลินทรีย์และน้ำหนักให้กับมวลจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนัก โดยวัสดุช่วยตกตะกอนจะไปแทรกตัวระหว่างโครงสร้างของฟล็อก (Floc) ก่อนเข้าสู่ส่วนตกตะกอน ข้อดีของกระบวนการนี้นอกจากจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนแล้ว ยังสามารถเอาเป้าสัมผัสที่ใช้แล้ว กลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้อีก โดยวัสดุช่วยตกตะกอนควรเป็นสารที่หาได้งานตามท้องตลาด และมีราคาถูก เช่น

1. ผงทาล (Talc) เป็นแร่ที่มีความกระด้างต่ำ ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆกับน้ำเสีย และเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ดี อีกทั้งยังสามารถ ช่วยในการก่อตัวของฟล็อกให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ทาล (Talc) เป็นสารที่ได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนโดยผลจากการใช้ทาลเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนในแง่ของความเร็วในการตกตะกอนและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆกับน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ดี

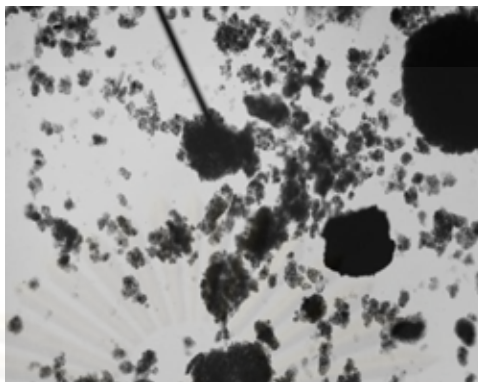
ลักษณะการจับตัวของสลัดจ์มีแบบเดียวคือเป็นแบบห่อหุ้ม โดยการจับตัวแบบห่อหุ้มกับทาลขนาดเล็กที่สุดทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่ามากที่สุดและค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนแนวโน้มลดลงเมื่อทาลมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.6 ฟล็อกจุลชีพของทาลขนาด 2 ไมโครเมตรกำลังขยาย 10 เท่า ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ (สถิตร์รัตน์ รอดอารีย์, 2552)

2. ยางรถยนต์เก่าบดละเอียด เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ดีในระบบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถเป็นเป่าสัมผัสให้จุลินทรีย์มาเกาะได้อีกด้วย

ลักษณะการจับตัวของสลัดจ์มี 2 แบบ คือ ยางบดละเอียดขนาดเล็ก (110, 242, 656 ไมโครเมตร) มีลักษณะการจับตัวแบบแบบฉาบผิวหรือเคลือบผิว ยางบดละเอียดขนาดใหญ่ (848 ไมโครเมตร) มีลักษณะการจับตัวแบบเกาะติดกับผิว โดยแนวโน้มของค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.7 ฟล็อกจุลชีพของยางขนาด 848 ไมโครเมตรกำลังขยาย 10 เท่า
ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ (สถิตรัตน์ รอดอารีย์,2552)

3. ถ่านกัมมันต์ชนิดผงหรือ Powder Activated Carbon (PAC) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นตัวดูดซับที่ดี เพื่ออัตราการเติบโตของจุลินทรีย์และอาจจัดเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนทำให้การก่อตัวของฟล็อกดีขึ้นอีกด้วย ลักษณะการจับตัวของสลัดจ์มี 2 แบบ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาดเล็ก (5, 10, 24 ไมโครเมตร) มีลักษณะการจับตัวแบบห่อหุ้ม ซึ่งถ่านกัมมันต์ขนาด 5 ไมโครเมตร เป็นขนาดเล็กที่สุดสามารถเกิดการห่อหุ้มกับสลัดจ์ได้ดี เกิดฟล็อกขนาดใหญ่ทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าค่อนข้างมาก มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่คือ 10 และ 24 ไมโครเมตร แต่น้อยกว่า ถ่านกัมมันต์ขนาดใหญ่ (99 ไมโครเมตร) มีลักษณะการจับตัวแบบเกาะติดผิวเนื่องด้วยขนาดใหญ่มีน้ำหนักที่มากทำให้มีค่าความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนสูงกว่าขนาดอื่นๆ



ภาพที่ 2.8 ฟล็อกจุลชีพของถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 99 ไมโครเมตร กำลังขยาย 10 เท่า
ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ (สถิตรัตน์ รอดอารีย์,2552)

วัสดุช่วยตกตะกอนที่ดี ต้องมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ แต่ต้องไม่น้ำหนักมากจนเกินไปและมีขนาดเฉลี่ยที่ไม่ใหญ่จนไม่สามารถรวมผสมกับน้ำได้ มีลักษณะเนื้อของวัสดุที่อ่อน ไม่แข็งจนเกิดการขัดสีกับท่อ เครื่องสูบน้ำ และอุปกรณ์ต่างๆ โดยหลังจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของสลัดจ์แล้วจะต้องนำวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้แล้วทั้งหมดที่ได้นำไปกำจัดต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำบัด ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้ จึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้แล้ว มาเป็นตัวกลางดูดซับมลสาร เพื่อเป็นการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด

โดยในการเติมวัสดุบัลลัตในงานวิจัยนี้ จะไม่ทำการเติมเหมือนการสร้างตะกอนแบบบัลลัต ซึ่งต้องใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันและ ฟล็อกคูเลชัน แต่จะใช้ การเติมเข้าไปในถังปฏิกริยา เพื่อให้เกิดการรวมผสมและเร่งการเกิดก้อนฟล็อกจุลชีพที่มีน้ำหนักให้สามารถสามารถตกตะกอน ได้ดีขึ้น

2.5 กระบวนการดูดซับ

การเกาะหรือการดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะ จับและติดบนผิว ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวกลางดูดซับ (adsorbent) การเกิดกระบวนการดูดซับเรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption process) การเกิดกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของ ของแข็ง- ของแข็ง ก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของเหลว หรือของเหลว-ของแข็ง ก็ได้ การดูดซับด้วยของแข็ง เช่นถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็งนั้น การดูดซับมี 2 กระบวนการ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ทั้ง 2 กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้ามาจับกับผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) เกิดจากผลต่างของพลังงานและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกับโมเลกุลของ ตัวกลางดูดซับ การดูดซับชนิดนี้เป็นแบบหลายชั้น (multilayered) คือแต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลที่เกิดก่อนหน้า โดยที่จำนวนชั้นที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนในของเหลว

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อปฏิกริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและ ตัวกลางดูดซับ ทำให้เกิดสารประกอบเคมีขึ้นกระบวนการนี้จะเป็นแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ เพราะว่าพลังงานจะถูกใช้ไปในการสร้างสารประกอบ

ทางเคมีขึ้นที่พื้นผิวที่ถูกเกาะจับ การผันกลับ (reversibility) ของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ ตัวกลางดูดซับ และโมเลกุลที่ถูกดูดซับถ้าหากแรงดึงดูดน้อยจะทำให้เกิดการหลุดออกไปของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (desorption)

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะเข้าถึง ตัวกลางดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ มีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวกลางดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างภายในตัวกลางดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดติดที่ผิวของตัวกลางดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.5.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

อัตราเร็วในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ชนิดผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ส่วนพื้นที่ผิวมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ พื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย ขนาดของถ่านกัมมันต์มีผลต่อพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากโพรงภายในมากกว่าพื้นที่ภายนอก

2.5.1.2 ความสามารถในการละลายและขนาดของสารถูกดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์

2.5.1.3 อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการ



$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A &= \text{สารที่ถูกดูดซับ} \\ S &= \text{พื้นที่ผิว} \end{aligned}$$

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

2.5.1.4 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งรอบ ตัวกลางดูดซับ จะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของ ตัวกลางดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกก็เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ

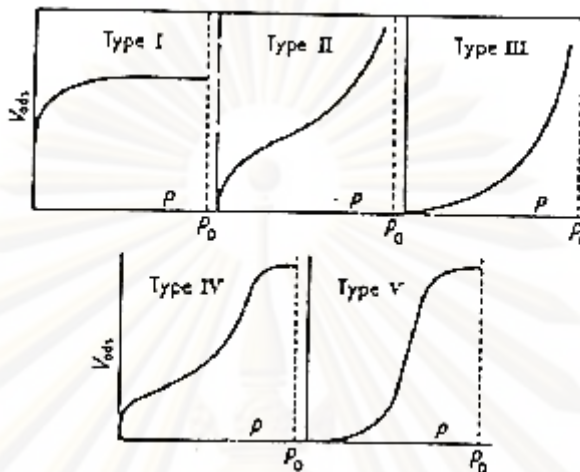
2.5.1.5 พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างแข็งแรง การดูดซับ สารอินทรีย์ หรือ ไอออนอื่น ๆ จึงมีผลกระทบเนื่องจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆ ด้วย

2.5.2 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) จะเกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของระบบทั้งหมดจะไม่สามารถสังเกตเห็นการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ หรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็น ตัวกลางดูดซับ สารที่ถูกดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของ ตัวกลางดูดซับ ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์ม การดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9 รูปร่างของ ไอโซเทอร์ม การดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับ



ภาพที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน 5 แบบ (Faust และ Aly, 1987)

ไอโซเทอร์ม แบบที่ 1 เป็นการดูดซับซึ่งมีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนผิวของ ตัวกลางดูดซับ แบบที่เหลือเป็นการดูดซับโดยมีโมเลกุลหลายชั้นบนตัวกลางดูดซับ

ไอโซเทอร์ม การดูดซับมีหลายรูปแบบ เป็นผลมาจากการพัฒนาความรู้และการสังเกต แต่โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดซับ มักจะกล่าวอ้างถึง ไอโซเทอร์ม 3 แบบ ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์

(Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลอง ไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบแลงมัวร์คือโมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของ ตัวกลางดูดซับ มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่สารถูกดูดซับ พื้นที่ของบริเวณ ตัวกลางดูดซับ มีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว และพลังการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)

2.5.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเบท

(BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบเบท พัฒนามาจากสมการ ไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบแลงมัวร์ที่คิดจากการดูดซับแบบ ชั้นเดียว (monolayer) ให้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

(multilayer) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดติด เช่นเดียวกับชั้นอื่นๆ ต่อไป

2.5.2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

(Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)

2.6 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งแต่ถูกผลิตขึ้นมาโดยการกระตุ้น (Activated) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก สำหรับดูดซับได้จำนวนมาก ซึ่งจะเกี่ยวพันโดยตรงกับขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่มีอยู่

2.6.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.6.1.1 รูพรุน (pores) (ธวัชชัย สิงหศิริ, 2548)

ผิวของถ่านกัมมันต์ มีลักษณะรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด คือ ขนาดเล็ก (micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความสามารถในการ

ดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ ถ้าผิวของถ่านบริเวณนั้นเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (Basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจาก แรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจาก โฟอิเล็กตรอน แรงแยัดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้ แต่มีโอกาสที่จะหลุดออก แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิดคือ พวกออกไซด์ของกรด และพวกออกไซด์ของด่าง

2.6.1.2 พื้นที่ผิว (Surface Area)

โดยปกติถ่านกัมมันต์ทั่วไปมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 450-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจริงที่ใช้ในการดูดซับขึ้นอยู่กับสารถูกดูดซับ

2.6.3 โครงสร้างทางเคมี (ธวัชชัย สิงหศิริ, 2548)

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปของก๊าซ อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเฮลิซึม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาจากแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

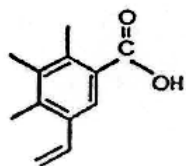
ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกกราไฟท์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟท์เล็กน้อยในระหว่างกระบวนการ คาร์บอนไนเซชัน ซึ่งโครงสร้างนี้เป็นไมโครคริสตัลไลต์ (Microcrystallites) ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งจะวางตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงแยัดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิเล็กตรอนสร้างพันธะเดี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกตัวหนึ่งเป็นโฟอิเล็กตรอน ที่ใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัว คือ พันธะคู่ (double bond) ดังภาพที่ 2.10



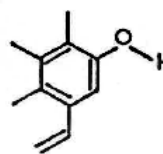
ภาพที่ 2.10 ลักษณะการแบ่งชั้นของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

หมู่ฟังก์ชันัลที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ Carboxylic groups, Phenolic hydroxyl groups, Quinone type carbonyl groups, Normal lactone groups, Fluorescein type groups, Carboxylic acid anhydride groups และ Cyclic peroxide groups ดังแสดงในภาพที่ 2.11

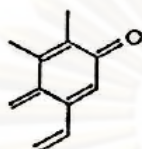
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมถึงกลิ่น รส และสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ปกติมีค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ รวมถึง ลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นด่างจะส่งผลต่อการดูดซับสีของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิมิตัว กล่าวคือความสามารถในการดูดซับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านและชนิดของสารที่จะถูกดูดซับร่วมกัน ลักษณะโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ แสดงดังภาพขยายภาพตัดตามขวาง ภาพที่ 2.12



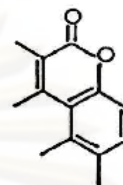
(a) Carboxylic Group



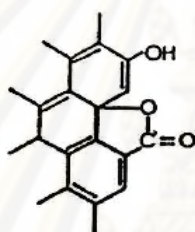
(b) Phenolic Hydroxyl Group



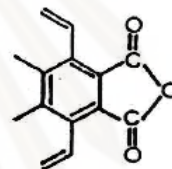
(c) Quinone Type Carbonyl Group



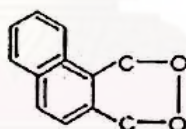
(d) Normal Lactone Group



(e) Fluorescein Type Lactone Group



(f) Carboxyl Acid Anhydride Group

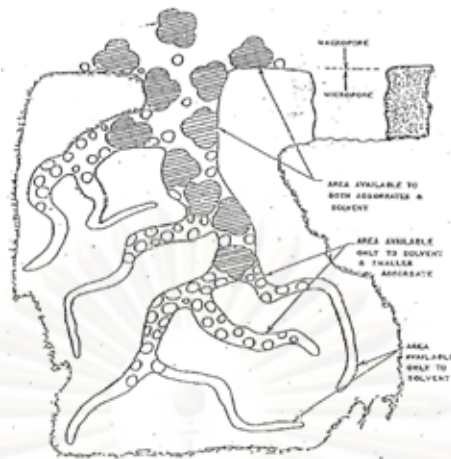


(g) Cyclic Peroxide Group

ภาพที่ 2.11 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.12 ภาพตัดขวางถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

โมเลกุลของสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่บนนอกของถ่านกัมมันต์แล้วฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนขนาดใหญ่ จากนั้นจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก หากโมเลกุลของสารละลายนั้นไม่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนขนาดเล็ก อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไป ในรูพรุนของถ่าน โดยอัตราการดูดซับนี้จะแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จะบำบัด (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.6.1.4 เถ้า (ashes)

ถ่านกัมมันต์จะมีเถ้าเป็นส่วนประกอ อดด้วย โดยทั่วไปมีอยู่ประมาณร้อยละ 1 ถึง 12 องค์ประกอบหลักของเถ้าคือ ซิลิกา อลูมินา เหล็ก โลหะอัลคาไลด์ และ อัลคาไลด์เอิร์ท หน้าที่ของเถ้า ได้แก่ การเพิ่มค่า ไฮโดรฟิลิกซิตี (hydrophilicity) ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับการบำบัดน้ำเสีย และผลทาง ด้านการเร่งของโลหะอัลคาไลด์และโลหะบางตัว เช่นเหล็ก ระหว่างขั้นตอนการดูดซับหรือการคืนสภาพ (reactivation) ซึ่งจะปรับการกระจายขนาดของรูให้กว้างขึ้น เถ้าที่ละลายในกรดได้สามารถกำจัดออกโดยการล้างในกรดอ่อน

2.6.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

แบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม (2532) ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิดคือ

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

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

ข้อดีของถ่านกัมมันต์แบบผงก็คือมีราคาถูกกว่าแบบเกล็ด ใช้งานและสะดวก การดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียก็คือ ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพ ซึ่งไม่ค่อยประหยัดและไม่คุ้มค่านัก

โดยงานวิจัยครั้งนี้จะใช้ ถ่านกัมมันต์ชนิด ผงเพื่อใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน เพื่อนำเอาวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้อยู่แล้วศึกษาการดูดซับลิกนิน

2.6.3 การประเมินและการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ

สมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดการใช้งานได้แก่

- 1) พื้นที่ผิว (Surface Area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมาก จะมีความสามารถในการดูดซับมาก
- 2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน
- 3) ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน
- 4) ขนาดใช้งาน (Effective Size) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity Coefficient) เป็นตัวกำหนดภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic Condition) ของถังดูดซับ (Adsorption Column)
- 5) ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) เป็นตัวกำหนดการดูดซับโมเลกุลของน้ำเสีย
- 6) แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion Number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี
- 7) ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน
- 8) ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต
- 9) ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 10) โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- 11) ฟีนอลนัมเบอร์ (Phenol number) ใช้กำหนดความจุของการดูดซับ

- 12) ขนาดของรูพรุน (Pore Size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.7 การผลิตเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อกระดาษเป็นการนำไม้มาย่อยสลาย แล้วแยกส่วนที่เป็นเส้นใยออกเพื่อผลิตเป็นกระดาษชนิดต่างๆ โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตมักมีส่วนผสมดังนี้

1. โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ได้แก่สารประกอบโพลีเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต ได้แก่แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส ซึ่งมีอยู่ประมาณ ร้อยละ 60-80 โดยน้ำหนักวัตถุดิบ ซึ่งแป้งและน้ำตาลจะถูกละลายออกมาได้ในระหว่างกระบวนการย่อยเยื่อ สำหรับส่วนที่เป็นเซลลูโลสนั้นอาจถูกละลายออกมาได้บ้างในกระบวนการผลิต

2. ลิกนิน (Lignin) และ แทนนิน (Tannin) มีอยู่ประมาณ ร้อยละ 20 ถึง 40 จะละลายออกมาจากเส้นใยในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย เช่น ละลายในสารละลายกรดซึ่งเป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบ ซัลไฟท์หรือละลายในด่างร้อนในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟตหรือกระบวนการคราฟท์

3. สารประกอบอื่นๆ (Extraneous component) ในส่วนนี้มีอยู่ประมาณร้อยละ 2 ถึง 10 ได้แก่ สารประกอบที่ละลายในน้ำเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ และสารอินทรีย์ เป็นต้น

2.7.1 กระบวนการผลิตกระดาษ

ในการทำเยื่อกระดาษมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กระบวนการทั่วไปแยกออกเป็น 3 วิธีด้วยกันคือ

- กระบวนการผลิตกระดาษเชิงกล (Mechanical Pulping)
- กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulping)
- กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบเคมี (Chemical Pulping)

ซึ่งการจะเลือกกระบวนการแบบใดขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ทำ และลักษณะสมบัติของเยื่อกระดาษที่ต้องการ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับราคาของวัตถุดิบด้วย การทำเยื่อกระดาษของแต่ละกระบวนการมีดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเชิงกล (Mechanical Pulping)

เยื่อกระดาษแบบนี้มีชื่อเรียกว่า กราว์วูด (groundwood) ได้จากการบดเนื้อไม้ด้วยเครื่องบด เฉพาะ โดยอาศัยน้ำฉีดอยู่ขณะที่บดตลอดเวลา เพื่อกระจายเส้นใยในเนื้อไม้ออกจากกัน เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะเป็นไม้แท้อยู่มากแต่มีคุณสมบัติไม่ดี เพราะไม่ใช่เยื่อเซลลูโลสบริสุทธิ์ การบดแบบนี้จะทำให้ได้เยื่อกระดาษมากที่สุดคือร้อยละ 85 ขึ้นไป เยื่อกระดาษชนิดนี้ทำได้ถูกกว่าเยื่อกระดาษชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะสำหรับในประเทศที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในราคาถูก โดยทั่วไปเยื่อกระดาษแบบนี้มักใช้ผสมกับ เยื่อกระดาษเคมีที่มีความเหนียวดี เยื่อกระดาษนี้มีความทึบแสงสูงใช้ได้สำหรับกรณีที่ไม่ต้องการความเหนียว ความขาว สะอาดมากนัก ส่วนใหญ่ใช้สำหรับผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษอนามัยบางชนิด กระดาษกันสำหรับบรรจุสิ่งของกันแตกภายในกล่อง กระดาษฝาผนัง กระดาษเช็ดมือ และกระดาษห่อของอย่างคุณภาพต่ำ

2.7.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulping)

เยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมีทำได้โดยใช้กระบวนการเคมีและการบดเหมือนการทำเยื่อกระดาษบด แต่ใช้ปริมาณสารเคมีมากกว่าและใช้พลังงานในการบดเยื่อกระดาษน้อยกว่า เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีลิกนินและแทนนินปนอยู่แต่ไม่มากเท่าวิธีบด เคมีภัณฑ์ที่ใช้ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียเยื่อกระดาษมากนัก ในปัจจุบันกระบวนการแบบนี้ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถใช้ได้กับเนื้อไม้หลายชนิดโดยเฉพาะไม้เนื้อแข็ง ค่าใช้จ่ายไม่แพง ได้เยื่อกระดาษมากและสามารถใช้เยื่อกระดาษนี้สำหรับผลิตกระดาษได้หลายชนิด ตั้งแต่กระดาษหนังสือพิมพ์ไปจนถึงกระดาษปอนด์อย่างดี การผลิตเยื่อกระดาษแบบนี้มีหลายวิธีแล้วแต่การใช้เคมีภัณฑ์ซึ่งได้แก่

กระบวนการกราว์วูดเคมี (Chemi-groundwood process) ใช้สำหรับไม้ใบกว้างโดยต้มท่อนไม้ด้วยน้ำยาซัลไฟต์ภายใต้ความดัน แล้วจึงบดไม้ด้วยเครื่องบดเยื่อ

กระบวนการโซดาไฟ (Cold caustic soda) ต้มไม้ที่ตัดเป็นท่อนเล็กๆ ด้วยน้ำยาโซดาไฟแล้วแยกเยื่อกระดาษออกโดยใช้เครื่องย่อย วิธีนี้ถูกกว่าการบดเยื่อกระดาษโดยตรงเพราะเยื่อกระดาษที่ต้มแล้วบดง่ายกว่า

กระบวนการโซเดียมซัลไฟต์ (Neutral sulphite semichemical process) วิธีนี้ใช้น้ำยาโซเดียมซัลไฟต์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นน้ำยาต้ม

กระบวนการซัลเฟต (Sulphate semichemical process หรือ kraft semichemical process) น้ำยาต้มเยื่อกระดาษ สำหรับวิธีนี้ใช้น้ำยาผสมของโซเดียมซัลไฟต์และโซดาไฟ กระบวนการนี้อาจนำไปใช้ดัดแปลงสำหรับโรงงานที่ทำเยื่อกระดาษเหนียวได้

2.7.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบเคมี (Chemical Pulping)

การทำเยื่อกระดาษโดยกระบวนการทางเคมีทำโดยการต้มย่อยไม้หรือเส้นใยต่างๆ ด้วยเคมีภัณฑ์ภายใต้ความดันจนกระทั่งแยกเยื่อออกจากสิ่งอื่นได้ง่ายเมื่อนำไปล้าง ซึ่งจะให้เยื่อกระดาษที่มีปริมาณลิกนินเจือปนอยู่น้อยมากจึงเหมาะสำหรับทำ กระดาษคุณภาพดีและมีความเหนียว แต่ปริมาณเยื่อที่ได้จากการทำเยื่อกระดาษแบบเคมีจะมีปริมาณน้อย คือ ประมาณร้อยละ 45 ถึง 60 การผลิตเยื่อกระดาษแบบนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ตามการใช้เคมีภัณฑ์ดังนี้

1. กระบวนการโซดา (Soda Process) ซึ่งใช้โซดาไฟหรือโซดาเผา (Sodium Hydroxide) เป็นสารเคมีในการต้มเยื่อกระดาษภายใต้ความดัน แล้วจึงล้างและฟอกเยื่อกระดาษต่อไป เยื่อกระดาษแบบนี้ส่วนมากใช้สำหรับทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่ม

2. กระบวนการซัลเฟต (Sulphate Process) หรือ กระบวนการคราฟท์ (Kraft process) เป็นกระบวนการที่ใช้ได้กับพันธุ์ไม้ทุกชนิด สารเคมีที่ใช้ในการต้มไม้หรือวัตถุดิบอื่นๆ คือโซดาไฟและไฮเดียมซัลไฟท์อย่างละเท่าๆ กัน เยื่อกระดาษที่ได้จะมีความเหนียวมาก เยื่อกระดาษซัลเฟตชนิดไม่ฟอกสีใช้ทำถุงกระดาษ กระดาษห่อของและกระดาษฉีกกล่อง ส่วนเยื่อกระดาษซัลเฟตชนิดฟอกขาวใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือคุณภาพดี และกระดาษอนามัย

3. กระบวนการซัลไฟท์ (Sulphite Process) กระบวนการนี้เหมาะสำหรับทำเยื่อกระดาษจากพันธุ์ไม้เนื้อแข็งและไม้จำพวกหญ้า สารเคมีที่ใช้คือ สารละลายไบซัลไฟท์ของแคลเซียมแมกนีเซียม หรือแอมโมเนีย ใช้ได้กว้างขวางสำหรับการทำเยื่อกระดาษที่เหนียวมากจนถึงเยื่อกระดาษที่นุ่ม กระบวนการนี้ไม่เหมาะสำหรับไม้ที่มีเรซิน หรือยางในปริมาณมาก

เมื่อได้เยื่อกระดาษแล้ว ขั้นตอนต่อไปมีลำดับดังนี้

1. การล้างเยื่อกระดาษให้สะอาด (Washing) และร่อนเอาเยื่อกระดาษหยาบออก (Screening) เยื่อกระดาษที่ได้จากกรรมวิธีต่างๆ ที่กล่าวมา ต้องนำเข้าสู่เครื่องล้างเยื่อกระดาษเพื่อล้างน้ำยาเคมีออกให้หมด จะได้เยื่อกระดาษทั้งหยาบและละเอียดและมีสิ่งสกปรกปนอยู่ ฉะนั้นต้องนำเข้าสู่เครื่องร่อนเพื่อร่อนเอาเยื่อกระดาษหยาบไปผ่านกรรมวิธีทำเยื่อกระดาษอีกครั้งหนึ่ง เยื่อกระดาษละเอียดต้องแยกสิ่งสกปรกออกให้หมด เพราะจะทำให้กระดาษมีตำหนิและคุณภาพไม่ดี

2. ฟอกสีเยื่อกระดาษ (Bleaching) เยื่อกระดาษที่สะอาดและละเอียดจะนำไปฟอกให้ขาวด้วยน้ำยาคลอรีน เพื่อให้ได้กระดาษที่มีความมันวาวสูง ดังนั้นในการฟอกสีต้องควบคุมความเป็นกรดต่างความเข้มข้นของเยื่อกระดาษ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอก และเวลา

3. ผสมกับเยื่อกระดาษชนิดอื่นๆ (Mixing) ในกรณีที่เกิดกระดาษจากชานอ้อย เนื่องจากเยื่อของชานอ้อยเป็นเยื่อเส้นใยสั้นและใยปานกลางจึงมีความแข็งแรงทนทานต่ำ จึงต้องผสมเข้ากับเยื่อที่มีเส้นใยยาว

4. ตีหรือบดเยื่อกระดาษ (Beating) ในเครื่องตีเยื่อมีแผ่นเหล็กใบมีด เพื่อตีเยื่อให้ ผสมกัน และทำให้เส้นใยของตัวมีลักษณะอ่อนตัวลงไม่กระด้าง เมื่อนำไปผลิตกระดาษจะได้กระดาษที่มีความเหนียวและทนทาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของเยื่อกระดาษ จึงเป็นประโยชน์ในการย้อมสี ทำให้สีเกาะได้มากขึ้น

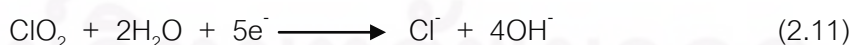
5. เติมสารอื่นๆ (Paper additive) การเติมสารอื่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเยื่อกระดาษให้เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นกระดาษ สารที่เติมลงไปได้แก่ ชันสน เพื่อทำให้กระดาษที่ผลิตออกมาไม่ดูดน้ำมากเกินไป เติมสารส้มเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซึมและทำให้เยื่อกระดาษขาวขึ้น และเติมแป้งมันสำปะหลัง เพื่อช่วยยึดเส้นใยให้ประสานกัน ทำให้กระดาษ ทนต่อการลบไม่ยุ่ยง่าย และช่วยทำให้เส้นใยสั้นๆ มาผสมผสานกันมากขึ้น

6. เข้าเครื่องเดินแผ่น (Paper machine) เมื่อเยื่อกระดาษผ่านกระบวนการต่างๆ จนสามารถนำไปทำเป็นแผ่น กระดาษได้จึงส่งไปส่วนเดินแผ่น ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนตะแกรง (Wire section) ส่วนที่ทำหน้าที่บีบอัด (Press section) และส่วนที่ทำให้แห้ง (Dryer section)

2.7.2 เคมีวิทยาของกระบวนการฟอกเยื่อ

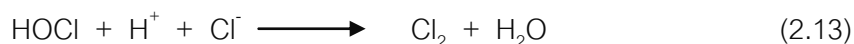
เคมีวิทยาของคลอรีนไดออกไซด์

คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารเรดิคัลและ เป็นสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรง ซึ่งสามารถปล่อย อิเล็กตรอนได้ 5 ประจุในกระบวนการรีดักชันเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ดังแสดงในสมการ 2.11 ในขณะที่ก๊าซคลอรีนปล่อยอิเล็กตรอนเพียง 2 ประจุในปฏิกิริยารีดักชันเป็นคลอไรด์ไอออน ดังสมการ 2.15



สมการรีดอกซ์ 2. 11 และ 2. 12 แสดงให้เห็นว่า 1 โมลของ ClO_2 มีออกซิเดทิฟพาวเวอร์สูงกว่า Cl_2 2.5 เท่า ซึ่งเป็นที่เข้าใจผิดกันมาก เพราะ ClO_2 ไม่ได้เปลี่ยนไปเป็น Cl^- ทั้งหมดเมื่อมันทำปฏิกิริยากับลิกนินและแทนนิน เมื่อ ClO_2 ออกซิไดซ์ลิกนิน มันจะถูกรีดิวซ์เป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดคลอรัส (HClO_2) กรดไฮโปคลอรัสสามารถออกซิไดซ์ลิกนินและถูกรีดิวซ์เป็น Cl^- ตามสมการ 2.13 กรดคลอรัสไม่ทำปฏิกิริยากับลิกนินและแทนนิน แต่ทำปฏิกิริยากับ HOCl ได้เป็น ClO_2 ตามสมการ 2.14 และยังสามารถแตกตัวออกเป็นคลอไรท์ ซึ่งสามารถทำ

ปฏิกิริยากับ HOCl ได้เป็น คลอเรต (ClO_3^-) ตามสมการ 2.15 การเกิดคลอเรตเป็นรูปแบบสุดท้ายของ ClO_2 เพราะว่ามันไม่ทำปฏิกิริยาทั้งกับลิกนิน และออกไซด์ของคลอรีนตัวอื่นๆ



นอกจากแสดงให้เห็นว่า ClO_2 ไม่ได้ถูกรีดิวซ์เป็น Cl^- ทั้งหมดแล้ว สมการ 2.11 ถึง 2.15 ยังแสดงให้เห็นว่าจะมีส่วนผสมของ ClO_2 , HClO_3 , ClO_3^- , HClO_2 , ClO_2^- , HOCl , Cl_2 , Cl^- เมื่อมี ClO_2 ความเข้มข้นของสารเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพีเอช โครงสร้างลิกนิน และแทนนิน ที่มีอยู่ และความเข้มข้นของคลอไรต์ไอออน

2.8 ลิกนิน (Lignin) และ แทนนิน (Tannin)

2.8.1 ลิกนิน (ไซคเคื่อ, 2549)

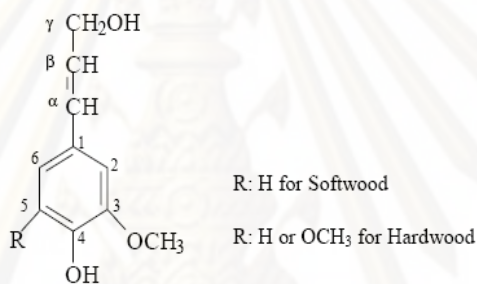
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนิน จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สาคัญในรา ตัวอย่างหน่วยที่ซ้ำ กันของลิกนินแสดง ดังภาพ แม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับ ชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมาก จะมีความแข็งแรงสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมาก จะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน

คำว่าลิกนินมาจากคำว่า Lignum ในภาษาลาติน ซึ่งหมายถึงไม้ โครงสร้างของลิกนินมีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติของโพลีเมอร์ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของฟีนิลโพรเพน แม้ว่า จะมีความพยายามศึกษาลิกนินมาเป็นระยะเวลาหลายปี แต่ก็ยังไม่เป็นที่เข้าใจนัก เพราะเราไม่สามารถแยกลิกนินออกมาได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน ในสภาวะปกติ ลิกนินเป็นโพลีเมอร์- อมอฟัส ที่ซับซ้อนที่มีอยู่ในโครงสร้างระดับเซลล์ของเนื้อไม้ และไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป การสกัดแยกลิกนินทำได้โดยแยกโพลีแซคคาไรด์ที่อยู่รอบๆ โดยกระบวนการไฮโดรไลซิส หรือทำให้พันธะแตกออกแล้วแยกส่วนของลิกนินออกมาในรูปของสารละลาย

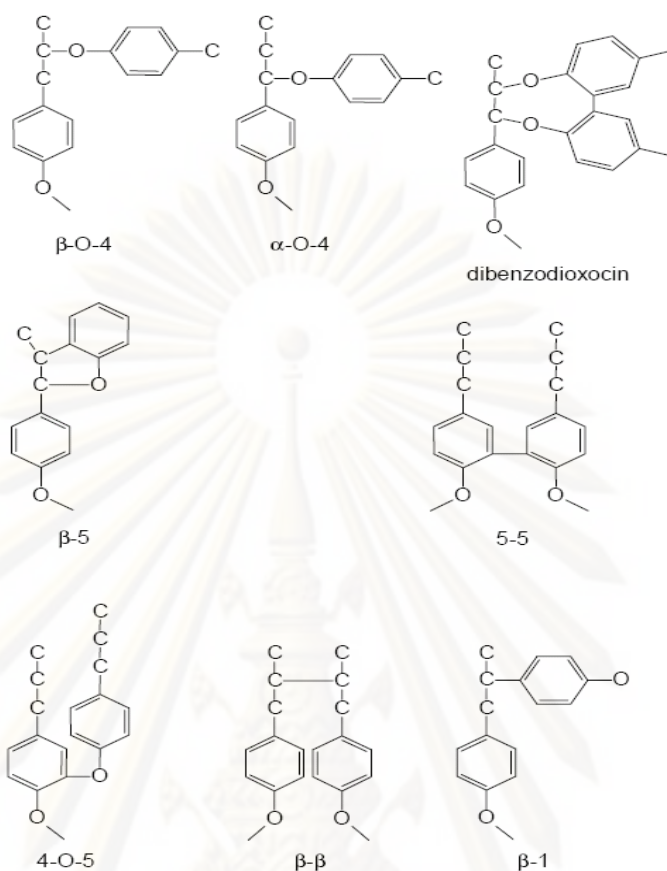
ลิกนินมีความสำคัญมากในโครงสร้างของต้นไม้ มีหน้าที่ในการช่วยยึดประสานเนื้อไม้ เข้าไว้ด้วยกัน และยังช่วยป้องกันน้ำไหลออกจากผนังเซลล์ ซึ่งทำให้เกิดการขนถ่ายน้ำและสารอาหาร นอกจากนั้นยังยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แม้ว่าลิกนินจะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับ

ต้นไม้ แต่ก็ไม่ใช่ที่ต้องการสำหรับกระบวนการทำกระดาษและจะถูกแยกออกไประหว่างกระบวนการฟอกเยื่อ

มีการศึกษาโครงสร้างของลิกนินเพื่อพื้ ผนวกระบวนการทำเยื่อและฟอกเยื่อ ซึ่งจากการย่อยสลายลิกนินและการใช้วิธีอัลตราไวโอเล็ตสเปคโตรสโคปีทำให้สรุปได้ว่าลิกนินประกอบด้วยหน่วยของเมทอกซีเลตฟีนิลโพรเพนที่สร้างพันธะกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงหน่วยย่อยของลิกนินและการเรียกชื่อของพันธะ การมี พันธะระหว่างหน่วยย่อยที่แตกต่างกันทำให้เกิดโครงสร้าง แมคโครโมเลกุลที่ซับซ้อน จากการศึกษาทำให้พบว่าหน่วยของฟีนิลโพรเพนนั่นต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ (C-O-C) หรือ พันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ภาพที่ 2.14 แสดงถึงพันธะต่างๆ ปริมาณของพันธะเหล่านี้ในไม้สนเป็นดังตารางที่ 2.3 ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำไปใช้สร้างโครงสร้างของ ลิกนินในไม้เนื้ออ่อน ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.13 หน่วยโมโนเมอร์ฟีนิลโพรเพน (Runge, 2005)

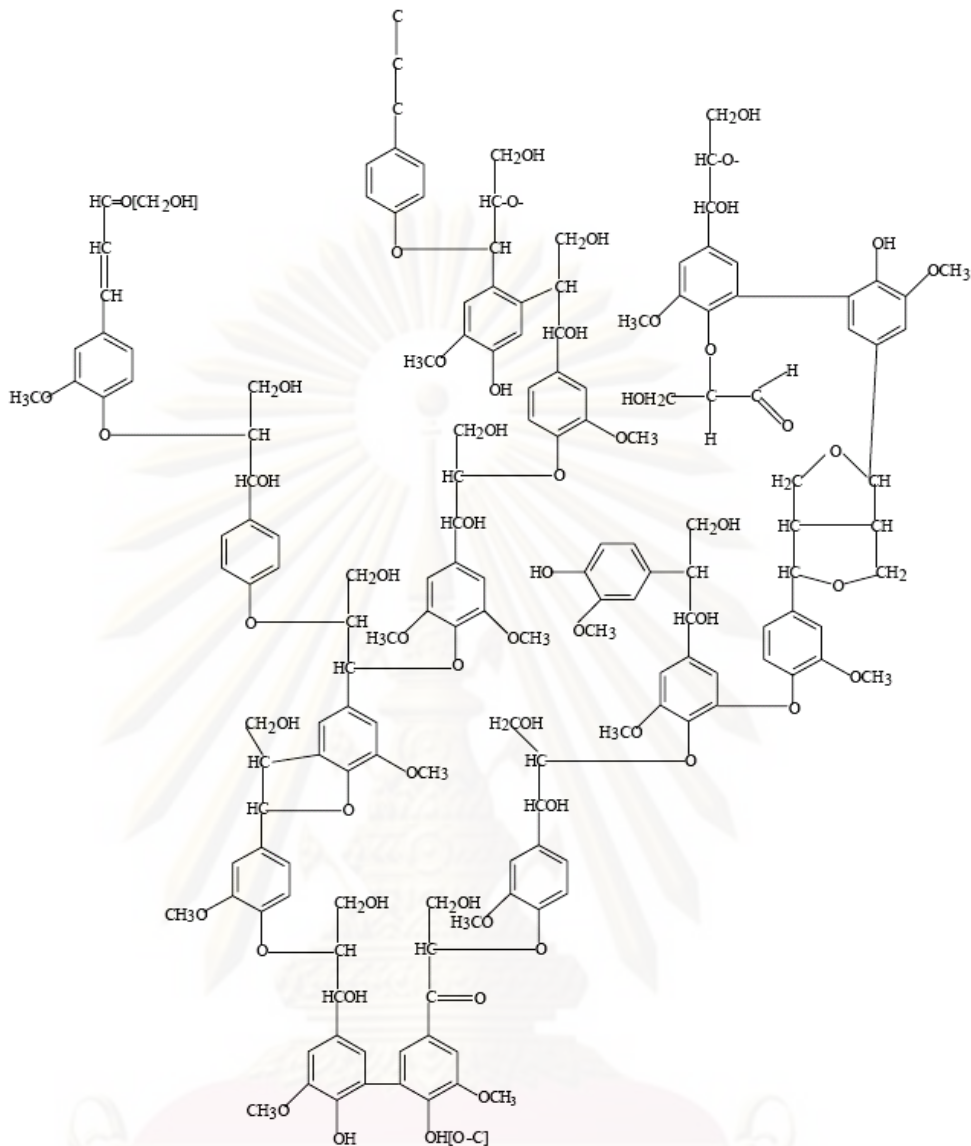


ภาพที่ 2.14 พันธะระหว่างหน่วยฟีนิลโพรเพน (Runge, 2005)

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของพันธะต่างๆ ในลิกนิน

Name	Bond Type	Percentage
β -O-4	Phenylpropane β -aryl ether	48
α -O-4	Phenylpropane α -aryl ether	6-8
β -O-4	Phenylcoumaran	9-12
5-5	Biphenyl	9-11
4-O-5	Diaryl ether	3-4
β - β	β - β -linked structures	2
β -1	1,2-Diarylpropane	7

ที่มา : Runge, 2005

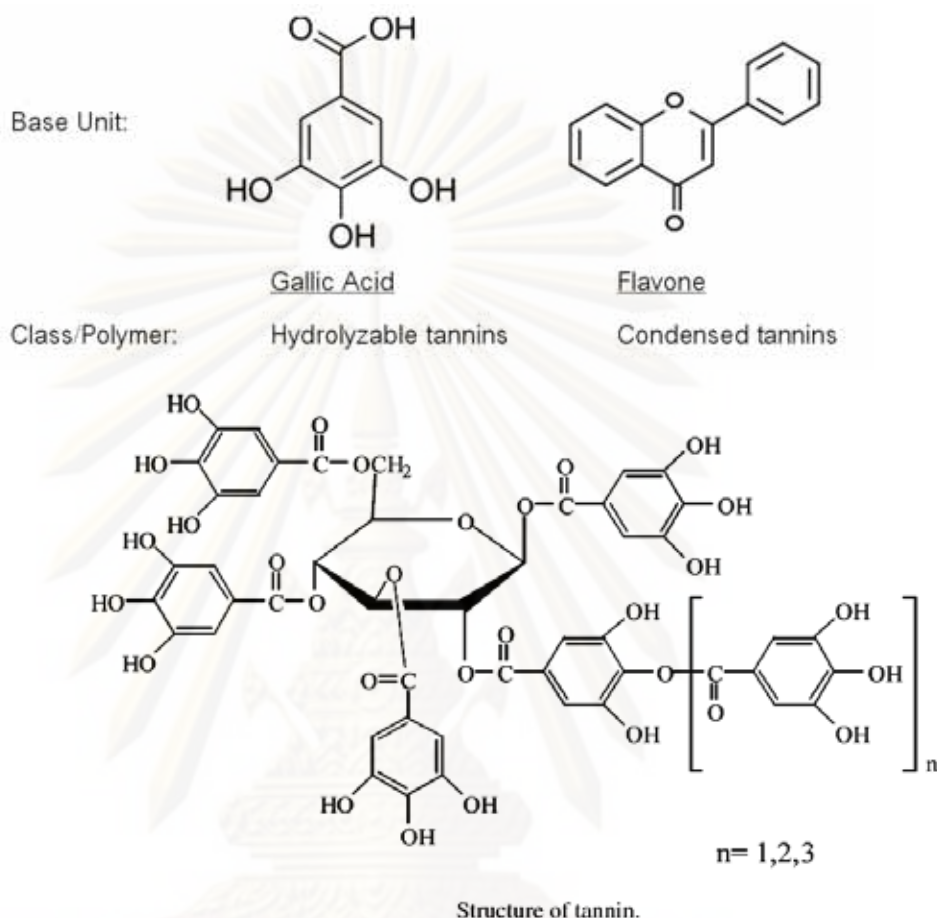


ภาพที่ 2.15 โครงสร้างโมเลกุลลิกนิน (Runge, 2005)

2.8.2 แทนนิน (วิกิพจนานุกรม, 2548)

แทนนิน(Tannin) เป็นสารที่ทำให้เกิดรสฝาด พบในพืชที่เป็นอาหารสัตว์บางชนิด มีมวล โมเลกุล ตั้งแต่ 500 - 3,000 ความเป็นพิษของแทนนิน คือ จะยับยั้ง การเกิดเอนไซม์ที่ช่วยย่อยอาหารในกระเพาะสัตว์ แทนนิน มี 2 ชนิด คือ คอนเดนส์แทนนิน (condensed tannins) หรือเรียกอีกอย่างว่า โปรแอนโทไซยานิน (proanthocyanin) พบได้ในส่วนเปลือกต้น และแก่นไม้เป็นส่วนใหญ่ และ สารไฮโดรไลซ์แทนนิน (hydrolysable tannins) คือแทนนินที่ สามารถถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้ พบมากในส่วนใบ ฝัก และส่วนที่งอกออกมาเมื่อต้นไม้ได้รับอันตราย แทนนิน มีคุณสมบัติตกตะกอนโปรตีน ทำให้หนังสือสัตว์ไม่เนาเปื่อย จึงมีการใช้ในอุตสาหกรรมฟอก

หนึ่งด้วย แทนนินมีฤทธิ์ฝาดสมาน จึงใช้เป็นยารักษาโรคท้องเสียได้ แทนนินมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้ ตัวอย่างแทนนินได้แก่ theogallin, gallic acid, ellagic acid และ tannic acid



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างโมเลกุลแทนนิน (Anirudhan และ Ramachandran, 2006)

แทนนินเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่และโครงสร้างซับซ้อน มีสถานะเป็น นกรดอ่อนรสฝาด เป็นสารให้ความฝาดในพืช พบได้ในพืชหลายชนิด พืชที่พบสารแทนนิน เป็นพืชที่เป็นอาหารสัตว์ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อาการของสัตว์ที่เกิดจากสารพิษแทนนิน สัตว์ที่กินอาหารที่มีแทนนินเข้าไปปริมาณมาก จะทำให้ เกิดพิษได้ จะแสดงอาการท้องอืด และมีคอเลสเทอโรล (Cholesterol) ในกระแสเลือดสูงขึ้น หรือพบส่วนเปลือกของลำต้นพืชยืนต้น ดังนั้นจึงพบแทนนินในน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ เนื่องจากเมื่อทำการย่อยเยื่อไม้แล้ว จะพบแทนนินเป็นส่วนประกอบ โดยน้ำเสียที่มีแทนนินจะเป็นน้ำเสียที่สามารถย่อยสลายได้ และแทนนินได้ยาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีซับซ้อน ส่วนในด้านอุตสาหกรรม นั้นใช้แทนนินเป็นตัวลดตะกอนในหม้อไอน้ำ

เนื่องจากลิกนิน และแทนนิน เป็นส่วนประกอบสำคัญในพืช และย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก มีรายงานสาเหตุปลาตายใน ลำน้ำพอง จ. ขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2540 (ยรรยงค์, 2541) สาเหตุปลาตายจำนวนมากครั้งนี้นี้ คาดว่ามาจากน้ำเสียที่อาจไหลมาจากต้นน้ำ มิใช่เกิดจากปลาเป็นโรค ประชาชนทั่วไปสงสัยว่า ปลาตายครั้งนี้ คาดว่าเกิดจากน้ำทิ้งโรงงานกระดาษฟิสิกส์พัลพแอนด์ เพเพอร์ (มหาชน) จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ริมห้วยโจด เนื่องจากกระบวนการผลิตของโรงงานนี้ มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกเยื่อกระดาษจำนวนมาก ประมาณ 25000 ลบ.ม ต่อวัน และประชาชนร้องเรียนว่ามีน้ำเสียจากโรงงานไหลซึมลงสู่ห้วยโจด และแม่น้ำพองตามลำดับ โรงงานกระดาษแห่งนี้มีระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง และน้ำทิ้งสุดท้ายสูบไปบำบัดต่อในระบบ wetland ซึ่งอาจไหลซึมลงสู่แม่น้ำพองได้มีผลมาจากคุณภาพน้ำ บริเวณนั้นขาดออกซิเจน และสารประกอบลิกนิน-แทนนิน เข้มข้น ในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งสารประกอบลิกนินและแทนนิน นี้มีผลยับยั้งต่อระบบการหายใจของปลา การตรวจติดตามคุณภาพน้ำ จึงไม่ควรมองข้ามค่าของลิกนินและแทนนิน

2.9 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอธิบายกลไกการดูดซับ

2.9.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Valencia และ Gloyna, 1972)

ไอโซเทอร์มการดูดซับที่จะใช้อธิบายกระบวนการดูดซับมี 2 แบบ ดังต่อไปนี้

2.9.1.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) มีสมมติฐานที่ว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดที่ผิวตัวกลางดูดซับเพียงชั้นเดียวไม่มีการเคลื่อนที่ได้ของอิสระของสารดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ สรุปสมมติฐานได้ดังนี้

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่ในบริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ
- 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
- 3) พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
- 4) พลังการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณการดูดซับจากสารละลายโดยตัวกลางดูดซับแสดงดังสมการ

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m} \right) + \left(\frac{1}{C_e} \right) \left(\frac{1}{bq_m} \right) \quad (2.12)$$

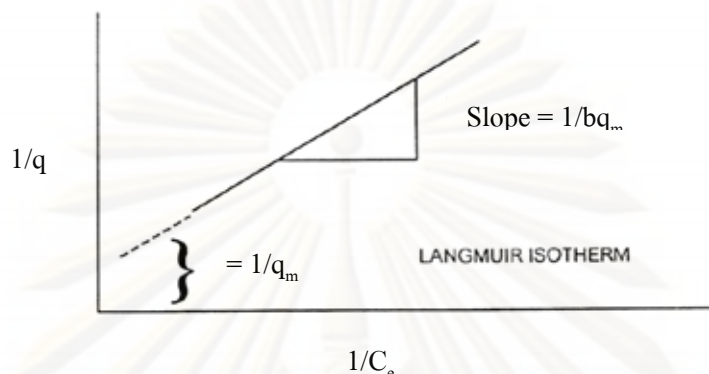
โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

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

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

b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Valencia และ Gloyna, 1972)

2.8.1.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ใช้อธิบายกระบวนการดูดซับแบบผันกลับได้และกระบวนการดูดซับไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพียงชั้นเดียว แสดงได้ดังสมการ

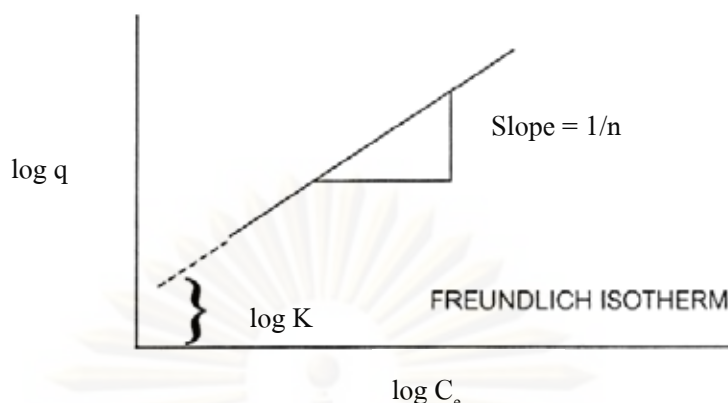
$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.13)$$

โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

$K, 1/n$ คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ของ $\log q$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Valencia และ Gloyna, 1972)

2.9.2 จลนพลศาสตร์

จลนพลศาสตร์เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) และกลไก (mechanism) ของปฏิกิริยาเคมี จลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับจะใช้โมเดล 3 แบบคือ

2.9.2.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง



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

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.15)$$

2.9.2.2 ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนจะเป็นการบอกถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากประจุของ ตัวกลางดูดซับและสารถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับจำนวนของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารตัวกลางดูดซับ และจำนวนสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล สมการเป็นดังนี้ (Gulnaz และคณะ, 2006)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{t}{q_c} \quad (2.16)$$

2.9.3 การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

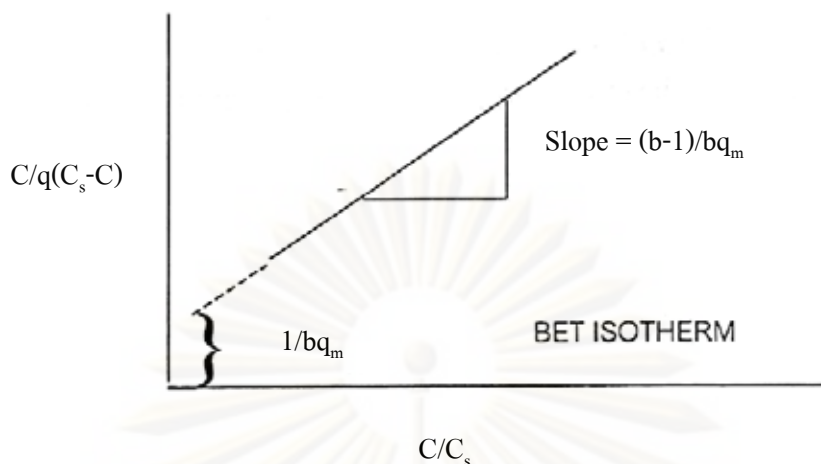
การหาพื้นที่ผิว

การวัดพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับโดยใช้ทฤษฎีของไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบเบท (BET: Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm) เป็นการศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลเดี่ยว และในขณะเดียวกันก๊าซไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนเป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของเบท (BET)” ได้ดังนี้

$$C/q(C_s - C) = (1/bq_m) + ((b-1)/ bq_m)(C/C_s) \quad (2.17)$$

- โดย
- q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
 - q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
 - C คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)
 - C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆ ชั้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)
 - b คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C/q(C_s - C)$ กับ (C/C_s) จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $(b-1)/bq_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bq_m$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเบท (Valencia และ Gloyna, 1972)

หลักการเบื้องต้นคือ การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารจะอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซในขณะที่ก๊าซมีการเคลื่อนที่ (dynamic analysis) โดยก๊าซที่เป็นตัวดูดซับ (ก๊าซไนโตรเจน) จะถูกผสมกับก๊าซเฉื่อย (ก๊าซฮีเลียม) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และในการวัดปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารจะอาศัยความแตกต่างของสมบัติด้านการนำความร้อนของก๊าซแต่ละชนิด ทั้งนี้เพราะปริมาณการนำความร้อนของก๊าซแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

เริ่มทำการวิเคราะห์โดยใช้ภาชนะ บรรจุไนโตรเจนเหลวหล่อหอดใส่ตัวอย่างซึ่งขณะนี้สารตัวอย่างจะอยู่ภายใต้อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (ประมาณ 77 องศาเซลเซียส หรือ -196 องศาเซลเซียส) ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งสามารถวัดและคำนวณหาพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรม วิธีการคือ ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยในหนึ่งใบบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติ ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมานอมิเตอร์ การหาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวมีวิธีการดังนี้

- 1) อบตัวอย่างตัวกลางดูดซับที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน เดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 0.02-0.05 กรัมใส่ลงใน Adsorption vessel
- 2) วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat

3) อุณหภูมิของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่มีความดัน 760 มิลลิเมตรปรอทเป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด

4) ใช้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า

5) ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในเซลล์ทั้งสอง ภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง

6) ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ทั้งสอง ซึ่งวัดโดยใช้ มานอมิเตอร์ (Differential Monometer)

7) อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวต่อไป

ปริมาตรจำเพาะในการดูดซับแบบชั้นเดียวมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ที่สภาวะมาตรฐาน และจำนวนโมลของ ตัวกลางดูดซับ ในการดูดซับแบบชั้นเดียวมีค่าเท่ากับ $q_m / 0.0224$ คูณด้วยเลขอวกาศโดร จะทำให้รู้จำนวนโมเลกุลที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวสามารถคำนวณ พื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัมได้จากสมการ

$$S = (q_m / 0.0224) \times 6.023 \times 10^{23} \times A \quad (2.18)$$

$$= 2.69 \times 10^{25} q_m A$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ

A = พื้นที่ที่เกิดการดูดซับโดยโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ

การหาขนาดรูพรุน

ขนาดของรูพรุนสามารถคำนวณหาโดยวิธีของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และสมการ Kelvin ซึ่งสมการ Kelvin นั้นจะใช้หาขนาดในช่วง 2-6.5 นาโนเมตร เมื่อมีการใช้สมการ Kelvin ในการศึกษาการดูดซับและการคายไนโตรเจนจะตั้งสมมติฐานให้รูปร่างของรูพรุนเป็นทรงกระบอกที่ถูกเติมเต็มด้วยไนโตรเจนเหลว ซึ่งสมการเป็นดังนี้

$$\frac{\ln p_0}{p} = \frac{2\gamma V_L}{rRT} \quad (2.19)$$

เมื่อ p_0 คือ ความดันไออิ่มตัว

p คือ ความดันที่สภาวะสมดุล

V_L คือ ปริมาณของเหลว

γ คือ ความเครียดของพื้นผิว

ถ้ารัศมีของรูพรุนน้อยกว่าค่า r จะถูกเติมด้วยไอควบแน่น โดยปกติแล้วการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดการควบแน่นแบบกะปริดลารีนรูพรุนร่วมด้วย ดังนั้น สมการ Kelvin จะไม่ให้ค่ารัศมีของรูพรุนที่ถูกต้อง เพราะขนาดของรูพรุนจะลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของชั้น ตัวกลางดูดซับ ดังนั้น จึงต้องมีการคิดค่าการควบแน่นกะปริด ลารีนที่ความดันใดๆ รัศมีของรูพรุนหาได้จากสมการนี้

$$r_p = \frac{2\gamma V_L}{RT \ln p_0/p} + t \quad (2.20)$$

เมื่อ r_p คือรัศมีของรูพรุน (นาโนเมตร)

t คือ ความหนาแน่นของชั้นของตัวกลางดูดซับ

สามารถประมาณค่าความหนาแน่นของชั้นตัวกลางดูดซับได้จากสมการของ Harkins-Jura ในช่วงความดันสัมพัทธ์เท่ากับ 0.1-0.95 ดังสมการ

$$t(p_0/p) = 0.1 \left[\frac{60.65}{0.03071 - \log(p/p_0)} \right]^{-0.3968} \quad (2.21)$$

2.9.4 การวิเคราะห์ รูปร่าง และขนาดอนุภาค (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

การตรวจวัดรูปร่าง และขนาดอนุภาคของ ตัวกลางดูดซับ จะใช้การหาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง ซึ่งมีกำลังขยายสูง 10-300,000 เท่า สำหรับการทำงานนั้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากต้นกำเนิด และถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) ผ่านสนามไฟฟ้าในสูญญากาศ จะทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบ และมีสนามแม่เหล็กอยู่รอบตัว ในแนวตั้งฉาก ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่นั้น เราสามารถที่จะบังคับอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้ โดยอำนาจสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง หรือ องค์ประกอบต่างๆ ของวัตถุตัวอย่าง โดยทำให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปบนพื้นผิว โดยอุปกรณ์ตรวจจับ ซึ่งอยู่ภายในจะจับเอาอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากชิ้นงาน แล้วแสดงผลบนจอโทรทัศน์ ซึ่งสามารถที่จะบันทึกภาพได้ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลง โดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้

เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณ หมวลและปริมาตร กล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยายแล้วจึงแปลภาพบนจอซีอาร์ที (CRT) คอลัมน์ของ SEM จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ ถ้าอิเล็กตรอนที่ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ เลนส์ใกล้วัตถุ

ถ้าอิเล็กตรอนนี้เป็น อิเล็กตรอนปฐมภูมิ โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เร็ว ยกกว่าอิเล็กตรอน ทุติยภูมิ และถูกรวบรวมโดยตัวเก็บอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอซีอาร์ที (CRT) ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูนขึ้น

นอกจากนี้ที่เลนส์ใกล้วัตถุจะมีช่องรับแสงเช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพและอาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เพื่อบอกรายละเอียดของ รูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิทำการตรวจสอบได้ และเพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุได้

2.9.3 การวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge (pH_{PZC})

(Soonglendsongpha, 2006)

การหาประจุบนพื้นผิวเพื่อหาค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge (pH_{PZC}) เป็นค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป จนถึงพีเอชระดับหนึ่งที่จำนวนประจุลบและประจวบกับพื้นผิว ตัวกลางดูดซับมีจำนวนเท่ากันนั่นก็คือ จำนวนประจุสุทธิ (net charge) ซึ่งหมายถึงผลต่างของประจุทั้ง 2 ชนิด เท่ากับศูนย์

การหาค่า pH_{PZC} ทำการวัดโดยวิธีไทเทรตด้วย กรด -ด่าง ในรูปของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ได้สมการดังนี้

$$[OH^-] + [Cl^-] + [negative\ surface] = [H^+] + [Na^+] + [positive\ surface] \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad \sigma_0 &= [positive\ surface] - [negative\ surface] \quad (2.23) \\ &= [C_A - C_B] - [H^+ - OH^-] \end{aligned}$$

เมื่อ	σ_0	=	ประจุบนพื้นผิว
	[positive surface]	=	ความเข้มข้นของประจุบวกบนพื้นผิว
	[negative surface]	=	ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว
	$[H^+]$	=	10^{-pH}
	$[OH^-]$	=	10^{pH-pK_w}
	$[Cl^-]$	=	$[HCl]_{add} + [NaCl]_{add}$
	$[Na^+]$	=	$[NaOH]_{add} + [NaCl]_{add}$
	$[C_A - C_B]$	=	$[Cl^-] - [Na^+]$
		=	$[HCl]_{add} - [NaOH]_{add}$

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

$$[C_A - C_B] = [H^+ - OH^-] \quad (2.24)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายที่ห่อหุ้มหรือล้อม มรอบตัวกลางดูดซับ โดยสารละลายมีค่าพีเอชที่สูงกว่าค่า pH_{PZC} จะเกิดประจุลบบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ และในทางตรงข้าม ถ้าสารละลายมีค่าพีเอช ที่ต่ำกว่าค่า pH_{PZC} จะเกิดประจุบวกบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ

2.9.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมกราวิทริก (Thermal Gravimetric Analysis; TGA)

(ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ , 2552)

เป็นการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ การทดลองจะทำในระบบปิด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) เครื่องจะประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Programmer) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปการทดสอบด้วยวิธีนี้ จะสามารถทดสอบได้ถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น การสูญเสียมวลประกอบ (Decomposition) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (Formation) รวมทั้งสามารถหาน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้

หลายประเภท เช่น แก้ว เซรามิก โลหะ ในสถานะของ ของแข็ง หรือ ของเหลว ตัวเครื่องเป็นแบบ แนวตั้งหรือแนวนอนโดยมีเครื่องชั่งขนาดเล็กอยู่ด้านล่างสำหรับรองรับภาชนะบรรจุตัวอย่าง สามารถวัดค่าความร้อนที่เกิดจาก ปฏิกริยา (enthalpy) และน้ำหนักของตัวอย่าง ที่หายไป ได้ ในเวลาเดียวกัน สามารถบรรจุ ตัวอย่าง (sample) และ สารอ้างอิง (reference) ภายในเตาเผา (furnace) เดียวกัน

2.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.10.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุช่วย ตกตะกอนชนิดต่างๆ มีดังนี้

เอกลักษณ์ (2551) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนของสัลไฟด์ในระบบเอเอส โดยการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน ด้วยวัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ ทาล และ ถ่านกัมมันต์ ชนิดผง เติมผสมลงไปในถังปฏิกริยาของของระบบเอเอสธรรมดาซึ่งทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยแปรเปลี่ยนปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอนใน 4 ถังปฏิกริยาด้วยปริมาณดังนี้คือ 0%, 20%, 50% และ 80% น้ำหนักของวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักของแบคทีเรีย เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด และความเข้มข้นที่มีผลต่อความเร็วในการ ตกตะกอนด้วย ด้วยการวัดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity) และ ศึกษาลักษณะของการเกาะตัวระหว่างวัสดุช่วงตกตะกอนทั้ง 2 ชนิดกับฟล็อกจุลชีพด้วยกล้องจุลทรรศน์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตลอดจนศึกษาถึงความเข้ากันได้ของวัสดุช่วยตกตะกอน กับจุลชีพด้วยการตรวจวัดค่า ซีไอดี , เอ็มเอสเอสเอส , เอ็มแอลวีเอสเอส , พีเอส , เอสวี 30 และ เอสวีไอ เปรียบเทียบกับการเลี้ยงตะกอน จุลชีพแบบที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน โดยนำ ข้อมูลจากการศึกษาไปใช้ในการปรับปรุงและออกแบบถังตกตะกอนที่ใช้ในระบบเอเอสที่เติมวัสดุช่วยตกตะกอน โดยผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 2 ชนิดสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสัลไฟด์ที่ไม่ทำการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน โดยค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในถังปฏิกริยาที่มีการเติมทาลจะสูงกว่าถังที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงในทุกๆ ความเข้มข้น ซึ่งการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีความเข้มข้น 80 % น้ำหนักต่อน้ำหนัก ทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าสูงที่สุดคือ 17.7 ม./ชม. โดยเมื่อพิจารณาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของสัลไฟด์ที่ไม่เติมวัสดุช่วยตกตะกอนมีค่าต่ำที่สุด เพียง 4.0 ม./ชม. จากการทดลองวัสดุช่วยตกตะกอนและจุลชีพสามารถเข้ากันได้ดี โดยศึกษาได้จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ซึ่งพบว่าปริมาณค่าพารามิเตอร์ในทุกถังปฏิกริยาใกล้เคียงกันกับถังปฏิกริยาที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน และ ลักษณะของจุลชีพที่อาศัยอยู่ในระบบจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ก็เป็นเช่นเดียวกันในทุกๆ

ถึงปฏิกิริยา ซึ่งล้วนเป็นจุลชีพในกลุ่มที่สำคัญของระบบเอเอส จากการศึกษาดังกล่าวของจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนพบการเกาะตัวของสไลด์กับวัสดุช่วยตกตะกอนในลักษณะที่ฟล็อกจะห่อหุ้ม และเคลือบผิววัสดุช่วยตกตะกอน และจากการศึกษาออกแบบถังตกตะกอนด้วยผลจากค่าความเร็ว เริ่มต้นของการตกตะกอนในการทดลองได้ผลคือ ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนเหมาะสม เช่น 20% (W/W) สามารถคำนวณออกแบบของถังตกตะกอนให้มีขนาดลดลงได้ ด้วยการคำนวณจากวิธี ไฮลิตฟลักซ์

ธวัชรรัตน์ (2552) ศึกษาผลของอายุสไลด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสที่ใช้ วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนต่างกัน 3 ชนิด คือ ทาล ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด ลงในถังปฏิกิริยาของระบบเอเอสที่ควบคุมให้มีอายุสไลด์ต่างกัน 3 ค่า คือ 3, 10 และ 30 วัน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ที่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของระบบเอเอสที่ควบคุมให้มีอายุสไลด์ต่างๆ กัน โดยการวัดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV) และยังคงศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และกา รจับตัวระหว่างฟล็อกกับวัสดุช่วยตกตะกอน ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดลงในระบบเอเอสที่ควบคุมให้มีอายุสไลด์ต่างๆ แล้ว สามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของระบบให้มีค่าสูงขึ้นได้ในทุกค่าอายุสไลด์ โดยในระบบที่เติมทาลมีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด และในระบบเอเอสที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงที่สุด ส่วนในระบบที่เติมยางบดละเอียดถึงแม้ว่าจะให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด แต่ก็ยังสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และช่วยให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงกว่า 5 เมตรต่อชั่วโมง เมื่อศึกษาในแง่การจับตัวของฟล็อก วัสดุทั้ง 3 ชนิดแสดงให้เห็นว่าสามารถจับตัวกับฟล็อกได้ดี และไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ในทุกๆ ค่าอายุสไลด์

สถิตรัตน์ (2552) ศึกษาผลของชนิดและขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพ การตกตะกอนในระบบเอเอส โดยใช้วัสดุช่วยตกตะกอน 3 ชนิด คือ ทาล ถ่านกัมมันต์ชนิดผงและยางบดละเอียด โดยเปรียบเทียบวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีขนาดต่างกัน คือ ทาลขนาด 2, 5, 10, 18 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 5, 10, 24, 99 ไมโครเมตรและยางบดละเอียดที่มีขนาด 110, 242, 618, 848 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาผลของขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนทั้งนี้ การประเมินประสิทธิภาพของการตกตะกอน ใช้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial settling velocity, ISV) ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดและลักษณะการจับตัวระหว่างฟล็อกชีวภาพกับวัสดุช่วยตกตะกอนใช้การลดลงของค่าซีโอดี ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบเอเอสที่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีค่า

ใกล้เคียงกับชุดควบคุม การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดและทุกขนาด สามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้นได้ โดยทาลมีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าสูงที่สุดคือ 17.64 ม./ชม. ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน 13.91 ม./ชม. และยางรถยนต์บดละเอียดมีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน 13.74 ม./ชม. เมื่อพิจารณาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของสลัดจ์ที่ไม่เติมวัสดุช่วยตกตะกอนมีค่าเพียง 2.81 ม./ชม. จากการศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดยังสามารถเข้ากันได้กับจุลชี พในระบบและพบการจับตัวของสลัดจ์กับวัสดุช่วยตกตะกอนใน 3 ลักษณะคือ 1 สลัดจ์ห่อหุ้มกับวัสดุช่วยตกตะกอน 2 สลัดจ์เคลือบผิวกับวัสดุช่วยตกตะกอน 3 สลัดจ์เกาะติดผิวกับวัสดุช่วยตกตะกอน นอกจากนี้ในกรณีของการใช้ยางบดละเอียดยังเป็นแนวทางใหม่ในการนำเอาวัสดุเหลือใช้ นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

โดยจากงานวิจัยทั้ง 3 มีการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเป็นวัสดุช่วยตกตะกอน และพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน นั้นมีจุลินทรีย์เกาะแบบห่อหุ้มล้อมรอบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ และการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนสามารถกำจัดซีโอดี ได้สูงที่สุด จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ โดยคาดว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วจะยังคงหลงเหลือความสามารถมลสารอื่นๆ ในน้ำเสียได้อีก

2.10.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของวิธีการกำจัดลิกนิน มีหลายวิธี อาทิเช่น

Venkata Mohan และ Karthikeyan. (1997) ศึกษาการกำจัดสีของลิกนินและแทนนินดูดซับด้วย แอ็คติเวทเต็ด ซาร์โคล จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 8 ชั่วโมง ปฏิริยาการดูดซับสอดคล้องกับสมการอันดับหนึ่งเหมือน โดยการศึกษาถึงปริมาณตัวกลางดูดซับ และพีเอช ที่แตกต่างกัน พบว่า ไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับ คือ ไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์บอกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็น การดูดซับทางเคมี และสามารถผันกลับได้ และการดูดซับขึ้นกับพีเอชโดยจะสามารถกำจัดลิกนินและแทนนินได้ดีที่พีเอชต่ำๆ

Tantemsapya และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัดสี ซีโอดี และลิกนิน ในน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้เถ้าไม้ขาวและเถ้าไม้ดำซึ่งเป็นกากของเสียจากหม้อต้มไอน้ำภายในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษเอง โดยทำการทดลองเป็นแบบแบทช์เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล สภาพพีเอช ปริมาณของเถ้าไม้ที่เหมาะสมตลอดจนไอโซเทอร์มของการดูดซับจากการทดลองเวลาสัมผัสที่เข้าสู่สภาวะสมดุล พบว่าเมื่อใช้เถ้าไม้ขาวและเถ้าไม้ดำแตกต่างกันคือ 2 นาที และ 25 นาทีตามลำดับ ส่วนการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียโดยปรับให้เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 ก่อนเติมเถ้าไม้นั้น พบว่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการกำจัดทั้ง สี ซีโอดี และลิกนินเมื่อใช้เถ้าไม้ขาวซึ่ง

แสดงโดยประสิทธิภาพการกำจัดที่มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ สีจะถูกกำจัดในช่วงร้อยละ 89-93 ซีไอดีร้อยละ 66-70 ลิกนินร้อยละ 78-82 สำหรับถ้าไม่ดำเนิน พีเอชจะส่งผลต่อการกำจัดทั้งสี ซีไอดี และลิกนิน โดย ณ พีเอช เท่ากับ 2 นั้นจะได้ค่าการกำจัดสูงสุดคือสีร้อยละ 42.2 ลิกนินร้อยละ 31.1 และซีไอดีร้อยละ 29.7 และการกำจัดจะลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นและพบว่าที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 2 เมื่อเติมถ้าไม่ดำค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 7.1 เนื่องจากเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุลในถ้าไม่ขาวสั้นมากคือเพียง 2 นาที การศึกษาปริมาณถ้าไม่ที่เหมาะสมในถ้าไม่ขาว จะพิจารณาจาก ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดกล่าวคือประสิทธิภาพสูงสุดการกำจัดสีร้อยละ 95 ลิกนินร้อยละ 80 และซีไอดีร้อยละ 69 ตามลำดับ ใช้ถ้าไม่ขาว 20 ก./ล. น้ำเสีย ส่วนกรณีถ้าไม่ดำ การหาปริมาณ ถ้าไม่ที่เหมาะสมทำได้โดยคำนวณจากสมการไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว ทั้งแบบแลงมัวร์เชิงเส้นและแบบฟรุนดลิช โดยพิจารณาเฉพาะสี และลิกนิน เนื่องจากค่าซีไอดีไม่สามารถเข้ากับ ไอโซ เทอร์มดังกล่าวได้ พฤติกรรมการดูดติดผิวสีและลิกนินของถ้าไม่ดำจึงมีแนวโน้มเป็นแบบกายภาพ การทดลองด้วยแบบจำลองในถ้าไม่ขาว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดคือร้อยละ 93, 76 และ 61 ของสี ลิกนิน และซีไอดีตามลำดับ ในขณะที่ถ้าไม่ดำมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 49, 45 และ 24 ตามลำดับ จากผลการวิจัยบ่งชี้ได้ว่าถ้าไม่ขาวมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่า

Das และ Patnaik (2000) ศึกษาการกำจัดลิกนินด้วยขยะที่เกิดจากอุตสาหกรรม โดยการดูดซับด้วย blast furnace flue dust จากโรงงานทำเหล็ก และ slag generated จาก โรงงาน chrome alloy โดยการทดลองแบบที่ละเท พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินหลังจาก 8 ชั่วโมงมีมากกว่า 80 และ 60% ตามลำดับ ตัวกลางดูดซับ ทั้งสองมีอันดับปฏิกิริยาการดูดซับ ลิกนินที่เกิดขึ้นเป็น ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือน ไอโซเทอร์ม ในการดูดซับลิกนินของ ตัวกลางดูดซับ ทั้งสองสามารถอธิบายได้ตามแบบจำลอง ไอโซเทอร์ม ของฟรุนดลิช ประสิทธิภาพในการดูดซับ ลดลงเมื่อพีเอชและอุณหภูมิ เพิ่มขึ้น การทดลองแบบคอลัมน์บ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับ ลิกนินลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและเมื่อลดความสูงของตัวกลาง

พิมพ์ชนก (2546) ศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอด โดยเก็บตัวอย่างเชื้อราจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย แล้วนำมาทดสอบความสามารถในการย่อย สลายลิกนินโดยใช้หลักการของ Poly-R clearance และ Tannic agar พบว่ารา Isolate A19 และ Isolate B7 ให้ผลเป็นบวก จากนั้นทำการทดลองโดยใช้รา Isolate A19 และ Isolate B7 ลดสีและ ลิกนินในน้ำทิ้งที่ความเป็นกรดต่าง 5 โดยพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของรา Isolate A19: รา Isolate B7 : น้ำทิ้ง เท่ากับ 1:1:5 โดยใช้ซูโครสเป็นแหล่งอาหารไนโตรเจนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 หลังจากบ่มเป็นเวลา 8 วัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดสีและลิกนินร้อยละ 94.55 และร้อยละ 75.81 ตามลำดับ

Dilek และ Bese (2001) ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพ กระบวนการกำจัดสีของ ลิกนินจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยอาศัยการตกตะกอนจากการใช้สารส้ม (alum) และดินเหนียว (clay) โดยแบ่งตัวแปรในการทดลองคือ ชนิดของดิน (beige-sepiolites, brown-sepiolites, calcium-bentonites และ sodium-bentonites) ขนาดของเม็ดดิน และสัดส่วนระหว่างปริมาณ ของสารส้มกับปริมาณของดินเหนียว ซึ่งผลการทดลองพบว่ากระบวนการกำจัดสีจะมี ประสิทธิภาพสูงเมื่อมีการสัดส่วนใช้สารส้มเป็นจำนวนมาก แต่จะมีตะกอนเกิดขึ้นในระบบเป็น จำนวนมากอีกด้วย จึงจำเป็นจะต้องมีกระบวนการแยก และกำจัดกากตะกอนเพิ่มขึ้น การใช้ กระบวนการกำจัดสีโดยอาศัยการกรองนั้นจำเป็นต้องอาศัยแผ่นกรองที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและ ต้องมีการเพิ่มความดันให้แก่ระบบจึงอาจเกิดปัญหาการอุดตันของเยื่อกรองได้ โดยปกติจะใช้การ กรองในระดับอัลตราฟิวเตรชัน (ultrafiltration) ซึ่งในระหว่างการทำกระบวนการจำเป็นต้องมี การควบคุมอุณหภูมิและ pH ของน้ำเสียให้เหมาะสมกับชนิดของเยื่อกรองที่เลือกใช้

Zhou และ Smith (1997) ได้มีการนำน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศ aerated lagoon ของโรงผลิตเยื่อกระดาษ ที่มีลิกนินมาผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยากับโอโซนทั้งในระดับ bench scale และ pilot scale โดยให้มีการสัมผัสกับฟองก๊าซละเอียด โดยพิจารณาถึงผลกระทบจากการ ขยายขนาดของ contactor ที่มีต่อประสิทธิภาพต่อกระบวนการ ใช้โอโซน แสดงได้จากการ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดสี AOX (absorbable organic halides) และลักษณะ คุณสมบัติอื่นๆของน้ำเสีย ประสิทธิภาพเนื่องจากการดูดซับโอโซนสามารถสังเกตได้จากปริมาณ ของโอโซนที่เหลือจากสภาวะกระบวนการดำเนินการสัมผัสประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารทั้งหมด (KLa) และตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการสลายตัวของโอโซนในการทำปฏิกิริยา (E) จากตามทฤษฎี นั้น สามารถประมาณได้จากการประยุกต์ตาม Twofilm theory สำหรับ Irreversible Gas-Liquid reactor ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า โอโซนมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับส่วนประกอบที่เป็นสี (color) และส่วนประกอบ AOX ในน้ำเสียจากโรงผลิตเยื่อกระดาษ แต่มี ประสิทธิภาพที่ไม่สูงนักสำหรับการลดปริมาณ COD และ TOC ซึ่งประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้พื้นที่ผิวการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนและน้ำเสีย จากโรงผลิตเยื่อกระดาษ อัตราการไหลของก๊าซโอโซนและน้ำเสีย และ Backmixing ปฏิกิริยา ออกซิเดชันโดยโอโซนจะเปลี่ยนหมู่ฟีนิล (Phenyl groups) ในลิกนินที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียเป็น สารประกอบจำพวกคีโตน กรดอินทรีย์ และอัลดีไฮด์ เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ได้ต่อไป แบ่งการศึกษาถึงกระบวนการย่อยสลายของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อโดยการ ใช้ โอโซนออกเป็น 4 ระบบ ได้แก่ $O_3/pH3$, $O_3/pH11$, $O_3/pH11/H_2O_2$ และ $O_3/pH11/UV$ ซึ่งพิจารณา ประสิทธิภาพของแต่ละระบบจากการลด Total Organic Carbon (TOC) ปริมาณฟีนอล ปริมาณ สี และปริมาณสารพิษทั้งหมด จากการทดลองที่เวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน 90 นาที

O₃/pH11/UV จะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 45) ปฏิกริยาที่ใช้ O₃/pH11, O₃/pH11/H₂O₂ และ O₃/pH11/UV จะสามารถลดปริมาณฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ร้อยละ 90) O₃/pH11 และ O₃/pH11/UV จะมีประสิทธิภาพในการลดสารพิษที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย แต่โอโซนจะมีประสิทธิภาพต่ำในกระบวนการลด TOC นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง และสำหรับการศึกษาโดยยึดตามหลักเศรษฐศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการบำบัดโดยอาศัยโอโซนในสภาวะที่เป็นเบส (O₃/pH11) นั้นจะมีประสิทธิผลสูงที่สุด

2.10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของการใช้ ถ่านกัมมันต์ และตะกอนจุลินทรีย์มาใช้เป็นตัวกลางดูดซับมลสารชนิดต่างๆ มีดังนี้

Xing และคณะ (1999) ศึกษาการดูดซับติดผิว และการดูดซับติดผิวทางชีวภาพ โดยกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (GAC) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพ (BTSE) น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (PTSE) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพ (real BTSE) และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (real PTSE) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับติดผิวทางชีวภาพนั้นดีกว่าการดูดซับติดผิวทั่วไปในทุกๆ ด้าน โดย แสดงให้เห็นถึงการใช้งานจริงของ BGAC ในกระบวนการกรอง ผลการศึกษาที่เห็นได้ชัดเจนคือ real PTSE ที่เติม GAC ในระดับ 5 g/l มีความสามารถในการดูดติดผิวประมาณ 54% และการดูดติดผิวทางชีวภาพประมาณ 96% ของการกำจัด DOC และพบว่าการดูดซับของ GAC ที่สภาวะสมดุลนั้นสามารถทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองแลงมัวร์และฟรุนดลิช

ชยาภาส (2547) ศึกษา ความสามารถในการกำจัดไฮดรอนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวกลางดูดซับในการทดลองนี้มี 3 ชนิด โดย 2 ชนิดแรกคือ Activated Sludge (AS-P) และ Methane Upflow Reactor (MUR-P) ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ Cyclic Activated Sludge System (CASS-N) ได้จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จะนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C บดและแยกขนาดให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 106-150 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไฮดรอนสังกะสีสูงถึง 97-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงมัวร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช มาใช้ทำนายผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการ

ดูดซับทั้งของแลงมัวร์และ ฟรอนดิลิซสามารถใช้นำมาทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า KF ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงมัวร์ มีค่าเป็น 214, 184 และ 205 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมตัวกลางดูดซับ ตามลำดับ

ชยาภาส(2549) ศึกษาการกำจัด ไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียด้วยตะกอน จุลินทรีย์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ตะกอน จุลินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวกลางดูดซับในการทดลองนี้มี 3 ชนิด โดย 2 ชนิดแรก คือ AS-P และ MUR-P ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ CASS-N ได้จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จะนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C บดและแยกขนาดให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 106-150 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมสูงถึง 96-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ แลงมัวร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิลิซมาใช้นำมาทำนายผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิลิซและแลงมัวร์ สามารถใช้นำมาทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า KF ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักแคดเมียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากการไอโซเทอร์มการดูดซับของ แลงมัวร์ มีค่าเป็น 217, 238 และ 213 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมตัวกลางดูดซับ ตามลำดับ

ปรางศิริ (2551) เปรียบเทียบประสิทธิภาพและปรากฏการณ์การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ และสีย้อมเบสิก โดยใช้ ตัวกลางดูดซับ ได้แก่ สลัดจ์แห้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า โดยศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ ด้วยกรด และด่าง ผลของค่าพีเอช อุณหภูมิ และผลของการคัดเลือกมลสารระหว่าง สีย้อมและสารลดแรงตึงผิว ผลการวิจัยพบว่า ตัวกลางดูดซับ ประเภท สลัดจ์และ ตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ดูดซับ สีย้อมทั้ง 2 ชนิดใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 และ 360 นาทีตามลำดับ ส่วนการดูดซับสารลดแรงตึงผิว ตัวกลางดูดซับ ทุกชนิดใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที โดยอธิบายได้จากอันดับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน สีย้อมรีแอกทีฟถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นต่างที่พีเอช 9 และในสลัดจ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วยสลัดจ์กระตุ้นต่างที่พีเอช 7 ในขณะที่สีย้อมเบสิกถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นกรดที่พีเอช 9 และในสลัดจ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วยสลัดจ์กระตุ้นกรดที่พีเอช 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า pH Point of

Zero Charge (pH_{PZC}) กระบวนการดูดซับอธิบายได้จาก ไอโซเทอร์ม แลงมัวร์ และ ฟรุนดลิช สี่ข้อมทั้ง 2 ชนิดถูกดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง (40 และ 55 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นระบบดูดความร้อน ส่วนการคัดเลือกมลสารระหว่างสี่ข้อมและสารลดแรงตึงผิวพบว่า ตัวกลางดูดซับ ประเภท ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารลดแรงตึงผิวและสี่ข้อมทั้ง 2 ชนิดลดลง ยกเว้นถ่านกัมมันต์เกรดการค้าดูดซับสี่ข้อมเบสลดลงแต่ดูดซับสารลดแรงตึงผิวไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วน ตัวกลางดูดซับ ประเภท สลัดจ์ ดูดซับสารลดแรงตึงผิวลดลงแต่ดูดซับสี่ข้อมทั้ง 2 ชนิดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นสลัดจ์กระตุ้นกรดดูดซับสารลดแรงตึงผิวและสี่ข้อมรีแอกทีฟลดลง

โดยจากงานวิจัยข้างต้นสรุปได้ว่ามีการใช้ ถ่านกัมมันต์ และตะกอนจุลินทรีย์หรือ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสมาใช้ในการเป็นตัวกลางดูดซับมลสาร ชนิดต่างๆ ออกจาก น้ำเสีย ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงคาดว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วมีส่วนประกอบของทั้ง ถ่านกัมมันต์ และตะกอนจุลินทรีย์ จึงน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการ ดูดซับลิแกนด์และแทนนินออกจากน้ำเสียได้

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์เพื่อเตรียมตัวกลางดูดซับ และวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียที่ใช้เลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์

1. ถังปฏิกรณ์พลาสติกใสขนาดบรรจุ 15 ลิตร
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด) ทำจากกะลามะพร้าว ขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะ 2.2 มีพีเอช 9 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 800 ตารางเมตรต่อกรัม
3. เครื่องเป่าอากาศและหัวกระจายอากาศ
4. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้น้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน และมีธาตุต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
น้ำตาลทราย	500
ยูเรีย	75
NaHCO ₃	60
CaCl ₂ ·2H ₂ O	20
FeCl ₃ ·6H ₂ O	5
K ₂ HPO ₄	10
MgSO ₄ ·7H ₂ O	3

ที่มา : สุรชัย ทักษิณวรารจารย์, 2526

เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพบว่ามีค่า ดังนี้ COD 550 มก./ล. TKN 35 มก./ล. Total-P 6 มก./ล. pH 7.3 และ COD : N : P มีค่าเท่ากับ 100 : 6.36 : 1.09

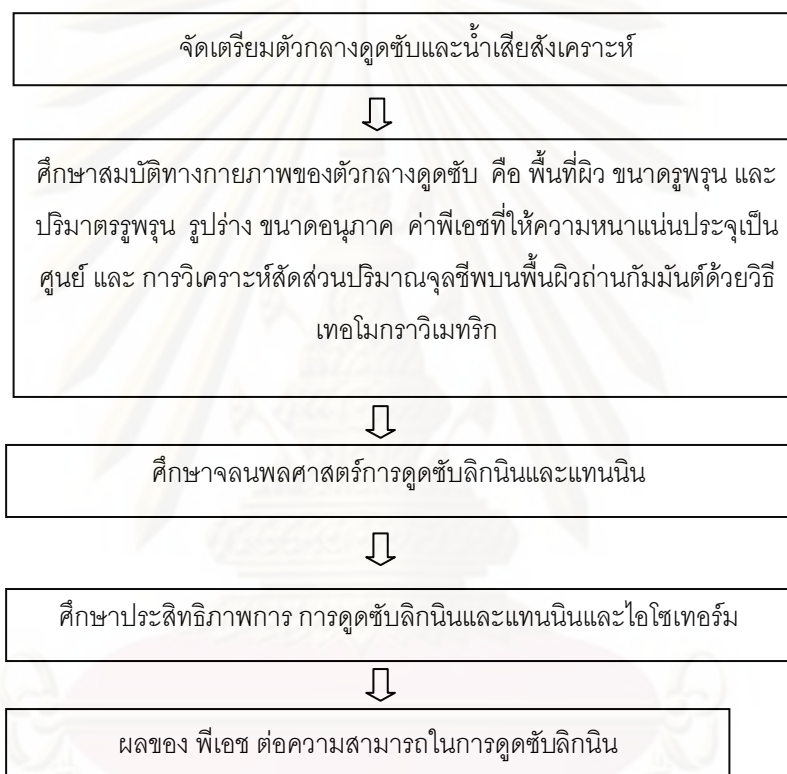
5. ตะกอนจุลชีพที่สมบูรณ์แข็งแรงและตกตะกอนได้ดี สำหรับใช้ในการเริ่มต้นระบบจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง
6. เครื่องวัดพีเอช รุ่น 744 ยี่ห้อ metrohm
7. โถทำแห้ง
8. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 103-105 องศาเซลเซียส
9. ตาชั่งละเอียด
10. กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
11. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 0.1 N
12. สารละลายกรดซัลฟูริก
13. สารละลายเฟอร์โรซีนดิเคเตอร์
14. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต
15. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 N
16. กล้องจุลทรรศน์
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการศึกษาดูดซั้บ

1. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิว BET (BET Surface Area Analyzer)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. เครื่องวัดพีเอช
4. เครื่องยู่วิสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
6. เครื่องเขย่าแบบวง (orbital shaker)
7. เครื่องเขย่าคัดขนาด (sieve shaker)
8. กระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร
9. ตะแกรงร่อน
10. โถดูดความชื้น (desiccators)
11. เครื่องแก้ว
12. อัลคาไลน์ ลิกนิน
13. แทนนิก แอซิด

3.2 การดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับลิแกินิน และแทนนิน โดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้แล้วคือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยใช้ตัวกลางดูดซับที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di) ตะกอนจุลินทรีย์ (S) และ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di) โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ ขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

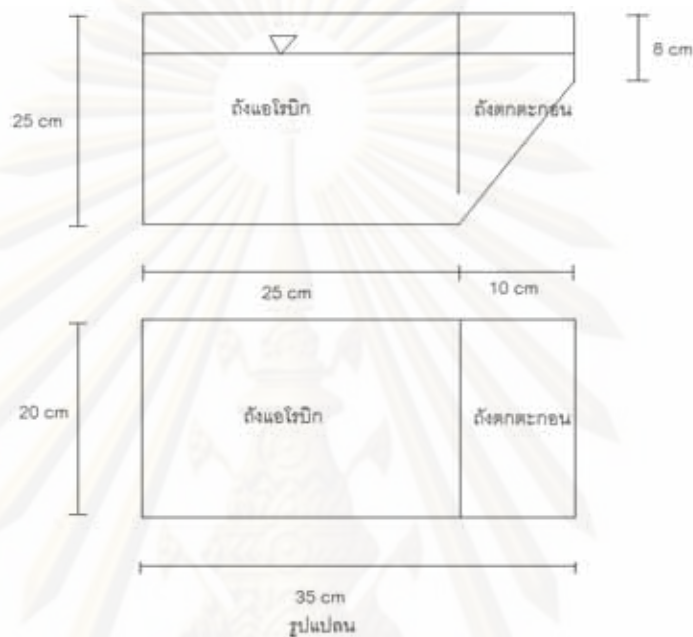
3.3 โมเดลในการทดลอง

โมเดลในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือ

3.3.1 การเตรียมตัวกลางดูดซับ

ในการเตรียมมวลสารในการดูดซับของงานวิจัยนี้จะเริ่มระบบโดยใช้ระบบ เอเอสแบบ Conventional Activated Sludge ดังปฏิกิริยาที่ใช้ เป็นแบบที่ละเท (Batch) มีปริมาตร เท่ากับ 10 ลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง เติมลงไปในถังปฏิกิริยาด้วยสัดส่วน 100 %

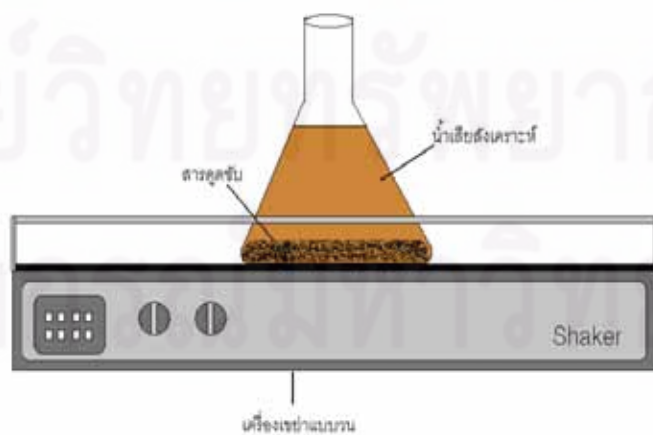
($W_{\text{ถ่านกัมมันต์}}/W_{\text{MLSS}}$) เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อให้จุลินทรีย์มาเกาะ ควบคุมระบบให้มีค่า F/M เท่ากับ 0.3 และ ควบคุมค่าอายุ สลัดจ์เท่ากับ 10 วันโดยวิธีตักสลัดจ์ทิ้งจากถังปฏิกริยาวันละ 1 ลิตร แล้วเติม PAC ลงไปเท่ากับปริมาณที่ตักออกในแต่ละวัน ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเดินระบบได้ประมาณ 10 วัน (เอกลักษณ์, 2551)



ภาพที่ 3..2 รายละเอียดของถังปฏิกริยาที่ใช้ในการเตรียมตัวกลางดูดซับ

3.3.2 โมเดลถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ

โมเดลในการทดลองเป็นดังแสดงในภาพที่ 3.3 โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่ น้ำเสียสังเคราะห์และตัวกลางดูดซับ แล้วนำไปวางบนเครื่องเขย่าแบบวน และทำการปั่นกวนโดยเครื่องเขย่าแบบวน



ภาพที่ 3.3 โมเดลถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ

3.4 ตัวกลางดูดซับและสารถูกดูดซับ

3.4.1 ตัวกลางดูดซับ

ทดลองโดยใช้ตัวกลางดูดซับ 5 ชนิด ดังนี้

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ทำจากกะลามะพร้าว ขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 800 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 800 ตารางเมตรต่อกรัม
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB) เตรียมโดยเริ่มระบบโดยใช้ระบบเอเอส นำหัวเชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง ใช้ถึงปฏิบัติการแบบทีละเท มีปริมาตร 10 ลิตร ควบคุมระบบให้มีค่า F/M เท่ากับ 0.3 และ ควบคุมค่าอายุสลัดจ์เท่ากับ 10 วัน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผง เติมลงไปจนถึงปฏิบัติการด้วยสัดส่วน 100 % ($W_{\text{ถ่านกัมมันต์}}/W_{\text{MLSS}}$) เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน กรองเอาตะกอนออก ล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di) เตรียมโดยนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้วมาทำการหมักในถัง 50 ลิตรประมาณ 1 เดือน กรองเอาตะกอนออก ล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน
- ตะกอนจุลินทรีย์ (S) นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง กรองเอาตะกอนออก ล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน
- ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di) นำตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน ดินแดงมาทำการหมักในถัง 50 ลิตร เป็นเวลาประมาณ 1 เดือน กรองเอาตะกอนออก ล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเฉลี่ย 44 ไมครอน

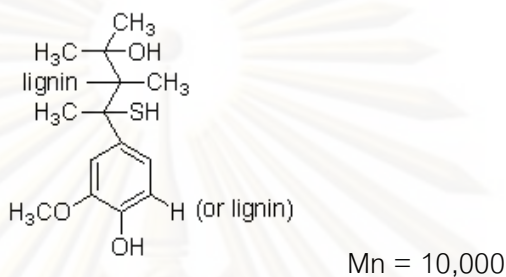
ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 สารถูกดูดซับ

3.4.2.1 ลิกนิน

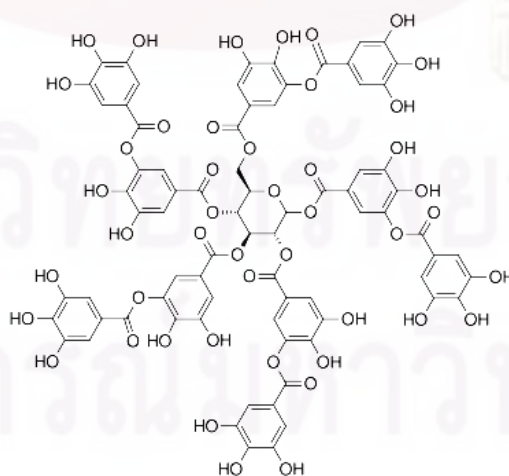
สารประกอบลิกนินที่เลือกใช้ อัลคาไลน์ลิกนิน (Alkaline lignin) (Synonyms: Lignin, kraft) มีมวลโมเลกุล 60,000 กรัมต่อโมล มีสมบัติเป็นเบส ประจุเป็นลบ สามารถละลายน้ำได้ดี วิเคราะห์ด้วย เครื่องยิวส์เปคโตรโฟโตมิเตอร์ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างโมเลกุลของอัลคาไลน์ลิกนิน

3.4.2.2 แทนนิน

สารประกอบแทนนินที่เลือกใช้ คือ แทนนิกแอซิด (Tannic Acid) (Synonyms: Gallotannin, Tannin) มีสมบัติเป็นกรดอ่อนๆ (pKa ประมาณ 6) เนื่องจากในโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย หมู่ฟีนอล มีสูตรโครงสร้างคือ $C_{76}H_{52}O_{46}$ ประจุเป็นบวก และยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีกเช่น กลูโคส และเอสเทอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ gallic acid มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อนสามารถละลายน้ำได้ดีมาก โดย 1 กรัมสามารถละลายได้ในน้ำ 0.35 มิลลิลิตร วิเคราะห์ด้วย เครื่องยิวส์เปคโตรโฟโตมิเตอร์ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างโมเลกุลของแทนนิกแอซิด

ตารางที่ 3.2 สมบัติของสารดูดซับ

สารดูดซับ	ประจุ	มวลโมลิกุล (กรัมต่อโมล)	ความยาวคลื่นที่ใช้ ตรวจวัด (นาโนเมตร)
Alkaline Lignin	ลบ	60,000	280
Tannic Acid	บวก	1701.2	254

3.5 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ ตัวกลางดูดซับ ที่ทำการเตรียมเรียบร้อยแล้ว โดยตรวจวัดค่าดังต่อไปนี้

3.5.1 การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

การหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนของ ตัวกลางดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ ไอโซเทอร์ม ของการดูดซับไนโตรเจนโดยหาจากสมการของเบท (BET) และสมการ Kelvin

3.5.2 การศึกษารูปร่าง และขนาดอนุภาค (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อศึกษารูปร่าง และขนาดอนุภาคโดยส่อง ตัวกลางดูดซับ ด้วยกำลังขยาย 350 1,500 และ 7,500 เท่า

3.5.3 การวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็น ศูนย์ (pH Point of Zero Charge (pH_{PZC})) (Al-Ghouti และคณะ ,2003)

วิธีการหาประจุบนพื้นผิวโดยทำการวัดโดยวิธีไทเทรตด้วย กรด- ด่าง มีขั้นตอนดังนี้

- นำตัวกลางดูดซับผสมกับน้ำดีไอออนซ์จำนวน 10 มิลลิลิตร หรือ 1 กรัมต่อ น้ำดีไอออนซ์ 1 ลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่
- เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร หรือ สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025โมลต่อลิตร เพื่อปรับ พีเอชให้เท่ากับ 3, 5, 7, 9 และ 11
- เจือจางส่วนผสมให้ได้ปริมาณ 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอออนซ์

4) ปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

5) นำตัวอย่างไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

6) ทำการวัดค่าพีเอช ซึ่งจะบอกความเข้มข้นของ โปรตอน (H^+) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-)

7) คำนวณหาประจุบนพื้นผิวได้จากสมการดังนี้

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

โดย $[HCl]_{add}$ คือความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)

$[NaOH]_{add}$ คือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)

$[H^+]$ คือความเข้มข้นของโปรตอน (โมลต่อลิตร) (คำนวณจาก $pH = -\log [H^+]$)

$[OH^-]$ คือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (โมลต่อลิตร) คำนวณจาก

$$pOH = -\log [OH^-] \text{ และ } pOH = 14 - pH$$

96500 คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมบ์ต่อโมล)

W คือ น้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (กรัมต่อลิตร)

นำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างค่าพีเอชและความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว เพื่อหาค่า พีเอชที่ให้ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (ค่า pH_{PZC})

3.5.4 การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธี เทอโมกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis; TGA)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีเทอโมกราวิเมตริก เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิว ถ่านกัมมันต์ โดยจะทำการวิเคราะห์ ตัวอย่าง ดังนี้ โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 40-100 องศาเซลเซียส และอัตราความร้อน 8 องศาเซลเซียสต่อนาที

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)
- 2) สารละลายอินทรีย์จากน้ำเสีย (w)
- 3) น้ำตาลที่จะนำไปทำน้ำเสียสังเคราะห์
- 4) ตะกอนจุลินทรีย์ (S)
- 5) ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)
- 6) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ทำการดูดซับมลสารจากน้ำเสียแล้ว (PACW)
- 7) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB) = PAC+S+W
- 8) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว
(PACB-Di) = PAC+S-Di+W

3.6 การศึกษาการดูดซับลิแกนด์และแทนนิน

3.6.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของลิแกนด์และแทนนินบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

1) เตรียมสารละลายสาร อัลคาไลน์ลิแกนด์ และสารละลายแทนนิกแอซิด ด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

2) เติมตัวกลางดูดซับ PAC ปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตร PACB และ PACB-Di ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร S และ S-di ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ใส่ในสารละลายอัลคาไลน์ลิแกนด์ และสารละลายแทนนิกแอซิด

3) ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 และปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

4) นำไปเขย่าในเครื่องเขย่า โดยควบคุมที่ 150 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

5) เก็บตัวอย่างสารละลายทั้งหมดตามเวลาที่กำหนดดังตารางที่ 3.3

6) นำตัวอย่างสารละลายที่ได้กรองเพื่อแยกตัวกลางดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C

7) นำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิแกนด์ และแทนนิกแอซิด โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) นำข้อมูลมาวาดกราฟความเข้มข้นระหว่างเวลากับความเข้มข้นของ อัลคาไลน์ลิแกนด์และแทนนิกแอซิดที่เหลืออยู่ เพื่อให้ได้เวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล

9) นำข้อมูลมาวาดกราฟเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order reaction) (Gulnaz และคณะ, 2006)

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

- ปฏิกิริยอันดับสองเสมือน (pseudo second-order reaction) (Gulnaz และคณะ, 2006)

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

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของอัลคาไลไนกนิน และแทนนิกแอซิดบนพื้นผิวดักกลางดูดซับ

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร			ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	พีเอช			พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	อุณหภูมิ			25±2 องศาเซลเซียส
	ค่าความแรงไอออน			0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
	ปริมาณตัวกลางดูดซับ	PAC		0.2 กรัมต่อลิตร
		PACB, PACB-Di		0.5 กรัมต่อลิตร
		S, S-Di		5 กรัมต่อลิตร
	ความเข้มข้นของอัลคาไลไนกนิน และแทนนิกแอซิด			เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
จำนวนรอบในการปั่นกว			150 รอบต่อนาที	
ตัวแปรอิสระ	เวลา	ลิกนิน	PAC, PACB, PACB-Di	5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 และ 300 นาที
			S, S-Di	1, 2, 3, 6, 12, 18, 20, 24 และ 30 ชั่วโมง
	แทนนิน	PAC, PACB, PACB-Di, S, S-Di	5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 720, 1080 และ 1440 นาที (0.083, 0.167, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 16, 18 และ 24 ชั่วโมง)	
		ชนิดของตัวกลางดูดซับ		

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิดที่เหลืออยู่	-

3.6.2 การศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์ม ในการดูดซับอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิด

1) เตรียมสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินโดยละลายกับน้ำกลั่น ความเข้มข้น ดังนี้คือ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร และแทนนิกแอซิดละลายกับน้ำกลั่นความเข้มข้นดังนี้คือ 50, 100, 200, 300, 400, 500, 700 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

2) เติมตัวกลางดูดซับ PAC ปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตร PACB และ PACB-Di ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร S และ S-di ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ใส่ในสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน และสารละลายแทนนิกแอซิด

3) ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 และปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

4) นำไปเขย่าในเครื่องเขย่า โดยควบคุมที่ 150 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

5) เก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อถึงเวลาเข้าสู่สมดุลโดยใช้ข้อมูลจาก การศึกษา จลนพลศาสตร์ของลิกนิน (จากการทดลองที่ 3.6.1)

6) นำสารละลายที่ได้กรองเพื่อแยก ตัวกลางดูดซับ ออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C

7) นำสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิด โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

8) นำข้อมูลมาวาดกราฟระหว่างความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิด ที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับอัลคาไลน์ลิกนิน และแทนนิกแอซิด เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด

9) นำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟเพื่อหาไอโซเทอร์มการดูดซับที่เหมาะสมในการอธิบาย กระบวนการดูดซับ ไอโซเทอร์มที่ใช้มีดังนี้

- ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์

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

- ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

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

โดย q คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวกลางดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

$K, 1/n$ คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

B คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงมัวร์

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลไนลิกนิน และแทนนิกแอซิด

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	
ตัวแปรควบคุม	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์	
	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส	
	ค่าความแรงไอออน	0.01 โมลาร์ โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์	
	ปริมาณตัวกลางดูดซับ	PAC	0.2 กรัมต่อลิตร
		PACB, PACB-Di,	0.5 กรัมต่อลิตร
		S, S-Di	5 กรัมต่อลิตร
เวลา	เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.6.1)		
จำนวนรอบในการปั่นกว	150 รอบต่อนาที		
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารละลาย	อัลคาไลนิกนิน	50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
		แทนนิกแอซิด	50, 100, 200, 300, 400, 500, 700

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
		และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ชนิดของตัวกลางดูดซับ	<ul style="list-style-type: none"> - ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di) - ตะกอนจุลินทรีย์ (S) - ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิทมิ้นและแทนนิกแอซิด ที่เหลืออยู่	-

3.6.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลน์ลิทมิ้นและแทนนิกแอซิด

1) เตรียมสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้นโดยละลายกับน้ำกลั่น ความเข้มข้น ดังนี้คือ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร และแทนนิกแอซิดละลายกับน้ำกลั่น ความเข้มข้นดังนี้คือ 50, 100, 200, 300, 400, 500, 700 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

2) เติมตัวกลางดูดซับ PAC ปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตร PACB และ PACB-Di ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร S และ S-di ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ใส่ในสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้นและสารละลายแทนนิกแอซิด

3) ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 5, 7 และ 9 และปรับค่าความแรงไอออน (ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ชนิดโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

4) นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กโดยควบคุมที่ 150 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียสในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

5) เก็บตัวอย่างสารละลายเมื่อถึงเวลาเข้าสู่สมดุลโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของอัลคาไลน์ลิทมิ้น และแทนนิกแอซิด

6) นำสารละลายที่ได้กรองเพื่อแยก ตัวกลางดูดซับ ออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

GF/C

7) นำสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของอัลคาไลน์ลิกันโดยเครื่องยูวี - วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

8) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นอัลคาไลน์ลิกัน และแทนนิก แอซิดที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับ เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด กราฟที่คาดว่าจะได้จากการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

9) นำค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดมา เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอัลคาไลน์ ลิกันและแทนนิกแอซิด

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร		ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ		25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณตัวกลาง ดูดซับ	PAC	0.2 กรัมต่อลิตร
		PACB, PACB-Di	0.5 กรัมต่อลิตร
		S, S-Di	5 กรัมต่อลิตร
	ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ลิกัน และแทนนิกแอซิด		ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
	เวลา		เข้าสู่สมดุล (จากการทดลองที่ 3.6.1)
	ค่าความแรงไอออน		0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์
จำนวนรอบในการปั่นกว		150 รอบต่อนาที	
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของ สารละลาย	อัลคาไลน์ ลิกัน	50, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
		แทนนิกแอ ซิด	50, 100, 200, 300, 400, 500, 700 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
	พีเอช		พีเอชเท่ากับ 5 7 และ 9 โดยใช้ฟอสเฟต บัฟเฟอร์

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
	ชนิดของตัวกลางดูดซับ	<ul style="list-style-type: none"> - ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว(PACB) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di) - ตะกอนจุลินทรีย์(S) - ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของลิกนินและแทนนิกแอซิดที่เหลืออยู่	-



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวกลางดูดซับ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลาง 5 ชนิด คือ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di โดยวิเคราะห์ถึงลักษณะสมบัติของตัวกลางดูดซับ ดังนี้

- พื้นที่ผิว โดยใช้ในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวและคำนวณด้วยสมการ BET
- ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- ประจุบนพื้นผิว โดยใช้วิธีการไทเทรต กรด-เบส
- การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธี เทอโมกราฟีเมทริก

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติ ทางกายภาพและทางเคมีของตัวกลางดูดซับจะนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลของการทดสอบจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์ม การดูดซับ เพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง สมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น พื้นที่ผิว และ ประจุบนพื้นผิว ต่อประสิทธิภาพการดูดซับลิแกนด์และแทนนิน

4.1.1 พื้นที่ผิวของตัวกลางดูดซับ

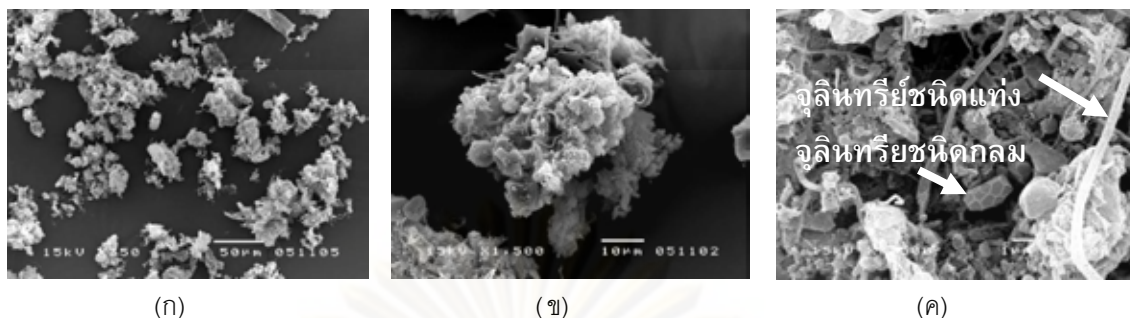
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวโดยใช้การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวและคำนวณด้วยสมการ BET พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (PAC) มีค่าสูงกว่าตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น วัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB และ PACB-Di) ประมาณ 12-16 เท่า เนื่องจากจุลชีพเกาะอยู่บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ปกคลุม และปิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ดังภาพที่ 4.1 จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ ตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น วัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB และ PACB-Di) น้อยกว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (PAC) มาก เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เกิดจากรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์ (PAC) มีค่าสูงกว่าตัวกลางประเภทสไลด์จ์ (S และ S-Di) ประมาณ 124-230 เท่า เนื่องจากตัวกลางดูดซับประเภท สไลด์จ์ไม่มีลักษณะของความเป็นรูพรุน คือมีปริมาตรรูพรุนที่เล็กมากและมีขนาดความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่ จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย ดังนั้นตัวกลางดูดซับ กลุ่มถ่านกัมมันต์ PAC, PACB และ PACB-Di จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ตัวกลางดูดซับกลุ่มสไลด์จ์ S และ S-Di มาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่านั่นเอง

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดซับ

ตัวกลางดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (°A)
PAC	945.6	0.068	19.7
PACB	74.2	0.054	40.0
PACB-Di	57.1	0.059	46.8
S	7.6	0.024	122.0
S-Di	4.1	0.020	177.8

4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่า ภาพที่ 4.1 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนก่อนนำไปอบให้แห้งเพื่อนำมาเป็น ตัวกลางดูดซับ บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์พบ จุลินทรีย์จับตัวแบบห่อหุ้มล้อมรอบถ่านกัมมันต์ชนิดผงและพบจุลชีพชนิดแท่ง ชนิดกลม และ ชนิดเกลียวรวมตัวจับกันรอบถ่านกัมมันต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนจะทำให้มีจุลชีพมาเกาะอยู่ รอบถ่านกัมมันต์ และปกคลุมปิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ภาพที่ 4.2 แสดงถึงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ที่ยังไม่ได้ใช้เป็น ตัวกลางดูดซับ มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ภาพที่ 4.3 คือ ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว ที่จะนำมาใช้เป็น ตัวกลางดูดซับ (PACB) มีความแตกต่างจากพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนก่อนนำไปอบให้แห้ง คือ จะมีลักษณะคล้ายเศษดินก้อนเล็กๆ เกาะบนผิวถ่านกัมมันต์ ปกคลุมรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากจุลชีพที่เกาะบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ได้ถูกทำให้แห้ง โดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการอบและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็น ตัวกลางดูดซับ จึงไม่เห็นลักษณะของจุลชีพ ภาพที่ 4.4 คือ ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเป็น วัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการอบและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็น ตัวกลางดูดซับ (PACB-Di) จะมีลักษณะใกล้เคียงกับภาพที่ 4.3 หรือ PACB ส่วนภาพที่ 4.5 และ 4.6 คือ ตะกอนจุลินทรีย์ (S) และ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di) มีลักษณะใกล้เคียงกันคือ มีลักษณะเป็นคล้ายเศษดินแห้งเล็กๆ จับตัวกันเป็นก้อน ไม่พบลักษณะของความเป็นรูพรุนแต่พบ ลักษณะเป็นร่อง และรอยแตกเล็กๆ



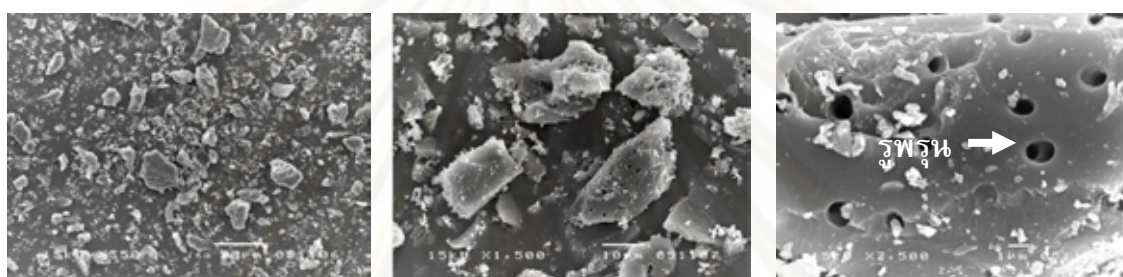
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน ก่อนนำไปอบให้แห้งเพื่อนำมาเป็นตัวกลางดูดซับ

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า



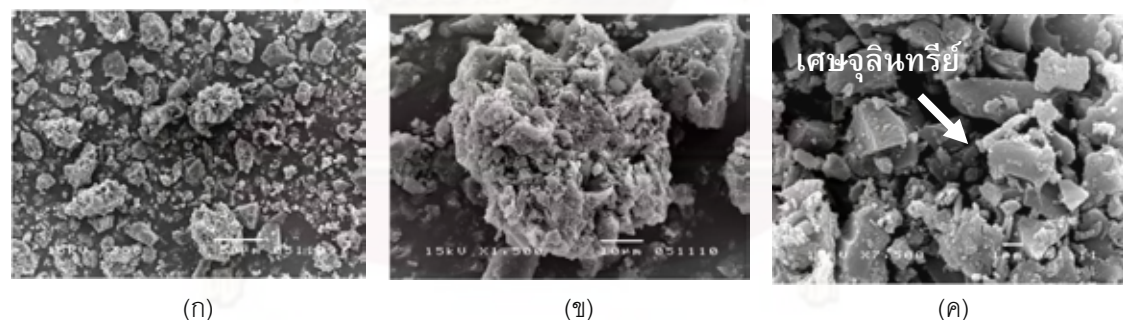
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ได้ถูกใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน (PAC)

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า



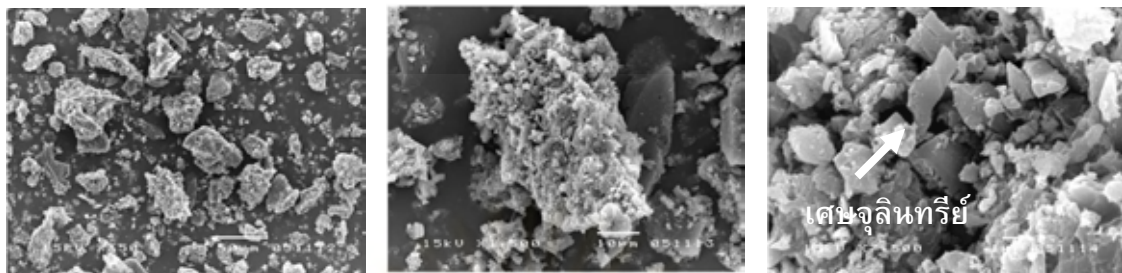
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว นำไปอบที่ อุณหภูมิ 105 °C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (PACB)

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า



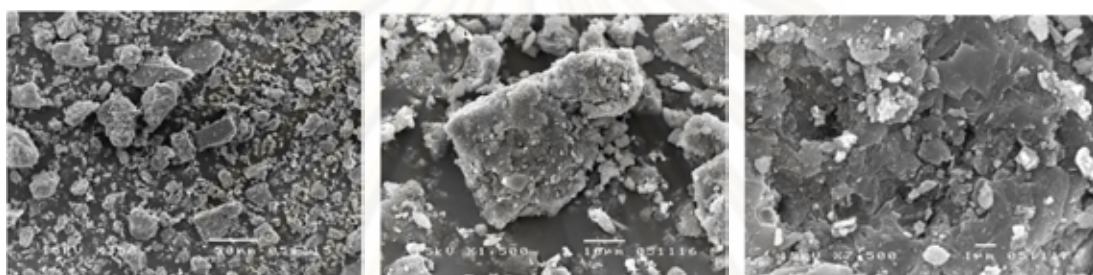
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่เรียบร้อยแล้ว นำไปบดที่อุณหภูมิ 105°C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (PACB-Di)

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า



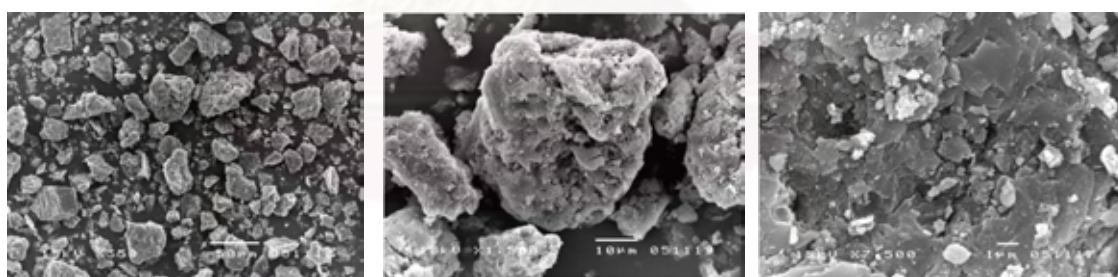
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนจุลินทรีย์ นำไปบดที่อุณหภูมิ 105°C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (S)

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า



(ก)

(ข)

(ค)

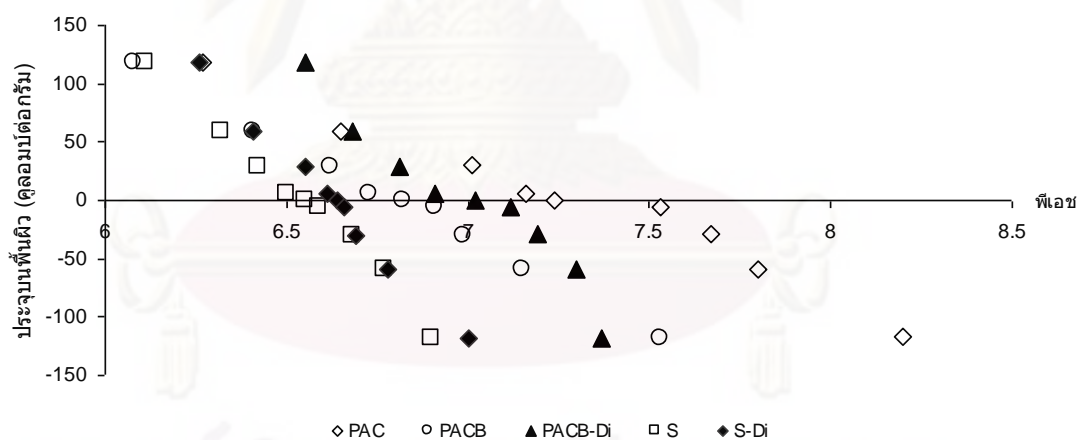
ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนจุลินทรีย์ นำไปบดที่อุณหภูมิ 105°C ผ่านการบดและคัดขนาด เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับ (S-Di)

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 7,500 เท่า

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

การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวดักกลางดูดซับด้วยวิธีไทเทรตด้วย กรด-ด่าง โดยทำเพื่อวิเคราะห์ว่าบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับมีประจุเป็น เช่นไร ที่น้ำเสียพีเอชต่างๆ โดยให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.2 จากผลของพีเอชที่ Point of Zero Charge (pH_{pzc}) ที่ได้จากการทดลองพบว่า PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7.24, 6.82, 7.02, 6.55 และ 6.64 ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยควบคุมสารละลายให้มีค่าพีเอชที่ 5, 7 และ 9 ซึ่งจะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวของ ตัวกลางดูดซับ แต่ละชนิดดังนี้ PACB ,S ,S-Di มีค่า pH_{PZC} เท่ากับ 6.82, 6.55 และ 6.64 ซึ่งในสารละลายพีเอช 5 จะมีประจุบวกบนพื้นผิว แต่ในสารละลายพีเอช 7 และ 9 ส่งผลให้มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบมากขึ้น สำหรับ ตัวกลางดูดซับ PAC และ PACB-Di ในสารละลายพีเอช 9 ส่งผลให้เกิดประจุลบบนพื้นผิว ตัวกลางดูดซับ แต่ในสารละลายพีเอช 5 และ 7 จะมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกมากขึ้น ซึ่ง PAC และ PACB-Di ที่สารละลายพีเอช 7 จะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวดักกลางดูดซับเล็กน้อยเนื่องจากมีค่า pH_{PZC} ใกล้เคียงพีเอช 7



ภาพที่ 4.7 ความหนาแน่นของประจุที่ค่าพีเอชต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ค่า pH_{PZC} และประจุของ ตัวกลางดูดซับ ในสารละลายพีเอชต่างๆ

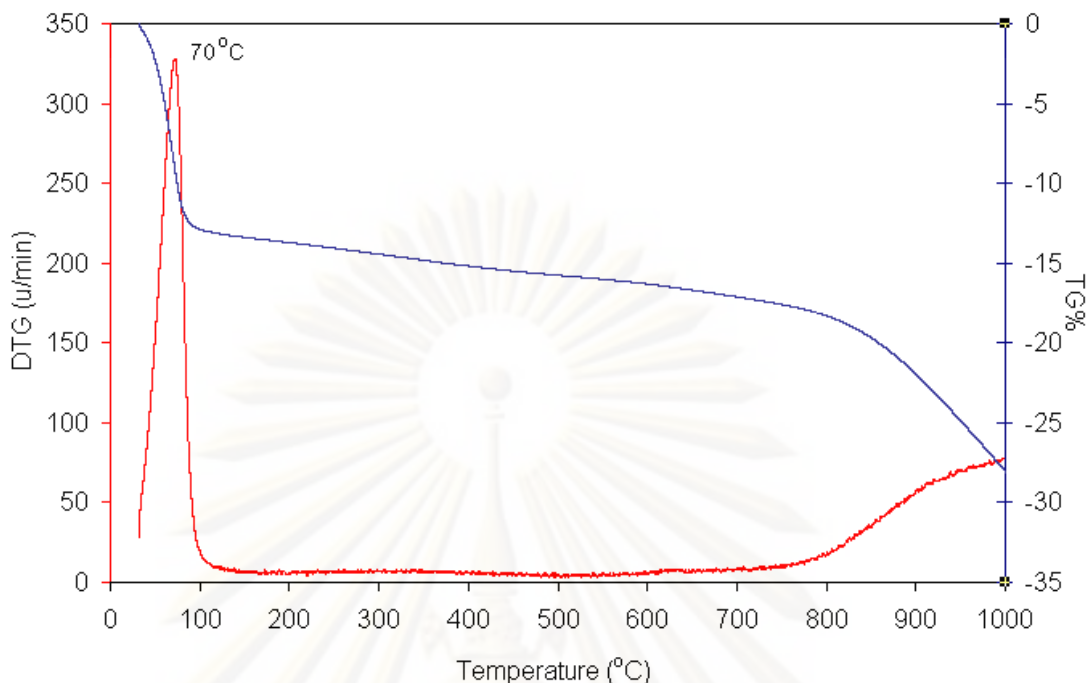
ตัวกลางดูดซับ	pH_{PZC}	ประจุบนพื้นผิว		
		พีเอช 5	พีเอช 7	พีเอช 9
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	7.24	+	กลาง,+	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB)	6.82	+	กลาง,-	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di)	7.02	+	กลาง	-
ตะกอนจุลินทรีย์(S)	6.55	+	กลาง,-	-
ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)	6.64	+	กลาง,-	-

4.1.4 การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธี เทอโมกราวิเมตริก (Thermal Gravimetric Analysis; TGA)

การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณจุลชีพบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีเทอโมกราวิเมตริก โดยทำการวิเคราะห์สารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด ว่ามีความสัมพันธ์กันเช่นไร เพื่อหา สมดุลมวลสาร (Mass balance) เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนจุลชีพที่มีใน PACB และ PACB-Di ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดังนี้

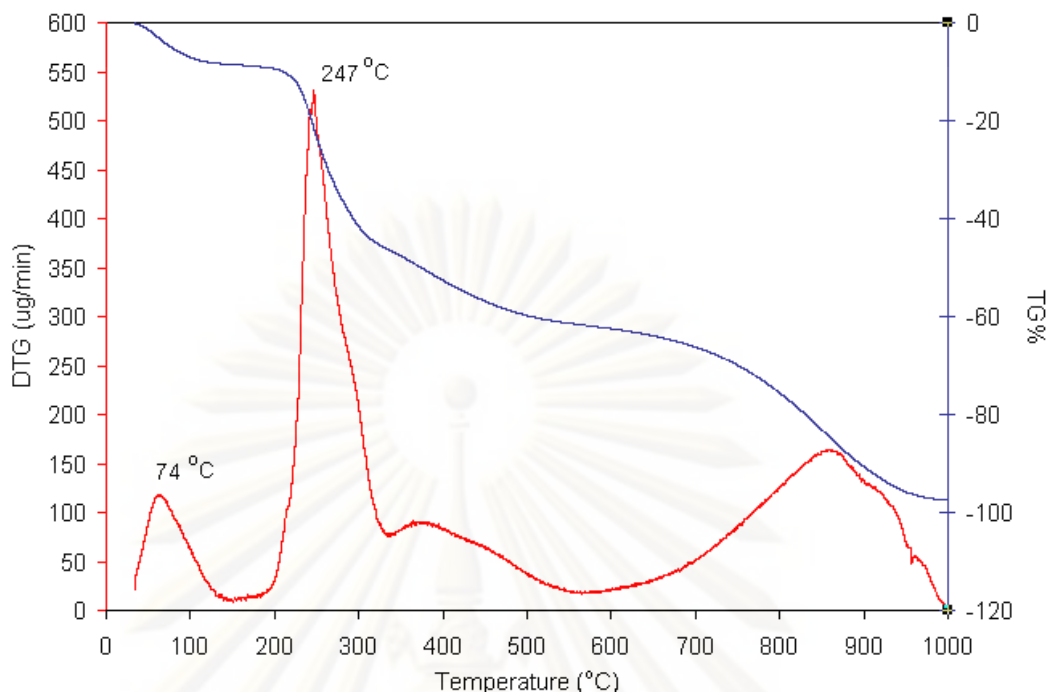
- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)
- 2) สารละลายอินทรีย์จากน้ำเสีย (w)
- 3) น้ำตาลที่จะนำไปทำน้ำเสียสังเคราะห์
- 4) ตะกอนจุลินทรีย์(S)
- 5) ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)
- 6) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ทำการดูดซับมลสารจากน้ำเสียแล้ว(PACW)
- 7) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB) = PAC+S+W
- 8) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว
(PACB-Di) = PAC+S-Di+W

โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 40-100 องศาเซลเซียส และอัตราความร้อน 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.8 – 4-15 และตารางที่ 4.3 และ 4.4



ภาพที่ 4.8 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PAC

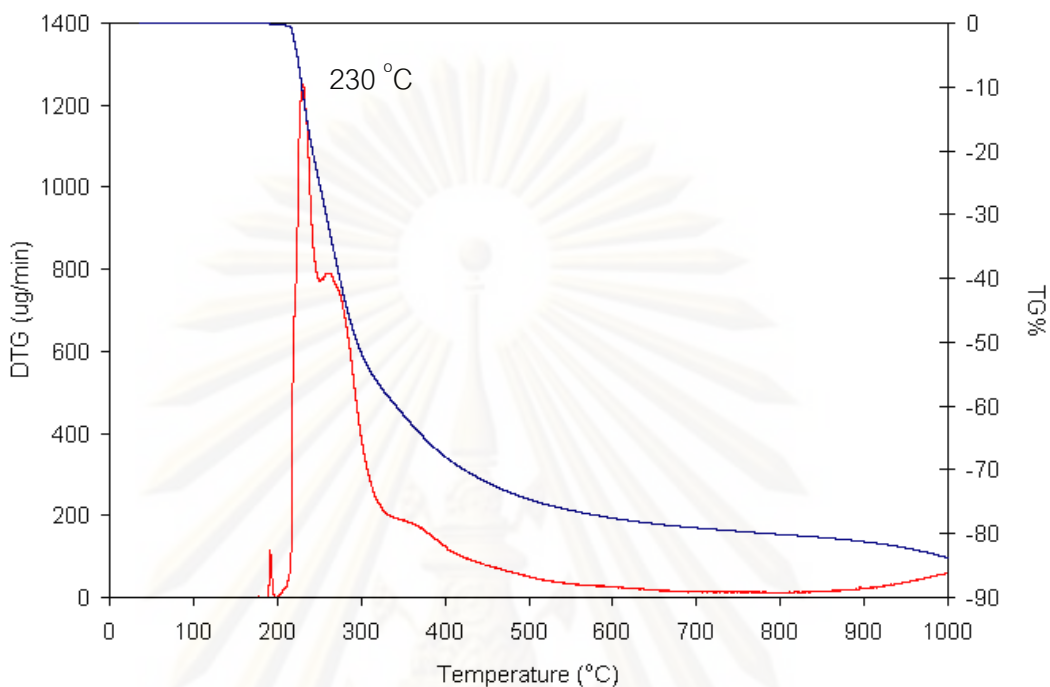
เทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดลองดีฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส โดยพิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงได้ถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ หรือเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยกราฟ DTA ของตัวกลางดูดซับ PAC มีจุดสูงสุดของกราฟ 1 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เมื่อ แบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงขั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน พบว่า ขั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 12.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป ขั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียสซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ (Gea, Murillo และ Arauso, 2002), (Nassar, 2003) และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอนินทรีย์ (Sanchez และคณะ, 2004) โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 5.41 เปอร์เซ็นต์ ส่วนขั้นต่อไปคือตั้งแต่วงอุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียสเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ที่สลายตัวยาก คิดเป็น 9.75 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมिन้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 71.96 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.9 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ W

จากภาพที่ 4.9 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสีย น้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ของ สารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย (W) เพื่อพิจารณาว่าในน้ำเสียประกอบไปด้วยองค์ประกอบ ที่สามารถย่อยสลายที่อุณหภูมิ ไตบ้าง โดยกราฟ DGA จากกราฟพบว่ามีจุดสูงสุดของกราฟ 2 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 74 และ 247 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแตกต่างจาก PAC อย่างเห็นได้ชัดคือ PAC มีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุดเพียงจุดเดียวคือ 70 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการระเหยของน้ำ ส่วนที่เพิ่มมาคือจุดสูงสุดของกราฟที่ 247 องศาเซลเซียส นี่เป็นการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียนั่นเอง โดยการสลายตัวได้ความร้อนของ W เมื่อแบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงชั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ชั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 7.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และชั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอนินทรีย์ โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 68.53 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่มาก ชั้นต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 - 1000 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างสารอนินทรีย์ที่ สลายตัวยากคิดเป็น

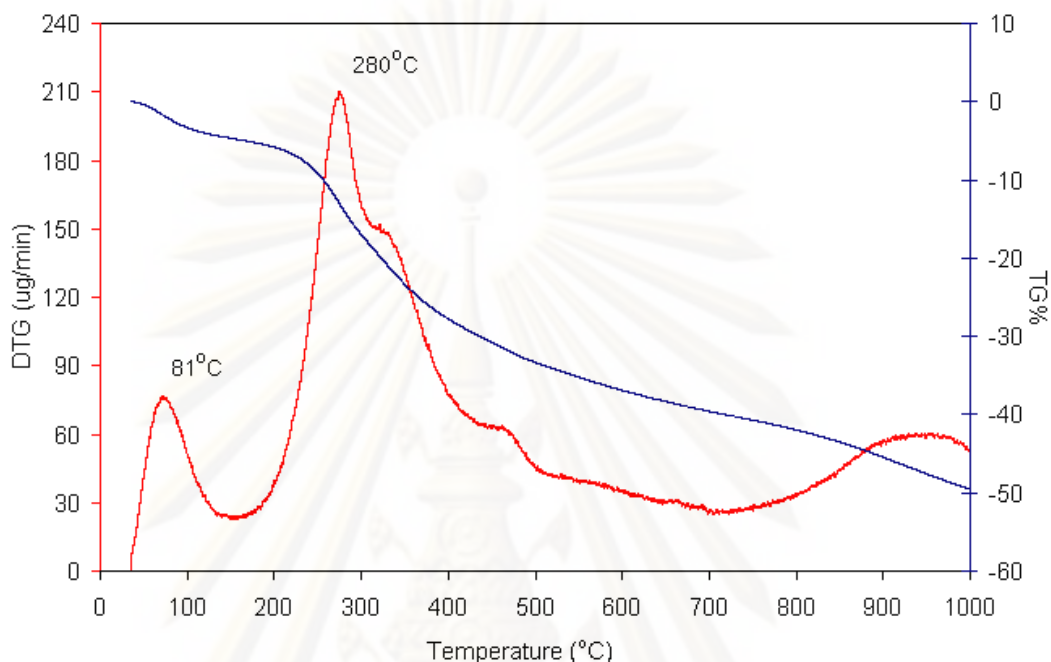
21.77 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็น นสารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิ น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 2.64 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.10 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ น้ำตาลที่นำไปเตรียมเป็นน้ำเสีย

จากภาพที่ 4.10 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงถึงช่วงที่มีอัตราการ สูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำตาล เพื่อพิจารณาว่าสอดคล้องกับน้ำเสียที่เราเตรียม ขึ้นมาหรือไม่ โดยกราฟ DGA จากกราฟพบว่ามีจุดสูงสุดของกราฟ 1 จุด คือที่อุณหภูมิ ประมาณ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งจะต่ำกว่า W คือ 247 องศาเซลเซียส แต่มีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ยัง ประกอบไปด้วยสารอื่นๆ อีกที่สามารถย่อยสลายได้ใน อุณหภูมิที่สูงกว่าน้ำตาล ซึ่งจะแตกต่างจาก S และ S-Di อย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง S และ S-Di จะมี จุดสูงสุดของกราฟที่อุณหภูมิสูงกว่าคือประมาณ 280-340 องศาเซลเซียส เมื่อแบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงชั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ชั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 0.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วน ใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และชั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และ การสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอนินทรีย์ โดยจะ คิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 80.08 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าในน้ำตาล มีองค์ประกอบ ของสารอินทรีย์อยู่ มากและย่อยสลายได้ง่าย ชั้นต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศา

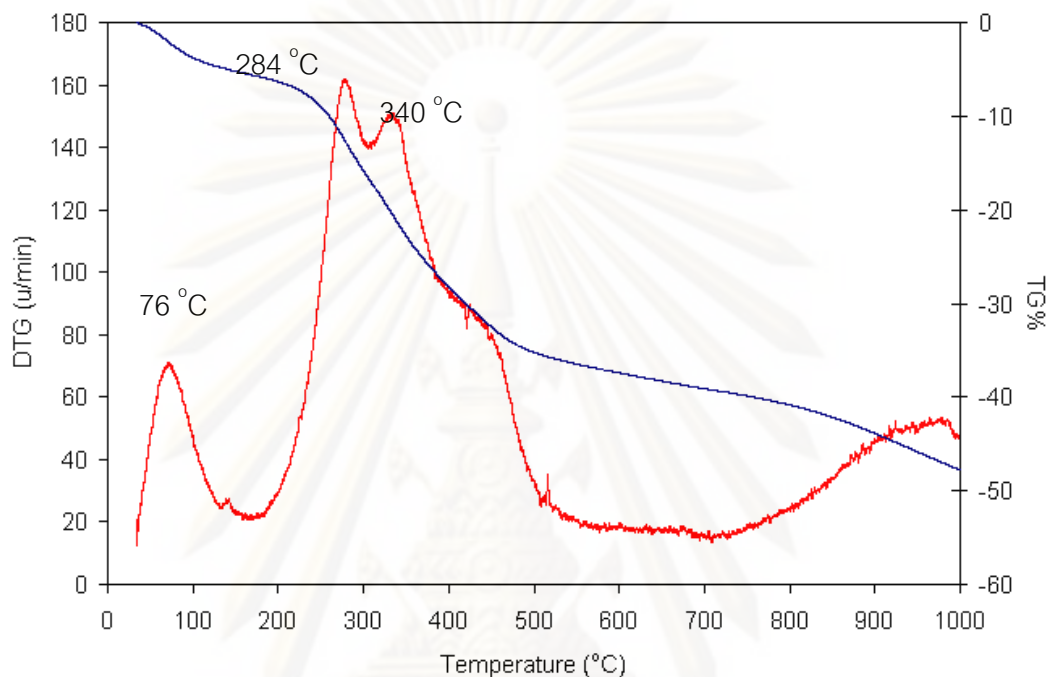
เซลเซียสเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างสารอินทรีย์ที่ สลายตัวยากคิดเป็น 3.63 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็น สารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 16.2 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.11 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ S

จากภาพที่ 4.11 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ของตะกอนจุลินทรีย์ หรือ S เพื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ในตะกอนจุลินทรีย์ โดยกราฟ DGA จากกราฟพบว่าจุดสูงสุดของกราฟ 2 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 81 และ 280 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของ S มีค่าต่างจาก W เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์คนละชนิดกันคืออุณหภูมิที่จุดสูงสุดของ W มีค่าเท่ากับ 74 และ 247 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์สามารถ ถูกย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า น้ำเสียเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า เมื่อแบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงขั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ขั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 3.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และขั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่วางอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอินทรีย์โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 38.63 เปอร์เซ็นต์ซึ่งนับว่าเป็นสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับ PAC เนื่องจาก

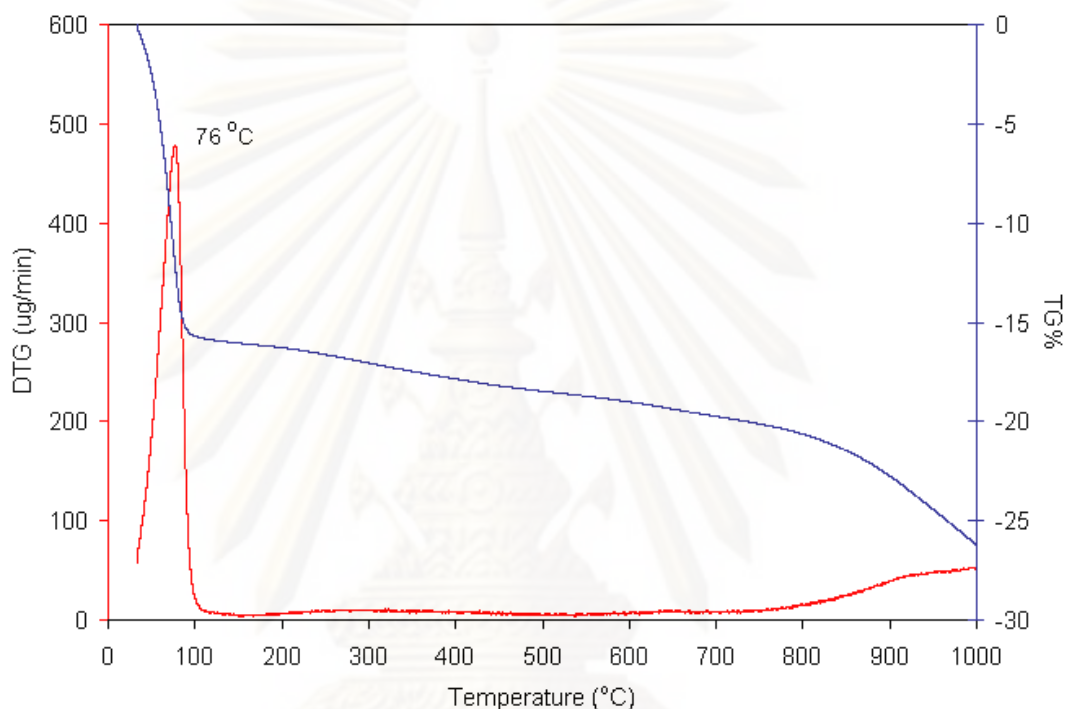
องค์ประกอบของ S มีเพียงตะกอนจุลินทรีย์เท่านั้น จึงเกิดการสลายตัวได้มาก ขึ้นต่อไปคือตั้งแต่ อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างสารอินทรีย์ที่สลายตัว ยากคิดเป็น 7.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็น สารซึ่งไม่สามารถสลายตัว ที่อุณหภูมिन้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 50.47 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.12 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ S-Di

จากภาพที่ 4.12 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ของ ตะกอนจุลินทรีย์ ที่ย่อยแล้ว หรือ S-Di เพื่อพิจารณาถึง องค์ประกอบต่างๆในตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว โดยกราฟ DGA จากกราฟพบว่าจุดสูงสุดของ กราฟ 3 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 76, 284 และ 340 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอุณหภูมิสูงสุด ของ S-Di มีค่าต่างจาก W เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ต่างชนิดกันคืออุณหภูมิที่จุดสูงสุดของ W มี ค่าเท่ากับ 74 และ 247 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์สามารถ ถูกย่อย สลายได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า น้ำเสียเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า เมื่อแบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงชั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ชั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 3.76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วน ใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และชั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และ การสลายตัวที่อุณหภูมิสูง กว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอินทรีย์โดยจะ

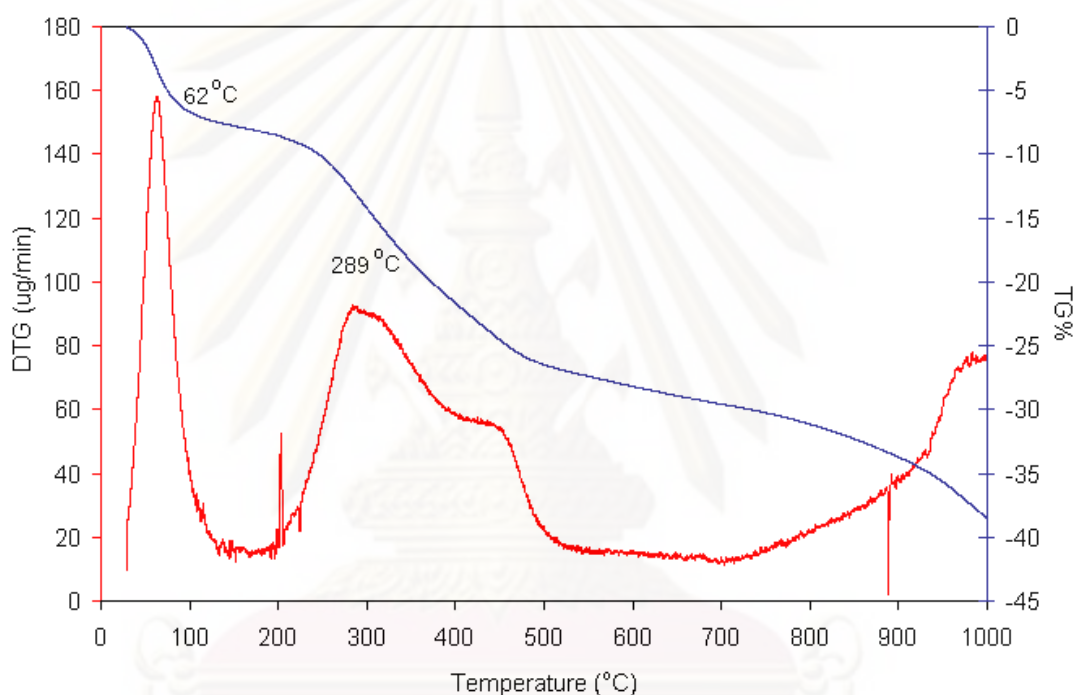
คิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 37.07 เปอร์เซ็นต์ซึ่งนับว่าเป็นสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับ PAC เนื่องจากองค์ประกอบของ S-Di มีเพียงตะกอนจุลินทรีย์เท่านั้น จึงเกิดการสลายตัวได้มาก ขั้นตอนต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างสารอินทรีย์ที่สลายตัวยาก คิดเป็น 10.76 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็น นสารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 52.23 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.13 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของ PACW

จากภาพที่ 4.13 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงได้ถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ หรือเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยกราฟ DGA ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านดูดซับมลสารจากน้ำเสียแล้ว หรือ PACW โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบกับ PAC ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน และเพื่อตรวจสอบว่า เมื่อนำ PAC ไปดูดซับมลสารในน้ำเสียแล้วจะทำให้มีสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ เกาะบนพื้นผิวของ PAC หรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า มีจุดสูงสุดของกราฟ 1 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 76 องศาเซลเซียส และไม่พบจุดสูงสุดของอุณหภูมิประมาณ 247 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พบการสลายตัวสูงสุดของ W จึงถือว่าไม่มีความแตกต่างกับ PAC ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งานเท่าใดนัก และเมื่อ แบ่งกราฟ TGA ออกเป็น 3 ช่วงขั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ขั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 15.70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิด

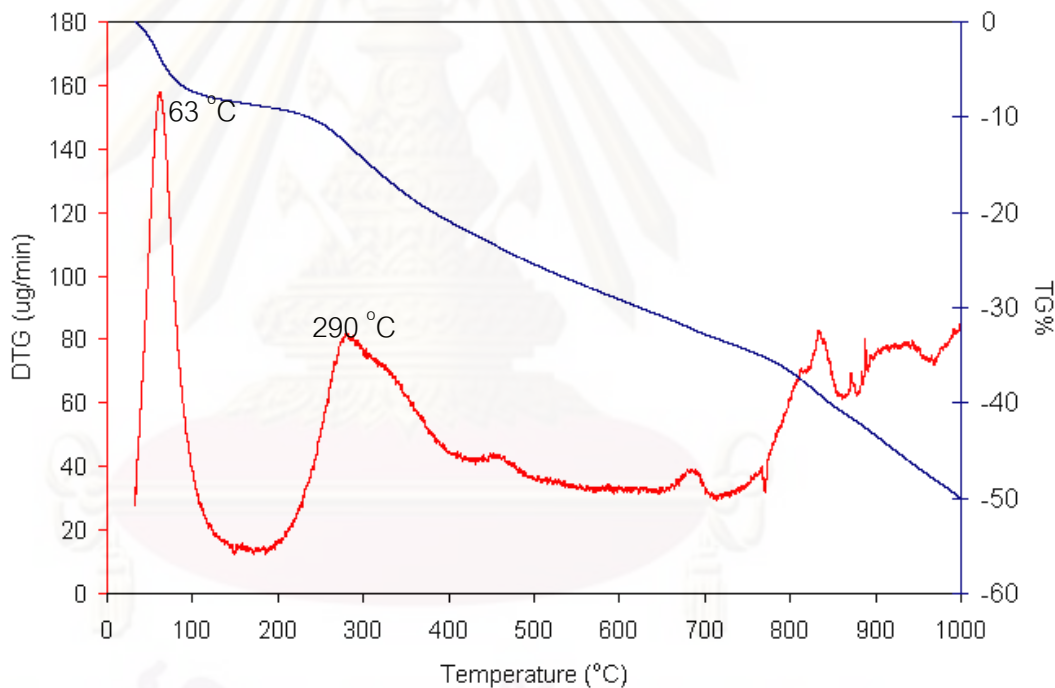
จากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไปโดยพบว่าจะมีความชื้นมากกว่า PAC เล็กน้อย และขั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอนินทรีย์โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 4.94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PAC ที่ยังไม่ถูกใช้งานคือ 5.41 เปอร์เซ็นต์ ขั้นต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ที่สลายตัวยาก คิดเป็น 5.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็น สารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 73.78 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.14 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PACB

จากภาพที่ 4.12 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงได้ถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ หรือเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยกราฟ DGA ของตัวกลางดูดซับ PACB มีจุดสูงสุดของกราฟ 2 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 62 และ 289 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่พบจุดสูงสุดของกราฟที่อุณหภูมิประมาณ 247 องศาเซลเซียสดังนั้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจึงไม่มีนัยสำคัญมากนัก ส่วนจุดสูงสุดที่ 289 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกับจุดสูงสุดของ S คือที่ประมาณ 280 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการสลายตัวด้วยความร้อนของตะกอนจุลินทรีย์นั่นเอง จากกราฟ TGA เมื่อแบ่งออกเป็น 3 ช่วงขั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ขั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่

หายไป 6.68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และ
 ชั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัว
 ของพอลิเมอร์ประกอบอินทรีย์ และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็น
 สลายตัวของพอลิเมอร์อินทรีย์โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 24.47 เปอร์เซ็นต์ โดย
 พบว่าในส่วนนี้ จะมีมากกว่า PAC ซึ่งในส่วนของการอินทรีย์ในสัดส่วนนี้พบว่ามีมากกว่า PAC และ
 PACW ที่มีเพียง 5.41 และ 4.94 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากจุดชีพที่เกาะอยู่นั้นมีลักษณะเป็น
 สารอินทรีย์เป็นส่วนมากและอินทรีย์อีกบางส่วน ขึ้นต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศา
 เซลเซียสเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ที่สลายตัวยาก คิดเป็น 7.01 เปอร์เซ็นต์
 ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิน้อยกว่า 1000
 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 61.48 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.15 เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวกลางดูดซับ PACB-Di

จากภาพที่ 4.15 พิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงได้ถึงช่วงที่มีอัตราการ
 สูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ หรือเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยกราฟ DGA ของตัวกลาง
 ดูดซับ PACB-Di มีจุดสูงสุดของกราฟ 2 จุด คือที่อุณหภูมิประมาณ 63 และ 290 องศาเซลเซียส
 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับจุดสูงสุดของ PACB เป็นอย่างมาก ซึ่งไม่พบจุดสูงสุดของกราฟที่อุณหภูมิ
 ประมาณ 247 องศาเซลเซียสดังนั้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจึงไม่เป็นส่วน สำคัญมากนัก ส่วน

จุดสูงสุดที่ 290 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกับจุดสูงสุดของ S-Di คือที่ประมาณ 280 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการสลายตัวด้วยความร้อนของตะกอนจุลินทรีย์ ที่ย่อยแล้วนั่นเอง จากกราฟ TGA เมื่อแบ่งออกเป็น 3 ช่วงชั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ชั้นแรกที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 7.30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป และชั้นที่สองจะคิดที่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ และการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นสลายตัวของพวกสารอินทรีย์โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 29.39 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าในส่วนนี้ จะมีมากกว่า PAC ซึ่งในส่วนของสารอินทรีย์ในสัดส่วนนี้พบว่ามากกว่า PAC และ PACW ที่มีเพียง 5.41 และ 4.94 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากจุลชีพที่เกาะอยู่บนนั้นลักษณะเป็นสารอินทรีย์เป็นส่วนมากและอินทรีย์อีกบางส่วน ชั้นต่อไปคือตั้งแต่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียสเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ที่สลายตัวยาก คิดเป็น 13.32 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสารซึ่งไม่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมಿನ้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ คิดเป็น 49.99 เปอร์เซ็นต์

จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA สรุปได้ว่าตัวกลางดูดซับ ประเภท PACB มีสัดส่วนของจุลชีพที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวประมาณ 24.47 เปอร์เซ็นต์ และ PACB-Di มีสัดส่วนของจุลชีพที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวประมาณ 29.36 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบผลการทดลอง TGA และ DTG ไม่พบการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำเสีย (W) ทั้งในกรณี PACW และ PACB ซึ่งอาจเกิดจากการที่ปริมาณสารอินทรีย์ ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน กัมมันต์มีไม่มากพอที่จะวิเคราะห์ได้ หรือความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีความเข้มข้นที่ไม่มากพอที่จะสามารถทำให้เกิดจุดสูงสุดของกราฟอย่างเห็นได้ชัด

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของตัวกลางดูดซับคิดเป็นน้ำหนัก

ตัวกลางดูดซับ	น้ำหนัก รวม (มก.)	ความชื้น (มก.) ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	สารอินทรีย์ ระเหยง่าย (มก.) ($100\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$)	โครงสร้างที่ สลายตัวยาก (มก.) ($800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)	ส่วนที่ เหลือ (มก.)
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	11.29	1.45	0.61	1.10	8.12
สารละลายอินทรีย์จาก น้ำเสีย (w)	11.02	0.78	7.55	2.40	0.29
ตะกอนจุลินทรีย์(S)	14.34	0.48	5.54	1.09	7.24
ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อย แล้ว (S-Di)	12.80	0.48	4.84	1.37	6.11
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ทำ การดูดซับมลสารจากน้ำ เสียแล้ว(PACW)	13.75	2.16	0.68	0.77	10.14
น้ำตาลที่จะนำไปเตรียม น้ำเสีย	15.30	0.004	12.25	0.55	2.496
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่าน การใช้เป็นวัสดุช่วย ตกตะกอนแล้ว (PACB)	12.46	0.83	3.05	0.87	7.66
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่าน การใช้เป็นวัสดุช่วย ตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di)	11.75	0.85	3.45	1.56	5.89

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของตัวกลางดูดซับคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ตัวกลางดูดซับ	ความชื้น (%)	สารละลายอินทรีย์จากน้ำเสีย (%)	จุลชีพและสารอินทรีย์อื่นๆ (%)	ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) (%)
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	12.84	-	-	87.16
สารละลายอินทรีย์จากน้ำเสีย (w)	7.08	92.92	-	-
ตะกอนจุลินทรีย์(S)	3.35	-	96.65	-
ตะกอนจุลินทรีย์ที่ย่อยแล้ว (S-Di)	3.76	-	96.24	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ทำการดูดซับมลสารจากน้ำเสียแล้ว (PACW)	15.71	-	-	84.29
น้ำตาลที่จะนำไปเตรียมน้ำเสีย	0.03	83.71	-	-
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว (PACB)	6.66	-	24.48	68.86
ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ย่อยแล้ว (PACB-Di)	7.30	-	29.36	63.34

4.2 การดูดซับลิกันและแทนนิน

ในงานวิจัยนี้ได้นำ ตัวกลางดูดซับที่เตรียมไว้ทั้ง 5 ชนิดมาศึกษาความสามารถในการดูดซับลิกันและแทนนินจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการศึกษา จลนพลศาสตร์ และ ไอโซเทอร์มในการดูดซับ รวมถึงผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับลิกันและแทนนินโดยการทำการศึกษาแบบทีละเท (Batch test)

4.2.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับลิกันและแทนนินบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

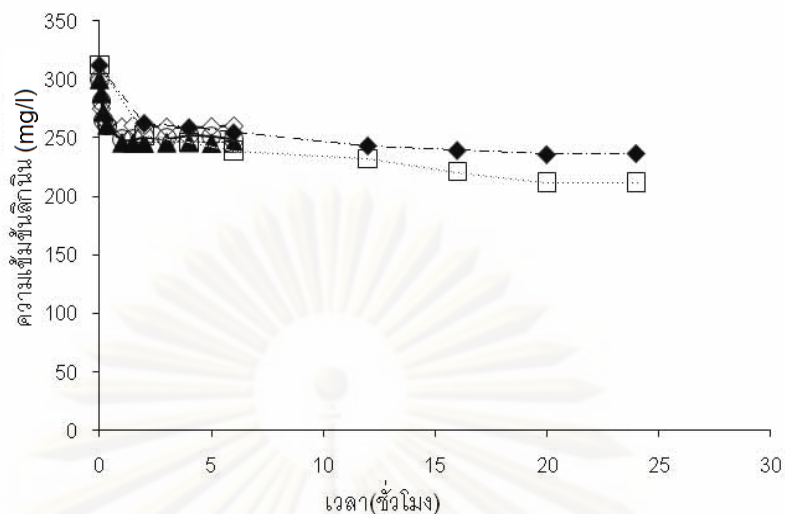
ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของลิกันและแทนนินบนพื้นผิว ตัวกลางดูดซับ ทั้ง 5 ชนิด เพื่อทราบเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล และนำเวลาที่ได้ใช้ในการทดสอบ ไอโซเทอร์ม การดูดซับต่อไป โดยทำการควบคุมปัจจัยในการศึกษาดังนี้คือ พีเอชของสารละลายลิกันและแทนนินมีค่าเท่ากับ 7 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับลิกันเข้าสู่สมดุลดังนี้ คือ ตัวกลางดูดซับ PAC, PACB และ PACB-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก ส่วนตัวกลางดูดซับ S และ S-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 20 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.16 (ก)

ส่วนผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับแทนนินเข้าสู่สมดุลดังนี้ คือ ตัวกลางดูดซับ PAC, PACB และ PACB-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนตัวกลางดูดซับ S และ S-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.16 (ข) โดยจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารทั้งสองชนิดพบว่า ตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ คือ PAC, PACB และ PACB-Di จะสามารถเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ต่าง จากตัวกลางดูดซับ ประเภทสัจฉริยะเป็นอย่างมาก อาจเนื่องจาก PAC เป็นตัวกลางดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวหลายชนิดและมีพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้มีอัตราการดูดซับสารทั้งสองชนิดสูง (พิชามญชุ์ พัฒรชนม์, 2551) โดยมีอัตราการดูดซับสูงกว่าตัวกลางดูดซับประเภทสัจฉริยะมากเมื่อ เทียบความสามารถในการดูดซับในหน่วย กรัมต่อกรัม ตัวกลางดูดซับ

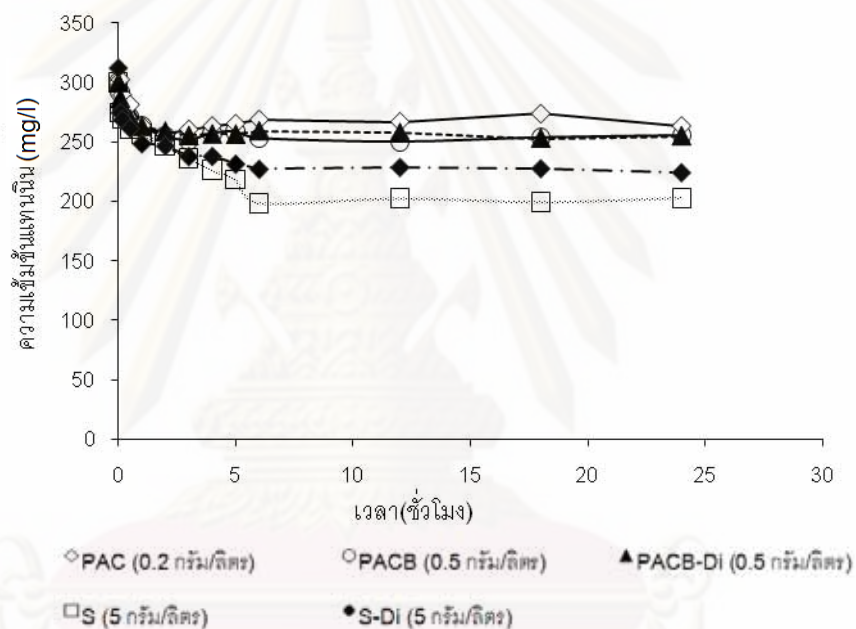
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)



(ข)



ภาพที่ 4.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับคลอรีนและแทนนินบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

(ก) การดูดซับคลอรีน , (ข) การดูดซับแทนนิน

จากข้อมูลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เราสามารถนำมาศึกษาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับ โดยทำการเปรียบเทียบจากสมการอันดับปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction) และ ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction) ตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

1) ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order reaction)

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4.1)$$

โดย q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = ระยะเวลาในการดูดซับ (นาที)

k_1 = ค่าคงที่การดูดซับของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน (1 ต่อ นาที)

2) ปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order reaction)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

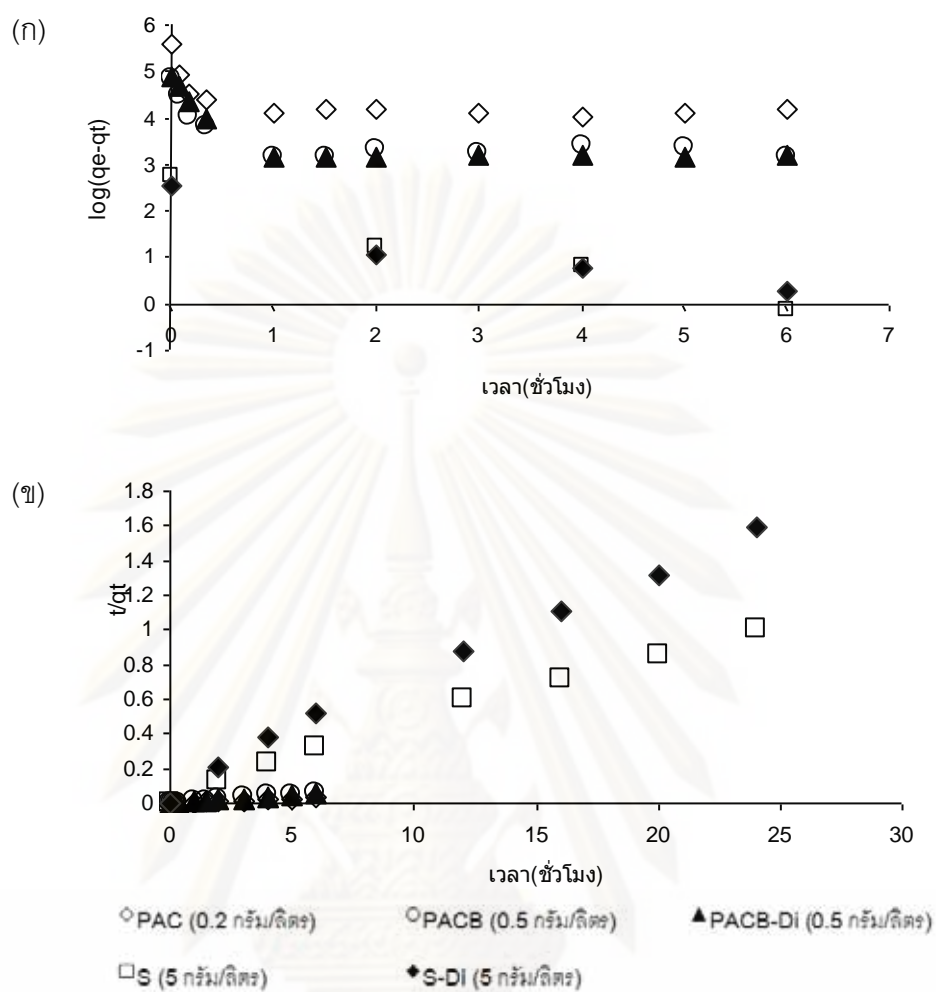
โดย q_e = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลางดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

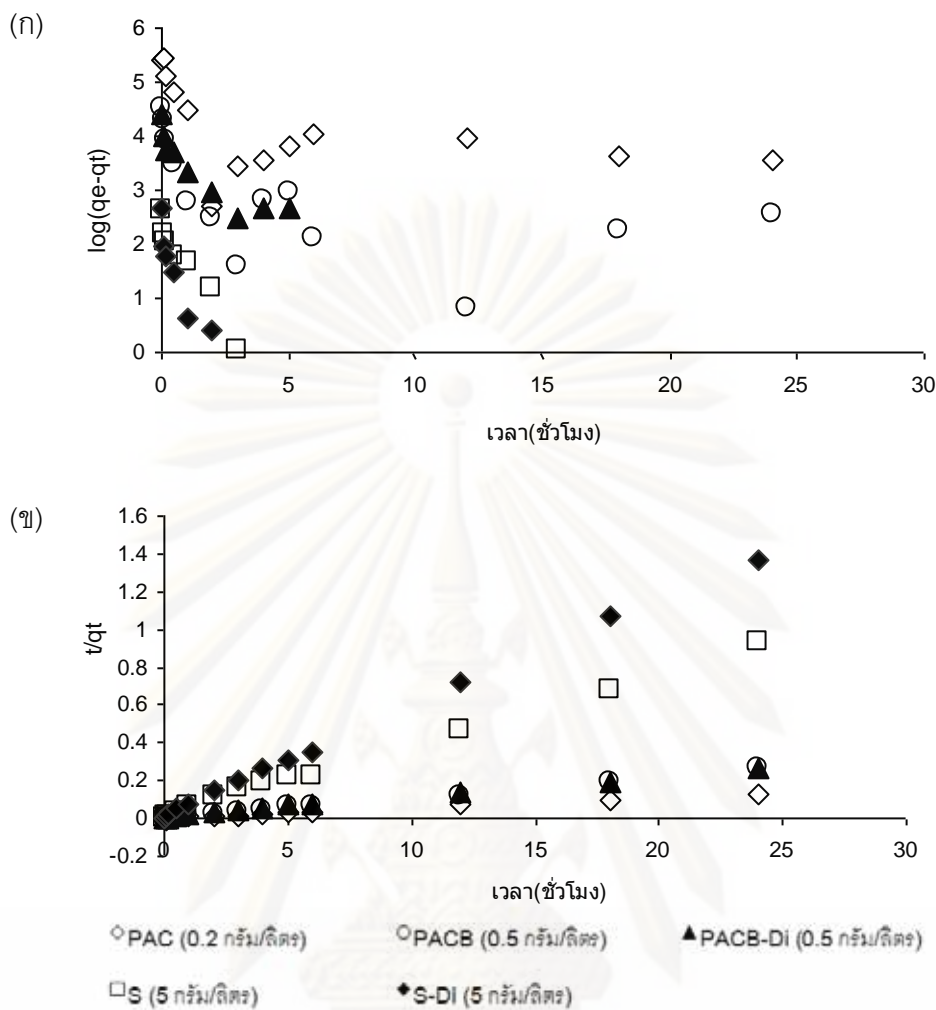
t = ระยะเวลาในการดูดซับ (นาที)

k_1 = ค่าคงที่การดูดซับของปฏิกริยาอันดับสองเสมือน (กรัมต่อมิลลิกรัม. นาที)

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับลิกนิน และแทนนิน มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเสมือน k_1 หาได้จากความชันของเส้นตรง ค่าจุดตัดแกนตั้งมีค่าเป็น $\ln q_e$ และเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเป็น $\frac{1}{q_e}$ และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับสองเสมือน k_2 ได้จากค่าจุดตัดแกนตั้ง จากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.17 อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับลิกนินด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์
 (ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน



ภาพที่ 4.18 อันดับปฏิกิริยาของกระบวนการดูดซับแทนนินด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

(ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

ค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของอันดับปฏิกิริยา ทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าค่า R^2 ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีค่ามากกว่า R^2 ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า q_e ทั้งหมดที่คำนวณได้ ($q_{e[cal]}$) จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง ($q_{e[exp]}$) มากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน ดังนั้น การดูดซับลิกนินและแทนนินด้วยตัวกลางทั้ง 5 ชนิด จึงมีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า R^2 จากทั้ง 2 สมการ พบว่าค่า R^2 ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนมีค่าอยู่ในช่วง 0.9994-0.9906 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด ซึ่งแสดงว่ากลไกการดูดซับลิกนินและแทนนิน โดยตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิดนั้น อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมี มีลักษณะเป็นกระบวนการดูด

ซึ่บทางเคม่ (Chemical Adsorption) ที่เกดจากประจุของ ตัวกลางดูดซึ่บ และสารถูกดูดซึ่บ (Gulnaz และคณะ, 2006) โดยที่อัตราเร็วของการเกดปฏิกิริยาจะซึ่บกับจำนวนของสารถูกดูดซึ่บ บนพื้นผิวดสารตัวกลางดูดซึ่บ และจำนวนสารถูกดูดซึ่บที่สภาวะสมดุล โดยจะเกดพันธะระหว่าง ตัวกลางดูดซึ่บและสารถูกดูดซึ่บ (Hoและ McKay,2000) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึง ค่าคงที่ อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเสมอ (k₂) ซึ่งจะบอกถึงอัตราเร็วในการดูดซึ่บ ถ้า k₂ มาก แสดงว่า อัตราเร็วในการดูดซึ่บสามารถเกดซึ่บได้อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลการดูดซึ่บได้เร็วกว่า k₂ ที่มีค่า น้อย

ค่า k₂ ของการดูดซึ่บลิกนินด้วย ตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์คือ PAC PACB และ PACB-Di มีค่าเท่ากับ 0.2778, 2.0000 และ 0.0828 กรัมต่อมิลลิกกรัมต่อนาที ตามลำดับ มากกว่าค่า k₂ ของการดูดซึ่บลิกนินด้วยตัวกลางดูดซึ่บประเภทสไลด์จ์ คือ S และ S-Di มีค่า k₂ เท่ากับ 0.0310 และ 0.0491 กรัมต่อมิลลิกกรัมต่อนาที ซึ่งเห็นได้ว่าการดูดซึ่บลิกนินโดย ตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์เร็วกว่าสไลด์จ์ โดยที่ k₂q_e² ของตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่าน กัมมันต์ที่มีค่า k₂q_e² อยู่ในช่วง 11,111.11-1,000.00 มิลลิกกรัมต่อกรัมต่อนาที ซึ่งสูงกว่าตัวกลาง ดูดซึ่บประเภทสไลด์จ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 12.16-18.62 มิลลิกกรัมต่อกรัมต่อนาที ซึ่งค่า k₂q_e² สูงแสดง ถึงปริมาณลิกนินที่ถูกดูดซึ่บใน ตัวกลางดูดซึ่บ 1 กรัมในเวลา 1 นาที ซึ่งค่า k₂q_e² ที่ได้ในกรณีของ ตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าที่ได้จาก ตัวกลางดูดซึ่บประเภทสไลด์จ์ซึ่งสอดคล้อง กับระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของกระบวนการดูดซึ่บด้วยตัวกลางดูดซึ่บประเภทสไลด์จ์ที่นานกว่า ที่ได้จากการใช้ตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์

ส่วน k₂ ของการดูดซึ่บแทนนินด้วย ตัวกลางดูดซึ่บ PAC, PACB และ PACB-Di มีค่าเท่ากับ 0.1008, 0.0897 และ 0.0141 กรัมต่อมิลลิกกรัมต่อนาทีตามลำดับ ค่า k₂ ของการดูด ซึ่บแทนนินด้วย S และ S-Di มีค่าเท่ากับ 0.0700 และ 0.1536 กรัมต่อมิลลิกกรัมต่อนาที โดยที่ k₂q_e² ของตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์ที่มีค่า k₂q_e² อยู่ในช่วง 3,333.33-123.46 มิลลิกกรัม ต่อกรัมต่อนาที สูงกว่าตัวกลางดูดซึ่บประเภทสไลด์จ์จะมีค่าอยู่ในช่วง 46.94-49.75 มิลลิกกรัมต่อ กรัมต่อนาที แสดงถึงปริมาณแทนนินที่ถูกดูดซึ่บใน ตัวกลางดูดซึ่บ 1 กรัมในเวลา 1 นาที ซึ่งค่า k₂q_e² ที่ได้ในกรณีของ ตัวกลางดูดซึ่บ ประเภทถ่านกัมมันต์มีค่าสูงกว่าที่ได้จาก ตัวกลางดูดซึ่บ ประเภทสไลด์จ์ เห็นได้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของ กระบวนการดูดซึ่บด้วยตัวกลางดูดซึ่บประเภทถ่านกัมมันต์ที่เร็วกว่าที่ได้จากการใช้ ตัวกลางดูดซึ่บ ประเภทสไลด์จ์

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับลิกนินที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตัวกลาง ดูดซับ	q_e [exp] (mg/g)	ลิกนิน						
		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน			ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			
		q_e [cal] (mg/g)	R^2	k_1 (นาที่ ⁻¹)	q_e [cal] (mg/g)	R^2	k_2 (ก./มก. นาที่)	$k_2 q_e^2$ (มก./ก. นาที่)
PAC	263.30	106.97	0.3576	-0.1329	200.00	0.9994	0.2778	11111.11
PACB	125.73	54.74	0.4018	-0.1740	100.00	0.9979	2.0000	20000.00
PACB-Di	131.68	61.87	0.4911	-0.2279	109.89	0.9983	0.0828	1000.00
S	19.41	12.29	0.9494	-0.4488	24.50	0.9906	0.0310	18.62
S-Di	12.81	9.32	0.8801	-0.3542	15.74	0.9936	0.0491	12.16

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของอันดับปฏิกิริยาการดูดซับแทนนินที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตัวกลาง ดูดซับ	q_e [exp] (mg/g)	แทนนิน						
		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน			ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			
		q_e [cal] (mg/g)	R^2	k_1 (นาที่ ⁻¹)	q_e [cal] (mg/g)	R^2	k_2 (ก./มก. นาที่)	$k_2 q_e^2$ (มก./ก. นาที่)
PAC	219.50	84.92767	0.2052	-0.0499	181.81	0.994	0.1008	3333.33
PACB	90.38	24.818764	0.2439	-0.0685	92.59	0.9969	0.0897	769.23
PACB-Di	81.96	20.875996	0.3203	-0.1899	93.45	0.9937	0.0141	123.45
S	20.29	10.341862	0.9398	-0.7116	26.66	0.9966	0.0700	49.75
S-Di	14.53	8.2507159	0.8076	-0.9991	17.48	0.9988	0.1536	46.94

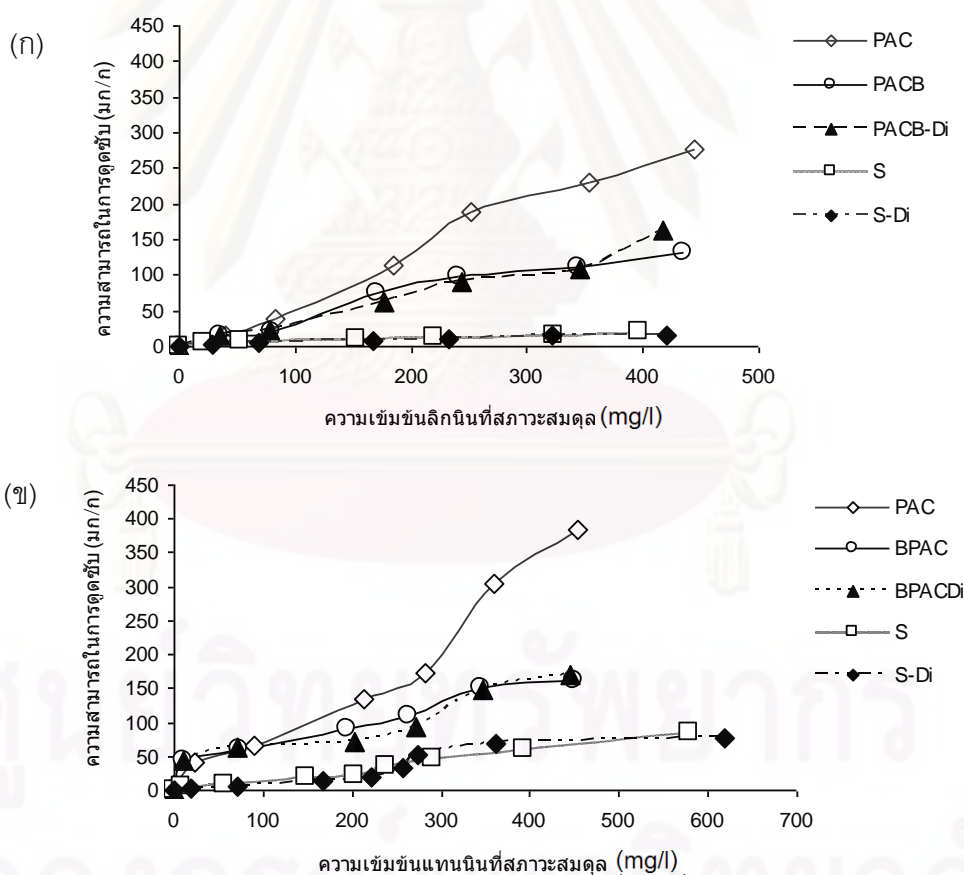
4.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับลิกันินและแทนนิน

ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับลิกันินและแทนนินโดยเปรียบเทียบกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับที่ได้จากกา รทดลองกับ ไอโซเทอร์ม แบบแลงมัวร์ ไอโซเทอร์ม แบบฟรุนดลิช และแบบเส้นตรง เพื่อหา สมการ ไอโซเทอร์ม ที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับลิกันินและแทนนินที่เกิดขึ้น โดยนำ ผลการดูดซับ ลิกันินและแทนนิน ของ ตัวกลางดูดซับ ชนิดต่างๆ มาวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับที่เหมาะสมที่ใช้ในการ อธิบายกระบวนการดูดซับ ซึ่งค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.7

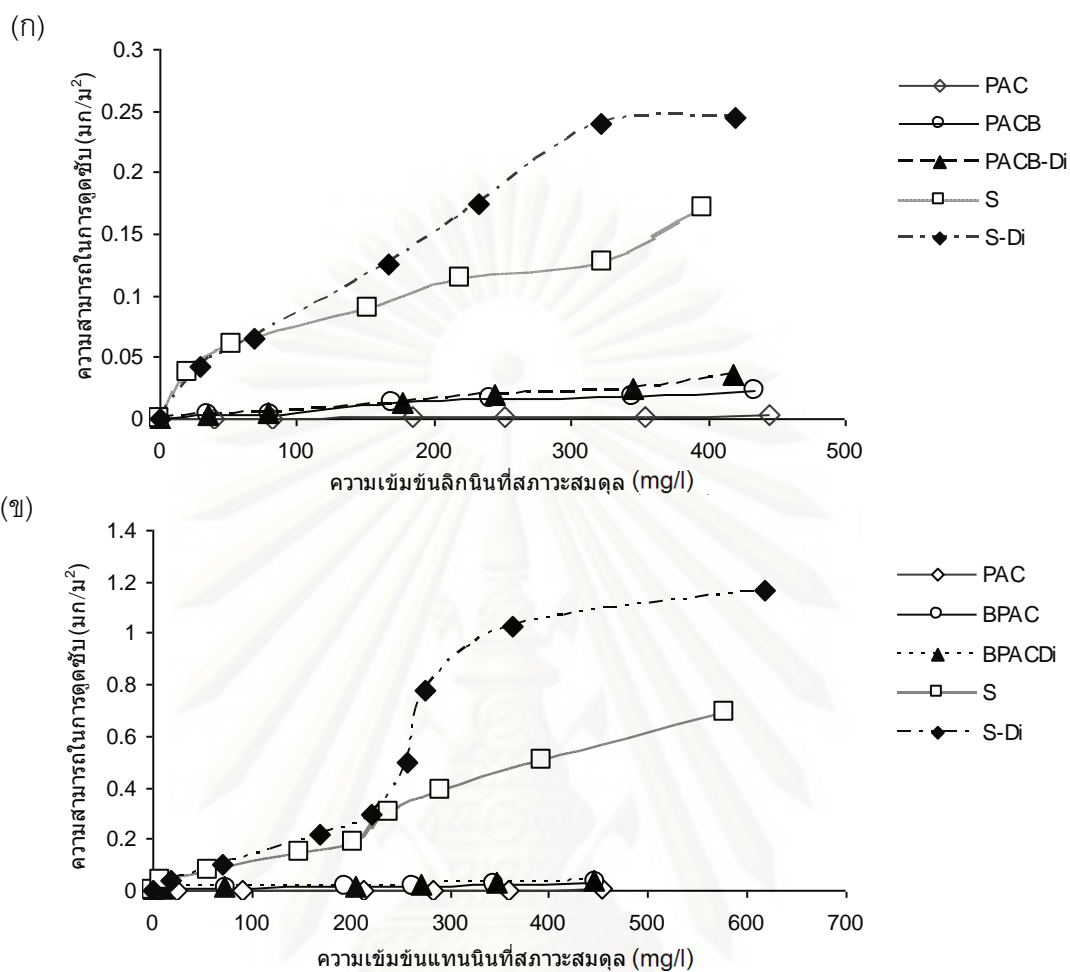
จากการเปรียบเทียบ ไอโซเทอร์ม การดูดซับลิกันินและแทนนินของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ ลิกันินและแทนนินต่อ 1 กรัมของตัวกลางดูดซับ (mg/g) ดังภาพที่ 4.19 พบว่า ความสามารถในการดูดซับลิกันินและแทนนินของตัวกลางแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์ ดังนี้ กล่าวคือ PAC มีความสามารถในการดูดซับมลสารทั้งสองชนิดสูงสุด และตามด้วย PACB และ PACB-Di ซึ่งอาจเกิดจากพื้นที่ ผิวของ PAC ถูกแย่งชิงและปกคลุมโดยจุลชีพทำให้มลสารสามารถเข้าถึงได้ยากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวภายในของรูพรุน ถ่านกัมมันต์ โดย PACB และ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า PAC ประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ซึ่งสอดคล้องกับการมีอยู่ของสัดส่วนถ่านกัมมันต์ที่ มีอยู่ใน PACB และ PACB-Di ที่มีสัดส่วนประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้องค์ประกอบทางอินทรีย์ของจุลชีพยังไม่ส่งผลกระทบบ่อย่างเด่นชัดต่อประสิทธิภาพการดูดซับทั้งของลิกันินและแทนนิน จาก ภาพที่ 4.19 พบว่า S และ S-Di มีประสิทธิภาพในการดูดซับลิกันินและแทนนิน ต่ำที่สุดและไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากพื้นผิวของตะกอนจุลชีพมีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชัน น้อยและไม่มีรูพรุน ทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาด้านการดูดซับเกิดขึ้นได้น้อย จากไอโซเทอร์มที่ได้ทั้งของลิกันินและแทนนินอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่สมดุระหว่าง 0 - 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังไม่พบแนวโน้มที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปรากฏการณ์การดูดซับอาจไม่เป็นแบบชั้นเดียวดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาเปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ เพื่อยืนยันปรากฏการณ์ดังกล่าว

ในส่วนของการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับลิกันินและแทนนินของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับลิกันินและแทนนินต่อพื้นที่ของตัวกลางดูดซับ 1 ตารางเมตร (mg/m^2) เพื่อที่ความต้องการจะตัดปัจจัยในส่วนของพื้นที่ผิวออกไป ดังภาพที่ 4.20 พบว่า ความสามารถในการดูดซับลิกันินและแทนนินของตัวกลางแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์ดังนี้ คือ S และ S-Di มีความสามารถในการดูดซับ มลสารทั้งสองชนิดใกล้เคียงกันและสูงที่สุด ซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุที่ตะกอนจุลินทรีย์หรือสไลด์จ์ มีหมู่ฟังก์ชันหลากหลาย (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร ,2551) คือ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อัลคิล หม้ออกซิเจนพันธะคู่ หมู่คาร์บอกซิลิก

หมู่อะมิโน หมู่อะลิฟาติก หมู่ฟอสเฟต และ หมู่ซัลเฟต จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้ดี ส่วน PACB และ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับรองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกัน โดย PAC มีความสามารถในการดูดซับต่ำสุดอาจจะเนื่องมาจาก PAC มีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่หลากหลาย คือ มีเพียง หมู่ไฮดรอกซิล หมู่ออกซิเจนพันธะคู่ และหมู่ออกซิเจนพันธะเดี่ยว (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร ,2551) และในการเปรียบเทียบในครั้งนี้ได้นำค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในความเป็นจริงควรใช้พื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ชนิดผง หรือ PAC มาคำนวณ เนื่องจากในการใช้ PAC มีข้อจำกัดที่น้ำหนัก โมเลกุลของของเสีย ที่จะถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 กรัมต่อโมล (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2546) มลสารจึงจะสามารถถูกดูดซับในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดี แต่ลิกนินและแทนนินนั้นมีมวลโมเลกุลสูงถึงประมาณ 60,000 และ 1700 กรัมต่อโมล จึงมีขนาดใหญ่และไม่สามารถถูกดูดซับเข้าไปสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดเพียงพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.19 ผลของการดูดซับลิกนิน ของตัวกลางชนิดต่างๆที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนินต่อ 1 กรัม (mg/g) ของตัวกลางดูดซับ (ก) การดูดซับลิกนิน , (ข) การดูดซับแทนนิน



ภาพที่ 4.20 ผลของการดูดซับลิิกนิน ของตัวกลางชนิดต่างๆที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับลิิกนินและแทนนินต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรของตัวกลางดูดซับ (g/m^2) (ก) การดูดซับลิิกนิน , (ข) การดูดซับแทนนิน

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของ ไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์ ฟรุנדลิช และสมการเส้นตรงของลิกนินและแทนนินที่ พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C ความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

ตัวกลาง ดูดซับ pH	ลิกนิน								
	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุנדลิช			สมการเส้นตรง $y=mx+c, x= c_e, y= q$		
	R^2	B (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n	R^2	m	c
PAC	0.5621	-	-	0.9908	0.1679	1.2376	0.9854	0.6606	- 4.6554
PACB	0.0509	-	-	0.9386	0.5098	0.9286	0.9526	0.3124	6.0944
PACB-Di	0.0022	-	-	0.9802	0.3975	0.9786	0.9791	0.3683	- 1.7594
S	0.8941	0.0077	23.9200	0.9806	1.1020	0.4712	0.9314	0.0442	3.0954
S-Di	0.8379	0.0026	31.2500	0.9856	0.2371	0.7065	0.9616	0.0396	1.3503
ตัวกลาง ดูดซับ pH	แทนนิน								
	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุנדลิช			สมการเส้นตรง $y=mx+c, x= c_e, y= q$		
	R^2	B (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n	R^2	m	c
PAC	0.12	0.0007	1250	0.9113	2.9505	0.7526	0.9567	0.7994	-5.6485
PACB	0.8386	0.0076	192.307 0	0.8902	16.7841	0.3479	0.9406	0.3282	0.3282
PACB-Di	0.6498	0.0064	188.679	0.801	16.9161	0.3346	0.9112	0.3245	21.4950
S	0.1405	5.296	232.56	0.9121	0.8252	0.6859	0.9822	0.1480	0.2118
S-Di	0.0694	-	-	0.9234	0.1098	1.024	0.8808	0.1393	0.7534

ผลการศึกษาพบว่าไอโซเทอร์มในการดูดซับลิกนินและแทนนินของตัวกลางดูดซับ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di สามารถอธิบายได้โดยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุנדลิช เนื่องจากให้ค่า R^2 สูงกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์มาก โดยสำหรับการดูดซับลิกนินพบว่า PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9908, 0.9386, 0.9802, 0.9806 และ 0.9856 ตามลำดับ สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนิน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9113, 0.8902, 0.801, 0.9121 และ 0.9234 ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ไฮโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชคำนวณได้จากสมการ
ดังนี้

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

ทั้งนี้ ค่า K เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนิน โดยในการดูดซับแทนนินนั้นตัวกลางดูดซับ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di มีค่า K เท่ากับ 0.1679, 0.5098, 0.3975, 0.1020 และ 0.2371 ตามลำดับ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว PAC มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด รองลงมาคือ PACB และ PACB-Di มีค่าใกล้เคียงกัน และตัวกลางดูดซับที่มีความสามารถน้อยสุดคือ S และ S-Di มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.19 ดังนั้น PAC น่าจะมีค่า K สูงที่สุด ส่วน PACB และ PACB-Di มีค่า K ใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันด้วย เช่นเดียวกับ S และ S-Di ก็พบว่า มีค่า K ใกล้เคียงกันเช่นกันสอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับที่มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

ส่วนในการดูดซับแทนนินนั้นก็เป็นไปในทิศทางที่คล้ายคลึงกับการดูดซับลิกนิน ตัวกลางดูดซับ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di มีค่า K เท่ากับ 2.9505, 16.7841, 16.9161, 0.8252 และ 0.1098 ตามลำดับ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว PAC มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด รองลงมาคือ PACB และ PACB-Di มีค่าใกล้เคียงกัน และตัวกลางดูดซับที่มีความสามารถน้อยสุดคือ S และ S-Di ก็มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น PAC น่าจะมีค่า K สูงที่สุด ส่วน PACB และ PACB-Di มีค่า K ใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันด้วย เช่นเดียวกับ S และ S-Di ก็พบว่า มีค่า K ใกล้เคียงกันเช่นกัน สอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับที่มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

ในการดูดซับลิกนินค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการพบว่า ตัวกลางดูดซับ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di ให้ค่า $1/n$ 1.2376, 0.9286, 0.9786, 0.4712 และ 0.7065 ตามลำดับ ส่วนการดูดซับแทนนินค่า $1/n$ ซึ่งเป็นค่าความชันของสมการพบว่า ตัวกลางดูดซับ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di ให้ค่า $1/n$ 0.7526, 0.3479, 0.3346, 0.6859 และ 0.5624 ตามลำดับ โดยการดูดซับลิกนินและแทนนินด้วย PAC มีค่า $1/n$ สูงที่สุด โดยถ้ามีค่าความชันมากจะเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไป เมื่อเส้น ไฮโซเทอร์ม มีความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (Continuous Treatment) ส่วนเส้นไฮโซเทอร์ม ความชันน้อยจะเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดแบบทีละเท (Batch Treatment) (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545)

สำหรับการวิเคราะห์ไฮโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์คำนวณได้จากสมการนี้

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

โดยค่า q_m ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อค่า a q_m มีค่ามาก ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูง และค่า b เป็นค่าคงที่ของ ไอโซเทอร์ม ซึ่งในการศึกษา ไอโซเทอร์ม แบบแลงมัวร์ในครั้งนี้ มีค่า R^2 ที่ต่ำมาก ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จึงมีความคลาดเคลื่อนไปอย่างมาก โดยปกติแล้วถ้าค่า b ของตัวกลางดูดซับ ประเภทที่มีความสามารถในการดูดซับสูงจะมีค่าสูงกว่า ตัวกลางดูดซับ ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่า q_m โดย ไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบแลงมัวร์บอกจะได้รับการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว และเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ส่วน ไอโซเทอร์ม การดูดซับแบบฟรุนดลิชเป็นกระบวนการดูดซับแบบหลายชั้น และเป็นทางกายภาพ (Gulnaz และคณะ, 2006)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับลิกนินและแทนนินด้วย ตัวกลาง PACB และ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับลิกนิน น้อยกว่า PAC เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวอิสระที่ยังคงมีความสามารถในการดูดซับมากกว่า และถึงแม้ตัวกลาง PACB และ PACB-Di จะมีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์ แต่ในกระบวนการนำไปใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนนั้น ตัวกลางนี้จะดูดซับสารอินทรีย์และสารอื่นๆในน้ำเสียทำให้พื้นที่ผิวอิสระของ PAC ลดน้อยลง รวมถึงการเกาะติดของสไลด์จับบนพื้นผิวของ PACB อาจทำให้ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในของ PAC ลดลง ส่วน S และ S-Di มีความสามารถในการดูดซับลิกนินน้อยมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่น้อยมากนั่นเอง และอาจมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการดูดซับลิกนินน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวกลางที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลาย (PACB, S) และ ตัวกลางที่ผ่านการย่อยสลาย (PACB-Di, S-Di) มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน โดยจากผลการศึกษา ไอโซเทอร์ม การดูดซับลิกนิน เป็นไปตามความสัมพันธ์ของแบบฟรุนดลิชมากกว่า แลงมัวร์ เนื่องจากมีค่า R^2 ที่สูงกว่า แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น และเป็นทางกายภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลกระทบของค่าพีเอชต่อการดูดซับดูดซับทั้ง 5 ชนิด ดำเนินการโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายที่ย้อมที่ 5 7 และ 9 และควบคุมปัจจัยในการศึกษาดังนี้คือ ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.21-4.30

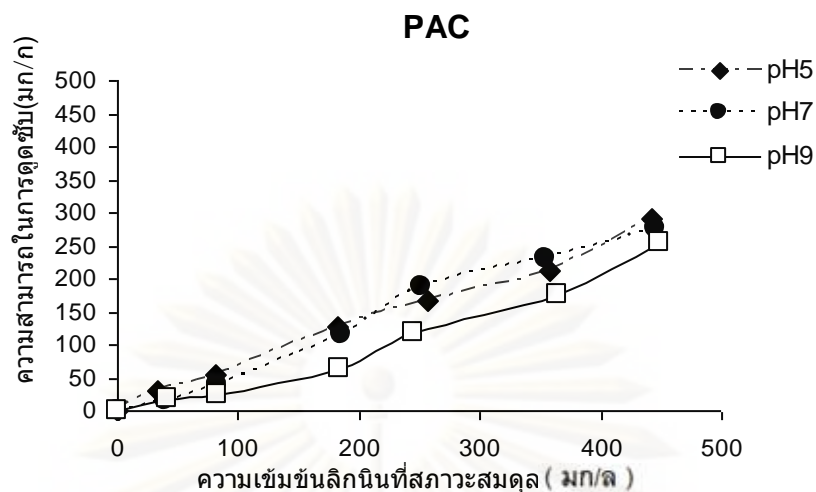
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของ ไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์ ฟรุนดลิช และสมการเส้นตรงที่พีเอช 5, 7 และ 9 ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวกลางดูดซับ pH	ลักษณะ								
	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช			สมการเส้นตรง $y=mx+c, x=c_e, y=q$		
	R^2	b (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n	R^2	m	C
PAC									
5	0.6094	0.00071	1111.11	0.9954	1.2493	0.8832	0.9922	0.6231	5.4702
7	0.5621	-	-	0.9908	0.1679	1.2376	0.9854	0.6606	- 4.6554
9	0.4485	-	-	0.9636	0.2138	1.1351	0.9709	0.5546	- 14.500
PACB									
5	0.0011	-	-	0.9555	0.33643	0.9865	0.9663	0.3106	1.1026
7	0.0509	-	-	0.9386	0.50980	0.9286	0.9526	0.3124	6.0944
9	0.0109	-	-	0.9678	0.26418	1.0018	0.9787	0.2707	0.1221
PACB-Di									
5	0.0044	-	-	0.9802	0.3495	0.9972	0.9747	0.3527	- 0.8502
7	0.0022	-	-	0.9802	0.3975	0.9786	0.9791	0.3683	- 1.7594
9	0.1399	-	-	0.93	0.2470	1.0183	0.9380	0.3412	- 9.0659
S									
5	0.901	0.0139	22.94	0.9585	2.5211	0.3437	0.8787	0.0462	4.5178
7	0.8941	0.0077	23.92	0.9806	1.1020	0.4712	0.9314	0.0442	3.0954
9	0.4514	0.0015	45.25	0.9632	0.1831	0.7581	0.9804	0.0462	0.5586
S-Di									
5	0.7422	0.0023	34.6021	0.977	0.1948	0.7472	0.9665	0.0415	1.2195
7	0.8379	0.0026	31.2500	0.9856	0.2371	0.7065	0.9616	0.0396	1.3503
9	0.932	0.0003	131.578	0.932	0.0823	0.8637	0.9580	0.0427	- 0.3674

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าคงที่และตัวแปรของไอโซเทอร์มแบบแลงมัวร์ และฟรุนดลิช

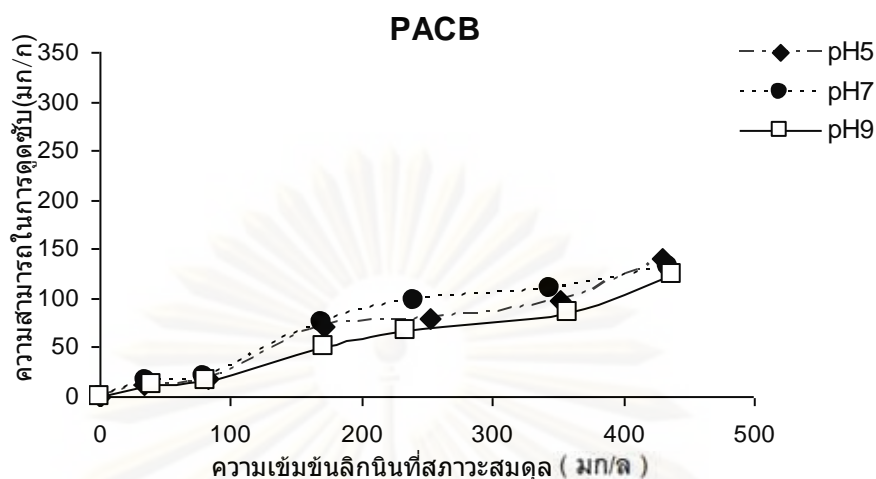
ตัวกลางดูด ซับpH	แทนนิน								
	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์			ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช			สมการเส้นตรง $y=mx+c, x= c_0, y= q$		
	R^2	b (ลิตร/มก.)	q_m (มก./ก.)	R^2	K (ลิตร/ก.)	1/n	R^2	m	c
PAC									
5	0.9036	0.0050	476.190	0.9669	13.3382	0.5321	0.9282	0.7088	54.82
7	0.12	0.0007	5	0.9113	2.9505	0.7526	0.9567	0.7994	-5.6485
9	0.9461	0.0112	1250 400	0.9691	36.7028	0.3714	0.8919	0.8197	74.173
PACB									
5	0.1966	-	-	0.9376	0.11588	1.1867	0.9006	0.3349	0.3349
7	0.8386	0.0076	192.307	0.8902	16.7841	0.3479	0.9406	0.3282	0.3282
9	0.7939	0.0111	204.081	0.7788	27.5803	0.2963	0.8743	0.4539	0.4539
PACB-Di									
5	0.9937	0.0087	217.391	0.9324	8.8247	0.5051	0.8204	0.3510	41.0790
7	0.6498	0.0064	188.679	0.801	16.9161	0.3346	0.9112	0.3245	21.4950
9	0.9375	0.0173	175.438	0.9233	29.0603	0.2814	0.8260	0.3732	43.2230
S									
5	0.1927	13.533	-	0.8443	0.0193	1.3982	0.9794	0.2175	-5.4091
7	0.1405	5.296	232.56	0.9121	0.8252	0.6859	0.9822	0.1480	0.2118
9	0.9418	0.6742	163.93	0.942	3.6291	0.639	0.8978	0.3626	20.135
S-Di									
5	0.2147	-	-	0.8443	0.02304	1.3332	0.9433	0.1539	0.0636
7	0.0694	-	-	0.9234	0.1098	1.024	0.8808	0.1393	0.7534
9	0.9676	0.0277	90.9090	0.8757	9.7095	0.379	0.6747	0.1323	27.5600

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.21 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิกนินของ PAC ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับลิกนินสูงและมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันที่พีเอชต่างๆ โดยพบว่าที่พีเอช 5 และ 7 PAC มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. ใกล้เคียงกันคือ 289 และ 276 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และที่พีเอช 9 มีความสามารถในการดูดซับลิกนินได้ต่ำสุดคือ 255 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับลิกนินบนพื้นผิวของ PAC พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และการมีพื้นที่ผิวมากเป็นหลัก โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PAC ได้ โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวกอ่อนๆ ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับลิกนินที่มีประจุเป็นลบเช่นเดียวกัน

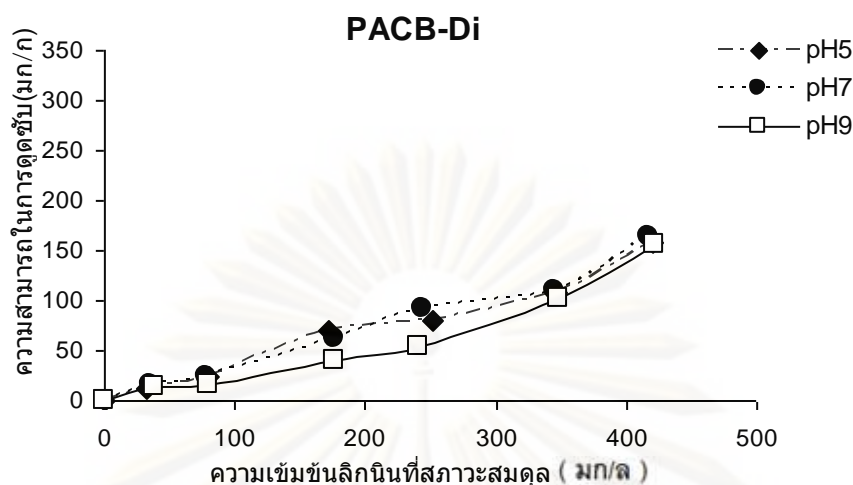


ภาพที่ 4.22 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิกนินของ PACB ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า PACB มีความสามารถในการดูดซับลิกนินสูงรองจาก PAC ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่บริสุทธิ์ และมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันที่พีเอชต่างๆ โดยพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 PACB มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เท่ากับ 140, 131, และ 124 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับลิกนินบนพื้นผิวของ PACB พบว่าน่าจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และการมีพื้นที่ผิวมากเป็นหลักถึงแม้พื้นผิวบางส่วนถูกปกคลุมโดยจุลชีพ โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PAC ได้เล็กน้อย โดยที่ที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวกอ่อนๆ ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับลิกนินที่มีประจุเป็นลบจึงมีความสามารถการดูดซับลิกนินต่ำสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

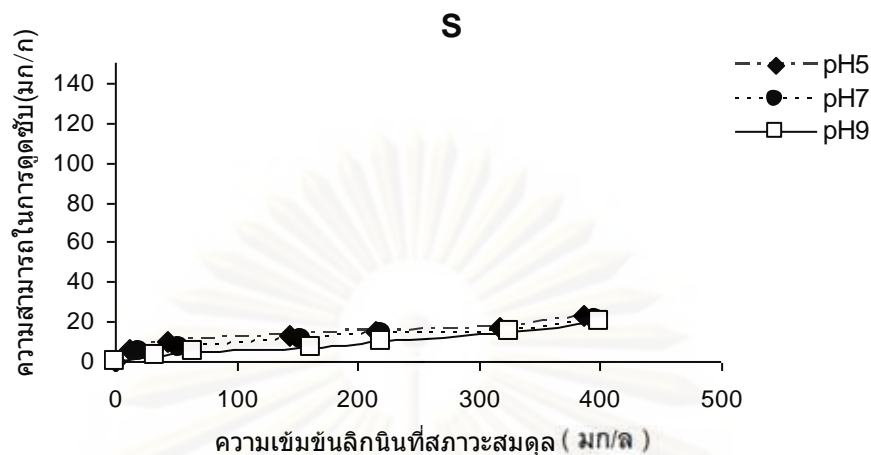


ภาพที่ 4.23 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ PACB-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์ใกล้เคียงกับ PACB และมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันที่พีเอชต่างๆ โดยพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล.เท่ากับ 158, 164 และ 156 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับลิแกนด์บนพื้นผิวของ PACB-Di พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และการมีพื้นที่ผิวมากเช่นเดียวกับ PACB โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PAC ได้เล็กน้อยที่ความเข้มข้นต่ำๆ โดยที่ที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวกอ่อนๆ ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับลิแกนด์ที่มีประจุเป็นลบจึงมีความสามารถการดูดซับลิแกนด์ต่ำสุด แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นพบว่าความสามารถในการดูดซับลิแกนด์มีค่าใกล้เคียงกัน

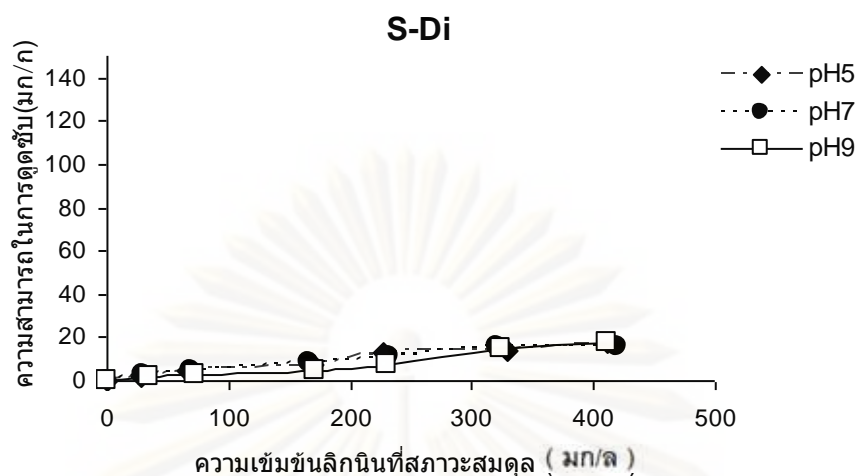
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



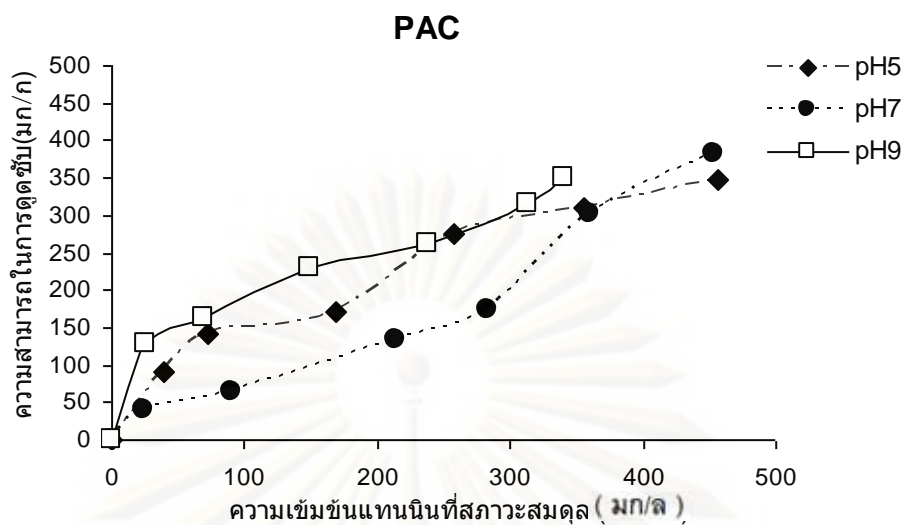
ภาพที่ 4.24 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิกนินของ S ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า S มีความสามารถในการดูดซับลิกนินน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ PAC, PACB และ PAC-Di โดยพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 S มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เพียง 22, 21 และ 20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์การดูดซับลิกนินบนพื้นผิวของ S พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร 2551) โดยที่แรงทางประจุไม่ได้มีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ s อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับประเภทสไลด์จมีค่าน้อยกว่าตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์อยู่มากเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะมีความแตกต่างกันถึง 40-120 เท่า



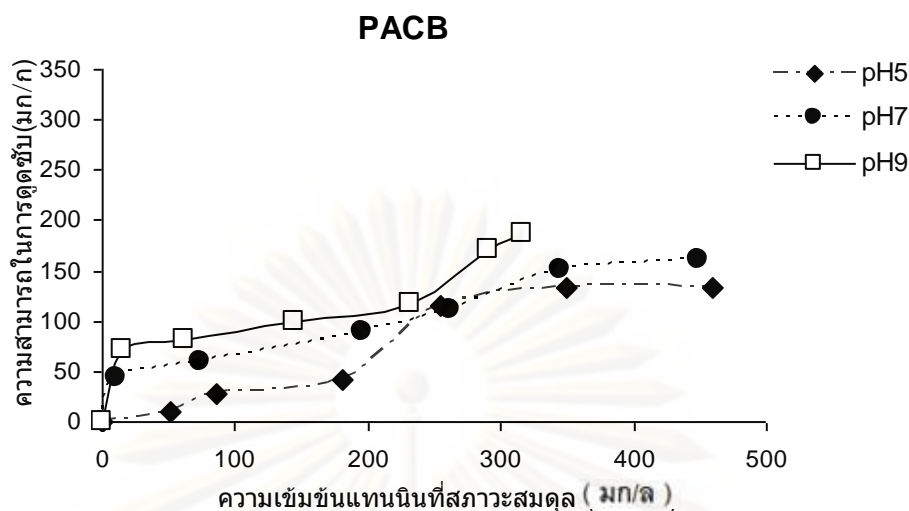
ภาพที่ 4.25 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับลิแกนด์ของ S-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า S-Di มีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์ใกล้เคียงกับ S มาก และมีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์น้อยมากเช่นกันเมื่อเทียบกับตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ PAC, PACB และ PAC-Di เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะมีความแตกต่างกันมากโดยพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 S มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เพียง 17, 16 และ 17 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกรณีของ S จากการวิเคราะห์การดูดซับลิแกนด์บนพื้นผิวของ S-Di พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยที่แรงทางประจุไม่ได้มีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ S-Di



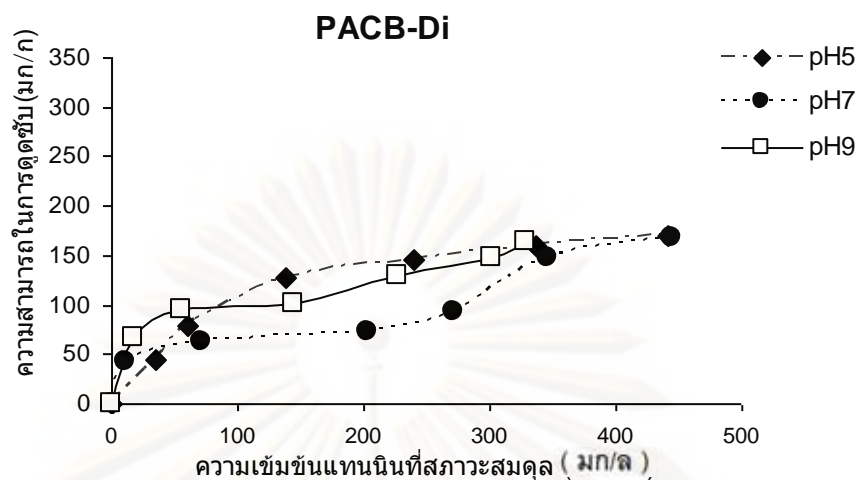
ภาพที่ 4.26 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PAC ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองการดูดซับแทนนินของตัวกลางดูดซับ PAC ดังภาพที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุที่ pH 9 พบว่า PAC สามารถดูดซับแทนนินได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำๆ แต่เมื่อความเข้มข้นสมดุลสูงขึ้นพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. ไม่แตกต่างกัน คือ 347, 382 และ 349 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับลักษณะพื้นผิวของ PAC พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และการมีพื้นที่ผิวมากเป็นหลัก โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PAC ได้ โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวกอ่อนๆ ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับ แทนนินที่มีประจุเป็นบวก ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้มีความสามารถในการดูดซับแทนนินได้ดี



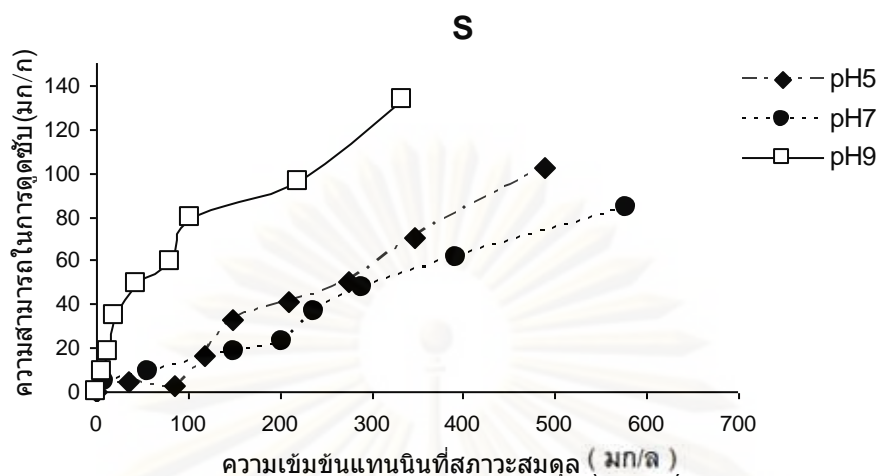
ภาพที่ 4.27 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PACB
ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองการดูดซับแทนนินของตัวกลางดูดซับ PACB เป็นไปในทิศทางเดียวกับ PAC แต่ก็ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวถูกปกคลุมโดยจุลชีพ ดังภาพที่ 4.23 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุ ที่ pH 9 พบว่า PACB สามารถดูดซับแทนนินได้ดีทั้งที่ความเข้มข้นต่ำและสูง โดยมีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เท่ากับ 187 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 7 มีความสามารถในการดูดซับรองลงมาคือ 161 มิลลิกรัมต่อกรัม pH 5 มีความสามารถในการดูดซับลิกนินต่ำสุดคือ 132 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยจากการวิเคราะห์การดูดซับลิกนินบนพื้นผิวของ PACB พบว่าเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และการมีพื้นที่ผิวก่อนข้างมาก เช่นเดียวกัน โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ PACB โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวก ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับแทนนินที่มีประจุเป็นบวก ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้มีความสามารถในการดูดซับแทนนินได้ดี



ภาพที่ 4.28 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ PACB-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองการดูดซับแทนนินของตัวกลางดูดซับ PACB-Di มีความใกล้เคียงกับการดูดซับของตัวกลางดูดซับ PACB พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เท่ากับ 170 168 และ 164 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่พีเอช 5 7 และ 9 ตามลำดับ โดยที่พีเอชต่างๆ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน ซึ่ง ผลกระทบของแรงทางประจุมิแนวโน้มไม่เด่นชัด

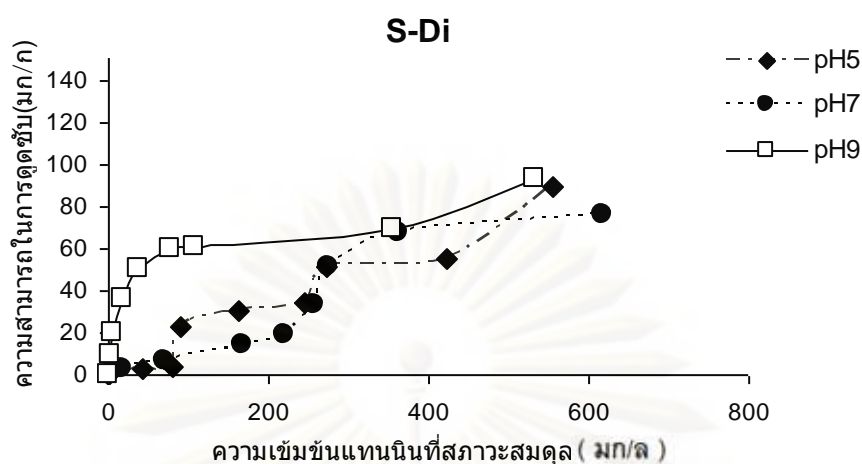


ภาพที่ 4.29 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ S ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า S มีความสามารถในการดูดซับแทนนินน้อยกว่าตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ PAC, PACB และ PAC-Di โดยพบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 S มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เท่ากับ 102, 84 และ 150 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุที่ pH 9 พบว่า S สามารถดูดซับแทนนินได้ดีมากที่ความเข้มข้นต่ำๆ และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ S โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวก ทำให้เกิดแรงผลัทางไฟฟ้ากับแทนนินที่มีประจุเป็นบวก ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบทำให้มีความสามารถในการดูดซับแทนนินได้ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.30 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแทนนินของ S-Di ที่อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า S-Di มีความสามารถในการดูดซับแทนนินใกล้เคียงกับ S แต่ต่ำกว่า S เล็กน้อย และมีความสามารถในการดูดซับ แทนนินน้อยกว่าตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่ามาก พบว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 S มีความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุลประมาณ 450 มก./ล. เท่ากับ 88, 76 และ 93 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการดูดซับด้วยแรงทางประจุที่ pH 9 พบว่า S สามารถดูดซับแทนนินได้ดี ที่ความเข้มข้นต่ำๆ และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยที่แรงทางประจุมีส่วนในการช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับของ S-Di โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีค่าประจุเป็นบวก ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับแทนนินที่มีประจุเป็นบวก ในขณะที่พีเอช 9 มีค่าประจุเป็นลบ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับแทนนินได้ดี นอกจากนี้พบว่ารูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับของแทนนินโดย S-Di มีความแตกต่างจากตัวกลางดูดซับอื่นๆ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นการดูดซับแบบหลายชั้นชัดเจน

กระบวนการดูดซับลิแกนด์และแทนนินของตัวกลางดูดซับสามารถสรุปได้ดังนี้

ตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ PAC, PACB และ PACB-Di ดูดซับลิแกนด์และแทนนิน ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลัก แรงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวตัวกลางดูดซับและของมลสาร (ลิแกนด์และแทนนิน) เป็นแรงที่ทำให้โมเลกุลของ ดูดซับลิแกนด์และแทนนินเข้าไปยึดกับ ประกอบกับ PAC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและมี หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่หลากหลายและมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้ตัวกลางดูดซับที่มีองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ ตัวกลางดูดซับโดย TGA พบว่าไม่พบการดูดซับของสารอินทรีย์ในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เมื่อนำ PACB มาใช้เป็น ตัวกลางดูดซับ มลสารอีกครั้งหนึ่ง PACB ยังคงมีประสิทธิภาพการดูดซับหลงเหลืออยู่

นอกจากนี้จากขนาดของโครงสร้างโมเลกุลของลิแกนด์และแทนนินทำให้มลสารทั้งสองชนิดสามารถเข้าสู่รูพรุนภายในตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ได้ยากดังนั้นจึงคาดได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนไม่น่าส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับลิแกนด์และแทนนิน

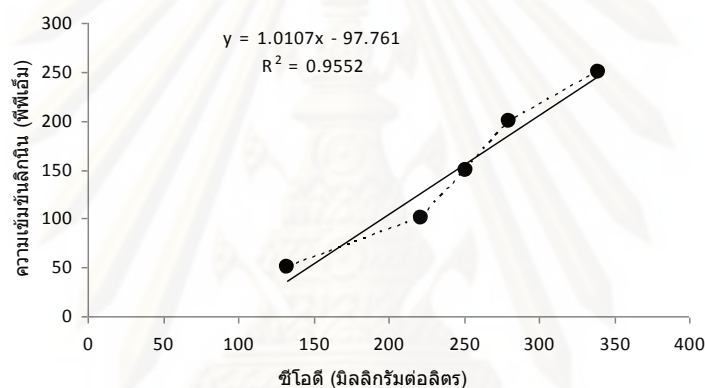
นอกจากแรง แวนเดอร์วาลส์เป็นแรงหลัก แล้วพันธะต่างๆเช่น แรงพันธะไฮโดรเจน อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากโครงสร้างของทั้งตัวกลางดูดซับและตัวถูกดูดซับ รวมถึงแรงดึงดูดและแรงผลักทางประจุ จึงทำให้ที่พีเอช 5, 7 และ 9 มีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน ส่วนกระบวนการดูดซับลิแกนด์และแทนนินด้วย ตัวกลาง PACB และ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์ น้อยกว่า PAC เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวอิสระที่ยังคงมีความสามารถในการดูดซับมากกว่า และถึงแม้ตัวกลาง PACB และ PACB-Di จะมีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์ แต่ในกระบวนการนำไปใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนนั้น การเกาะติดของสไลด์จับพื้นผิวของ PACB อาจทำให้ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ผิว ของ PAC ลดลง ส่วน S และ S-Di มีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์น้อยมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อยมากนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวกลางที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลาย (PACB, S) และ ตัวกลางที่ผ่านการย่อยสลาย (PACB-Di, S-Di) มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

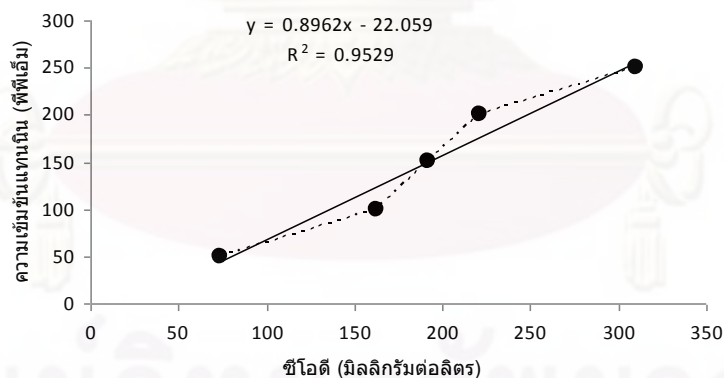
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอติกับความเข้มข้นของลิกนิน และแทนนิน

การหาความสัมพันธ์ระหว่างซีโอติกับความเข้มข้นของลิกนิน และแทนนิน ดังแสดงในภาพที่ 4.27 เพื่อต้องการศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานตัวกลางดูดซับในสภาพจริง เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในการหาค่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสีย โดยทั่วไปจะหาค่าในรูปของค่า ซีโอติ ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของลิกนินและแทนนินว่ามีความสัมพันธ์กันกับ ค่าซีโอติอย่างไร เพื่อที่จะได้ทราบว่าที่ความเข้มข้นของซีโอติที่วัดได้จะมีลิกนินปริมาณ เท่าใด เมื่อนำไปเทียบกับไอโซเทอร์มก็จะได้อ่าความมาารถในการดูดซับของตัวกลางชนิดต่างๆ เพื่อที่จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณตัวกลางที่จะใช้ในการดูดซับในแต่ละครั้ง ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลิกนิน และซีโอติ เป็นเส้นตรงที่ R^2 เท่ากับ 0.9552 และ 0.9529 ตามลำดับ

(ก)



(ข)



ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างซีโอติกับความเข้มข้นของลิกนิน และแทนนิน

(ก) ลิกนิน (ข) แทนนิน

จากภาพที่ 4.27 (ก) กำหนดค่าแกนนอนเป็นค่าซีโอติ และค่าแกนตั้งเป็น ความเข้มข้นของลิกนิน สมมติว่าเราอยากทราบว่าซีโอติที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรที่น้ำออก (effluent) คิดเป็นค่าความเข้มข้นของลิกนินได้เท่าไร เมื่อแทนค่าซีโอติ หรือ $X = 120$ มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในสมการ $y = 1.0107x - 97.761$ ก็จะได้ค่า y หรือค่าความเข้มข้นของลิกนินเท่ากับ 23.52

มิลลิกรัมต่อลิตร และจากภาพที่ 4.27 (ข) จะได้ว่า ความเข้มข้นของแทนนิน ที่ซีไอดี 120 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าความเข้มข้นของลิกนินได้เท่ากับ 85.48 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเราทราบค่าความเข้มข้น ของลิกนินและแทนนินที่แสดงถึงค่าซีไอดีที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้ว จึงจะสามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนิน ที่ซีไอดีของลิกนินและแทนนิน เท่ากับ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้ไปเทียบกับไอโซเทอร์มการดูดซับลิกนินและแทนนินในภาพที่ 4.17-4.26 ซึ่งสามารถสรุปค่าความสามารถในการดูดซับดังตารางที่ 4.9

ตาราง 4.9 ความสามารถในการดูดซับลิกนินและแทนนินจากน้ำออก (effluent) ที่ซีไอดีของลิกนินและแทนนิน เท่ากับ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวกลางดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับลิกนิน (มก./ก.)	ความสามารถในการดูดซับแทนนิน (มก./ก.)
pH		
PAC		
5	22	145
7	9	65
9	11	175
PACB		
5	9	28
7	13	63
9	8	87
PACB-Di		
5	8	100
7	9	66
9	8	98
S		
5	8	3
7	5	13
9	2	65
S-Di		
5	2	3
7	2	8
9	1.5	60

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน และแทนนินโดยวัสดุช่วย ตักตะกอนที่ใช้แล้ว ซึ่งใช้ตัวกลางดูดซับ ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ถ่าน กัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตักตะกอนแล้ว ถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตักตะกอนที่ย่อยแล้ว ตะกอนจุลินทรีย์ และ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ ย่อยแล้ว โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพ- เคมีของตัวกลางดูดซับ ศึกษา จลนพลศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตักตะกอนแล้วนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งจาก การทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการ วิเคราะห์ พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้เป็นวัสดุช่วยตักตะกอนก่อนนำไปอบให้แห้งเพื่อนำมาเป็น ตัวกลางดูดซับ บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์พบจุลินทรีย์จับตัวแบบห่อหุ้มล้อมรอบถ่านกัมมันต์ชนิดผงและ พบจุลชีพชนิดแท่ง ชนิดกลม และ ชนิดเกลียวรวมตัวจับกันรอบถ่านกัมมันต์ แสดงให้เห็นว่าการ ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตักตะกอนจะทำให้มีจุลชีพมาเกาะอยู่ ค่า pH_{pzc} ของ PAC, PACB, PACB-Di, S และ S-Di มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7.24, 6.82, 7.02, 6.55 และ 6.64 ตามลำดับ จาก ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นสารช่วยตักตะกอน ด้วยวิธี TGA พบว่ามี ส่วนประกอบของจุลชีพบนพื้นผิวอยู่ที่ร้อยละ 24.28

5.1.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับลิกนินเข้าสู่สมดุลสำหรับตัวกลางดูดซับ PAC PACB และ PACB-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก ส่วนตัวกลางดูดซับ S และ S-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 20 ชั่วโมง และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแทนนินเข้าสู่สมดุล ของ PAC, PACB และ PACB-Di ได้แก่ 2 ชั่วโมง ส่วนตัวกลางดูดซับ S และ S-Di เข้าสู่สมดุลที่เวลา 6 ชั่วโมง โดยอันดับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งการดูดซับลิกนินและ แทนนินเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

5.1.3 จากผลการศึกษา ไอโซเทอร์ม ของลิกนินและแทนนิน พบว่า ตัวกลาง PACB และ PACB-Di มีความสามารถในการดูดซับลิกนิน น้อยกว่า PAC เนื่องจาก PAC มีพื้นที่ผิวอิสระที่ยังคงมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าเนื่องจากการเกาะติดของสไลด์จับบนพื้นผิวของ

PACB อาจทำให้ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในของ PAC ลดลง ส่วน S และ S-Di มีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์น้อยมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่น้อยมากนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวกลางที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลาย (PACB, S) และ ตัวกลางที่ผ่านการย่อยสลาย (PACB-Di, S-Di) มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน โดยจากผลการศึกษา ไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ และ เแทนนิน เป็นไปตามความสัมพันธ์ของแบบฟรุนดลิชมากกว่า แลงมัวร์ แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น และเป็นทางกายภาพ

5.1.4 ลิแกนด์ถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วย PAC ที่พีเอช 5 PACB และ PACB-Di พบว่าดูดซับได้ดีที่พีเอช 5 และ 7 พบว่า pH ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วย S และ S-Di ส่วน เแทนนินถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วย PAC ที่พีเอช 7 ส่วน PACB และ PACB-Di ดูดซับได้ดีที่พีเอช 9 และ 5 นอกจากนี้ S และ S-Di พบว่าดูดซับได้ดีที่พีเอช 9 ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางประจุสำหรับตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ แต่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในกรณีตัวกลางดูดซับชนิดสไลด์จ์

จากผลการทดลองที่ได้ รับสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนยังคงมีความสามารถในการดูดซับลิแกนด์และ เแทนนินลงเหลือและมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นตัวกลางดูดซับเพื่อกำจัดมลสารย่อยสลายยากดังกล่าวต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาผล กระทบ ของการมีอยู่ของ โพลีเมอร์ที่ใช้ ในการปรับสภาพสไลด์จ์ในขั้นตอนการกำจัดสไลด์จ์ก่อนตากในลานตากตะกอน ว่าส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ ลิแกนด์ และ เแทนนินหรือไม่

5.2.2 ศึกษารูปแบบและปรากฏการณ์ในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ในกรณีที่มีจุลชีพเกาะติด

5.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับลิแกนด์และ เแทนนินในน้ำ เสียจริงเนื่องจากการมีอยู่ของมลสารอื่นๆอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

5.2.4 ในการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว อาจต้องคำนึงด้วยว่าในการทดลองนั้นใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมมาจากน้ำตาลซึ่งย่อยสลายง่าย แต่ถ่านกัมมันต์ไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่มีมลสารที่ย่อยสลายยาก อาจทำในประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนแล้ว มีประสิทธิภาพลดลง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จรรยาพร พุ่มงาม . 2545. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงแล ะเปลือกหอยแมลงภู่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต . สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. 2538. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. (ม.ป.ท.).
- ชยาภาส ทับทอง. 2547. การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์ . วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. 28(1) :1-12
- ชยาภาส ทับทอง. 2549. การกำจัดไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์ . วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. 1 : 25-37
- โชคเชื้อ ศรีสุชาติ. การกำจัดสีของน้ำเสียจากการฟอกเยื่อของโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ . วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- ธัญรัตน์ แสงสุวรรณ. ผลของอายุสัณฐานที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสที่ใช้ วัสดุช่วยตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์และคณะ . Activated carbon [online]. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2550. แหล่งที่มา : <http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002/> [1 กรกฎาคม 2552]
- ธวัชชัย สิงห์ศิริ. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา เพื่อการกำจัดโครเมียมและนิลเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ . วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต , สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.
- ปรางศิริ ศรีสุภพัชร . การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์ และสัณฐานออกจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแยกทีละขั้นตอนที่ค่อยสลายแล้ว . วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.

- พิชามณูชู้ พัฒรชนม์ . การกำจัดสารประกอบเพอร์ฟลูออริเนทและความชุ่มชื้นในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรม
 สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- พิมพ์ชนก เต็งเจริญ. การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
 มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
 2546.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2525. การออกแบบขั้นขบวนการของระบบกำจัดน้ำเสียโดยวิธีชีววิทยา.
 เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :
 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1.
 กรุงเทพมหานคร : บริษัทแซน. อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์.
- ยรรยงค์ อินทร์ม่วง . วิกฤติการณ์มลพิษในแม่น้ำพอง [online].กรุงเทพมหานคร. FACT SHEET
 สถานการณ์สุขภาพและสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย . แหล่งที่มา : [http://advisor
 .anamai.moph.go.th/factsheet/envi3-10.htm](http://advisor.anamai.moph.go.th/factsheet/envi3-10.htm) [1 ธันวาคม 2552]
- วิภาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล . ลิกนิน-แทนนิน [online]. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์วิเคราะห์มลพิษ สำนัก .
 เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2548. แหล่งที่มา :
[http://www2.diw.go.th/research/%E0%CD%A1%CA%D2%C3%E0%BC%C2%E1
 %BE%C3%E8%C5%D4%A1%B9%D4%B9.pdf](http://www2.diw.go.th/research/%E0%CD%A1%CA%D2%C3%E0%BC%C2%E1%BE%C3%E8%C5%D4%A1%B9%D4%B9.pdf) [1 ธันวาคม 2552]
- รัชไนย์ รุกชชาติ . 2546. สีข้อมและการบำบัดสี ในน้ำทิ้ง [online]. กรุงเทพมหานคร : กรม
 วิทยาศาสตร์ทหารเรือ . แหล่งที่มา : [http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/
 Brithday_data/biology.html](http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.html) [1 ธันวาคม 2552]
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา . เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น .
 กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- สถิตรัตน์ รอดอารี . ผลของชนิดและขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการตก
 ตะกอนในระบบเอเอส . วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิต
 วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- สุรัชย์ ทักษิณวรารจารย์. 2526. การควบคุมการจมน้ำของแอตติเวดเต็ดสดัดจ์เนื่องจากจุลินทรีย์
 ที่เป็นเส้นใยโดยการป้อนน้ำเสียเข้าถังเติมอากาศหกถัง . วิทยานิพนธ์ปริญญา
 มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ . Thermogravimetric Analysis [online].
 กรุงเทพมหานคร : สำนักเทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ , 2552. แหล่งที่มา :
<http://www.mtec.or.th/laboratory/ta/index.php/tools-and-services/13> [20 ตุลาคม
 2552]

เอกลักษณะณ์ ไชยพันธุ์ . การเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของสไลด์จ์ในระบบเอเอสด้วยวัสดุ
 ช่วยตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.

อุตสาหกรรม , กระทรวง . สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม . มาตรฐาน
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร : 2532.

ภาษาอังกฤษ

Anirudhan,T.S.and Ramachandran, M. Adsorptive removal of tannin from aqueous
 solutions by cationic surfactant-modified bentonite clay. Journal of Colloid and
 Interface Science. 299 (2006): 116–124

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.

Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. Carbon adsorption handbook. Michigan : Ann
 Arbor Science, 1978.

Das,C.P. and Patnaik, N.L, Removal of Lignin by Industrial solid wastes.Practice
 Periodical of Hazardous,Toxic and Redooactive WasteManagement.4(2000):
 156-161

Dilek, FB. and Bese, S. Treatment of pulping effluents by using alum and clay-Co lour
 removal and sludge characteristic. Water SA. 27 (July 2001): 361-366.

Faust, S.D., and Aly, O.M. Adsorption processes for water treatment. Stoneham : MA.
 Butterworth, 1987.

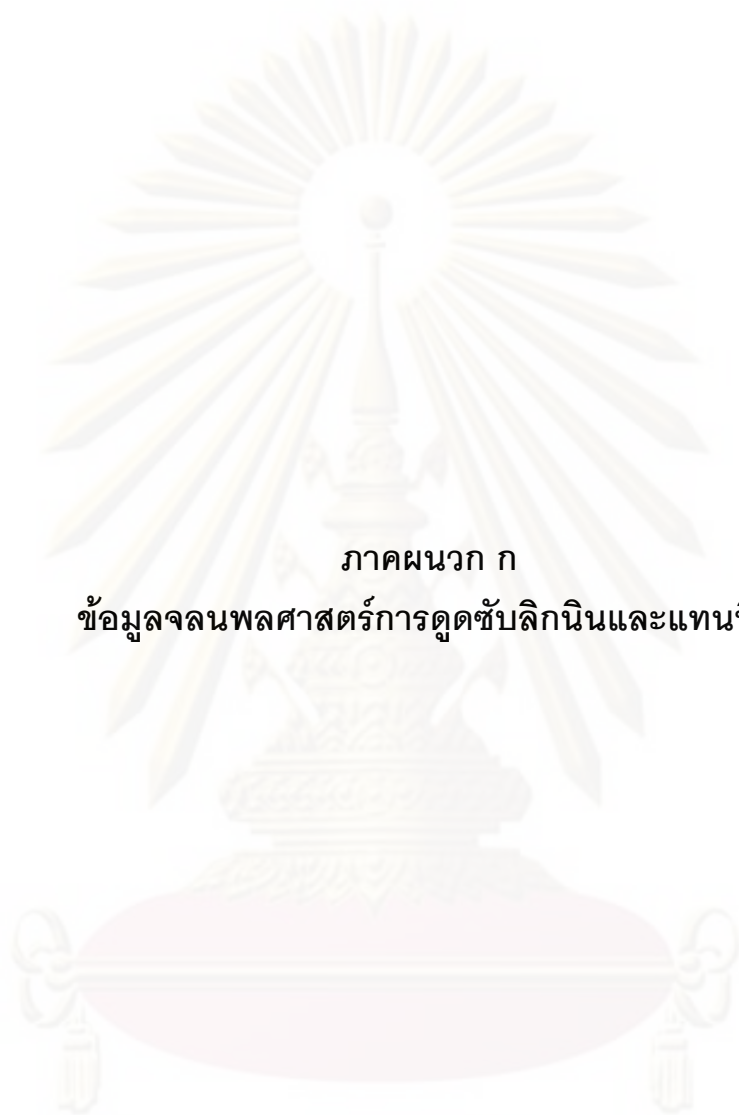
Gea, G., Murillo, M.B. and Arauso, J.2002. Thermal degradation of alkaline black
 liquaor from straw. Thermogravimetric study. Industrial and Engineering
 Chemistry Research. 41: 4714-4721.

- Gulnaz, O., Kaya, A., and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. Journal of Hazardous Materials. 134: 190-196.
- Matcalf and Eddy. Wastewater engineering: treatment disposal and reuse. 3rd edition. New York : McGraw-Hill, 1991.
- Nassar, M.M. 1984. Thermal studies on kraft black liquor. Energy Sources.25: 837-844.
- Qasim Syed R. 1999. Wastewater Treatment Plants Planning, Design and Operation. 2nd ed. Florida: CRC Press.
- Runge. Troy M. A review of the chemistry involved D(E*) delignification of kraft pulps [Online].Available from: www.ipst.edu/~aragausk/Literature_Reviews/litreview1.pdf [2005, December, 6]
- Sanchez., J. L., Gea, G., Gonzalo, A., Bibao, R., and Arauzo, J. 2004. Kinetic study of the thermal degradation of alkaline straw black liquor in nitrogen atmosphere. Chemical Engineering Journal. 104:1-6.
- Soonglendsongpha, S. Removal of haloacetic acid by adsorption on mesoporous silicates. The Master's Thesis, Department of Science Program in Environmental Management, Chulalongkorn University. 2006.
- Tantemsapya,N., Wirojanagud,W., and Sakolchai,S. Removal of color, COD and lignin of pulp and paper wastewater using wood ash. Songklanakarinn journal of science and technology. 26 (2004) : 1-14
- Valencia, G., and Gloyna, E.F. On the synthesis of activated carbon column design data. Technical report EHE-72-11 CRWR 90. Civil engineering department The University of Texas at Austin, May 1972.
- Venkata Mohan, S. and Karthikeyan,J. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal.Environmental Pollution. 97(1-2)(1997):183-187.
- Xing, W., Ngo, H.H., Kim,S.H.,Guo,W.S. and Hagare,P. Adsorption and bioadsorption of granular activated carbon (GAC) for dissolved organic carbon (DOC) removal in wastewater . Bioresource Technology. 99(1999): 8674-8678
- Zhou,H. and Smith,W. D. Process parameter development for ozonation of kraft pulp mill effluents. Wat.Sci.Tech. , 35(2-3) (1997):251-259.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับลิแกนด์และแทนนิน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับลิกนินและแทนนิน

ที่พีเอช 7 ค่าความแรงไอออน 0.01โมลาร์ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับลิกนินด้วย PAC

เวลา (ชม.)	ลิกนิน				
	ความเข้มข้นลิกนิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.000	263.300	0.000	2.305	5.573
0.083	275.150	263.300	124.233	1.989	4.935
0.166	265.930	263.300	170.365	1.952	4.532
0.333	263.620	263.300	181.899	1.894	4.399
1	259.340	263.300	203.317	1.775	4.094
1.5	260.650	263.300	196.727	1.660	4.198
2	260.330	263.300	198.375	1.459	4.173
3	259.340	263.300	203.317	1.351	4.094
4	258.680	263.300	206.613	1.117	4.038
5	259.670	263.300	201.670	0.719	4.121
6	260.330	263.300	198.375	0.551	4.173

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับลิกนิน PACB

เวลา (ชม.)	ลิกนิน				
	ความเข้มข้นลิกนิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.00	125.757	0.000	4.834	0
0.083	281.08	125.757	37.830	4.477	0.00
0.166	265.27	125.757	69.464	4.031	0.00
0.333	260.33	125.757	79.350	3.837	0.00
1	249.12	125.757	101.757	3.178	0.01
1.5	248.79	125.757	102.416	3.150	0.01
2	250.77	125.757	98.462	3.307	0.02
3	249.68	125.757	100.637	3.224	0.03
4	252.42	125.757	95.167	3.421	0.04
5	251.76	125.757	96.485	3.377	0.05
6	249.12	125.757	101.757	3.178	0.06

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับลิแกนด์ PACB-Di

เวลา (ชม.)	ลิแกนด์				
	ความเข้มข้นลิแกนด์ (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.00	131.680	0.000	4.880	0
0.083	288.27	131.680	23.469	4.684	0.00
0.166	272.29	131.680	55.423	4.334	0.00
0.333	261.33	131.680	77.331	3.995	0.00
1	246.16	131.680	107.689	3.178	0.01
1.5	245.83	131.680	108.348	3.150	0.01
2	245.99	131.680	108.018	3.164	0.02
3	246.32	131.680	107.359	3.191	0.03
4	246.39	131.680	107.227	3.197	0.04
5	245.83	131.680	108.348	3.150	0.05
6	246.32	131.680	107.359	3.191	0.06

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับลิแกนด์ด้วย S

เวลา (ชม.)	ลิแกนด์				
	ความเข้มข้นลิแกนด์ (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.00	19.416	4.000	2.735	0
2	281.08	19.416	16.015	1.224	0.12
4	265.27	19.416	17.170	0.809	0.23
6	260.33	19.416	18.528	-0.118	0.32
12	249.12	19.416	20.022	-	0.60
16	248.79	19.416	22.194	-	0.72
20	250.77	19.416	23.417	-	0.85
24	249.68	19.416	24.028	-	1.00

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับลิกันินด้วย S-Di

เวลา (ชม.)	ลิกันิน				
	ความเข้มข้นลิกันิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.00	12.814	0.000	2.551	0
2	262.52	12.814	9.897	1.071	0.20
4	258.75	12.814	10.650	0.772	0.38
6	254.61	12.814	11.479	0.289	0.52
12	243.40	12.814	13.720	-	0.87
16	239.46	12.814	14.507	-	1.10
20	235.93	12.814	15.214	-	1.31
24	236.85	12.814	15.030	-	1.60

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับแทนนินด้วย PAC

เวลา (ชม.)	แทนนิน				
	ความเข้มข้นแทน นิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.000	219.500	0.000	5.391	0
0.083	302.34	219.500	-11.700	5.443	-0.01
0.166	289.33	219.500	53.350	5.113	0.00
0.5	281.14	219.500	94.314	4.830	0.01
1	273.58	219.500	132.122	4.470	0.01
2	259.10	219.500	204.483	2.709	0.01
3	262.28	219.500	188.622	3.430	0.02
4	263.16	219.500	184.208	3.564	0.02
5	265.13	219.500	174.347	3.810	0.03
6	267.58	219.500	162.088	4.050	0.04
12	266.69	219.500	166.571	3.969	0.07
18	263.55	219.500	182.244	3.618	0.10
24	263.158	219.500	184.208	3.564	0.13

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับแทนนิน PACB

เวลา (ชม.)	แทนนิน				
	ความเข้มข้นแทนนิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.000	81.960	0.000	4.406	0
0.083	286.45	81.960	27.105	4.005	0.00
0.166	280.08	81.960	39.850	3.740	0.00
0.5	279.04	81.960	41.925	3.690	0.01
1	272.82	81.960	54.366	3.318	0.02
2	268.61	81.960	62.787	2.954	0.03
3	265.04	81.960	69.917	2.488	0.04
4	266.33	81.960	67.338	2.683	0.06
5	266.22	81.960	67.566	2.667	0.07
6	259.02	81.960	81.952	-4.836	0.07
12	257.51	81.960	84.986	-	0.14
18	252.766	81.960	94.469	-	0.19
24	254.928	81.960	90.145	-	0.27

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับแทนนิน PACB-Di

เวลา (ชม.)	แทนนิน				
	ความเข้มข้นแทนนิน (มก./ล.)		ความเข้มข้นลิกันนิน (มก./ล.)		ความเข้มข้นลิกันนิน (มก./ล.)
0	300.000	81.960	0.000	4.406	0
0.083	286.447	81.960	27.105	4.005	0.00
0.166	280.075	81.960	39.850	3.740	0.00
0.5	279.037	81.960	41.925	3.690	0.01
1	272.817	81.960	54.366	3.318	0.02
2	268.607	81.960	62.787	2.954	0.03
3	265.041	81.960	69.917	2.488	0.04
4	266.331	81.960	67.338	2.683	0.06
5	266.217	81.960	67.566	2.667	0.07
6	259.024	81.960	81.952	-4.836	0.07
12	257.507	81.960	84.986	-	0.14
18	252.766	81.960	94.469	-	0.19
24	254.928	81.960	90.145	-	0.27

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับแทนนินด้วย S

เวลา (ชม.)	แทนนิน				
	ความเข้มข้นแทนนิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.000	20.294	6.400	2.631	0
0.0833333	274.499	20.294	11.500	2.174	0.01
0.1666667	269.531	20.294	12.494	2.054	0.01
0.5	260.617	20.294	14.277	1.795	0.04
1	256.900	20.294	15.020	1.663	0.07
2	246.773	20.294	17.045	1.178	0.12
3	235.811	20.294	19.238	0.055	0.16
4	226.215	20.294	21.157	-	0.19
5	218.287	20.294	22.743	-	0.22
6	198.526	20.294	26.695	-	0.22
12	202.319	20.294	25.936	-	0.46
18	199.284	20.294	26.543	-	0.68
24	202.812	20.294	25.838	-	0.93

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ดูดซับแทนนินด้วย S-Di

เวลา (ชม.)	แทนนิน				
	ความเข้มข้นแทนนิน (มก./ล.)	qe	qt	log (qe-gt)	t/qt
0	300.000	14.538	0.000	2.677	0
0.0833333	274.50	14.538	7.500	1.951	0.01
0.1666667	268.70	14.538	8.661	1.771	0.02
0.5	261.53	14.538	10.095	1.491	0.05
1	248.59	14.538	12.681	0.619	0.08
2	246.81	14.538	13.038	0.406	0.15
3	237.93	14.538	14.813	-	0.20
4	238.01	14.538	14.798	-	0.27
5	231.60	14.538	16.080	-	0.31
6	227.31	14.538	16.937	-	0.35
12	228.83	14.538	16.634	-	0.72
18	227.808	14.538	16.838	-	1.07
24	224.432	14.538	17.514	-	1.37



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการศึกษาไอซีเทอร์ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลการศึกษาไอโซเทอร์ม

ที่ความแรงไอออน 0.01โมลาร์ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PAC ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.200	33.266	28.865	0.035	0.030	1.460	1.522
100	0.200	80.799	56.026	0.018	0.012	1.748	1.907
200	0.200	181.297	127.326	0.008	0.006	2.105	2.258
300	0.200	257.349	168.068	0.006	0.004	2.225	2.411
400	0.200	357.847	210.764	0.005	0.003	2.324	2.554
500	0.200	442.048	289.759	0.003	0.002	2.462	2.645

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PAC ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.200	40.057	15.284	1.184	0.025	1.184	1.603
100	0.200	82.157	39.050	1.592	0.012	1.592	1.915
200	0.200	184.692	113.745	2.056	0.005	2.056	2.266
300	0.200	251.917	188.439	2.275	0.004	2.275	2.401
400	0.200	353.773	231.135	2.364	0.003	2.364	2.549
500	0.200	444.764	276.178	2.441	0.002	2.441	2.648

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PAC ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.200	41.415	18.679	0.054	0.024	1.271	1.617
100	0.200	83.515	25.470	0.039	0.012	1.406	1.922
200	0.200	184.013	62.817	0.016	0.005	1.798	2.265
300	0.200	245.127	117.140	0.009	0.004	2.069	2.389
400	0.200	364.638	176.812	0.006	0.003	2.248	2.562
500	0.200	448.839	255.807	0.004	0.002	2.408	2.652

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิกนินด้วย PACB ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น ลิกนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิกนิน ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	33.028	12.021	0.083	0.030	1.080	1.519
100	0.500	82.598	18.812	0.053	0.012	1.274	1.917
200	0.500	171.553	70.419	0.014	0.006	1.848	2.234
300	0.500	251.679	78.567	0.013	0.004	1.895	2.401
400	0.500	351.498	97.004	0.010	0.003	1.987	2.546
500	0.500	429.588	140.824	0.007	0.002	2.149	2.633

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิกนินด้วย PACB ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น ลิกนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิกนิน ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	35.065	16.095	0.062	0.029	1.207	1.545
100	0.500	79.882	20.169	0.050	0.013	1.305	1.902
200	0.500	170.194	74.492	0.013	0.006	1.872	2.231
300	0.500	240.814	97.580	0.010	0.004	1.989	2.382
400	0.500	344.707	110.58	0.009	0.003	2.044	2.537
500	0.500	434.341	131.317	0.008	0.002	2.118	2.638

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิกนินด้วย PACB ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น ลิกนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิกนิน ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	39.140	12.021	0.083	0.026	1.080	1.593
100	0.500	80.561	16.095	0.062	0.012	1.207	1.906
200	0.500	170.874	51.406	0.019	0.006	1.711	2.233
300	0.500	234.703	67.702	0.015	0.004	1.831	2.371
400	0.500	357.610	84.781	0.012	0.003	1.928	2.553
500	0.500	437.736	124.527	0.008	0.002	2.095	2.641

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PACB-Di ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	32.893	12.293	0.081	0.030	1.090	1.517
100	0.500	80.425	23.157	0.043	0.012	1.365	1.905
200	0.500	171.417	70.690	0.014	0.006	1.849	2.234
300	0.500	250.865	80.197	0.012	0.004	1.904	2.399
400	0.500	345.930	108.140	0.009	0.003	2.034	2.539
500	0.500	420.625	158.751	0.006	0.002	2.201	2.624

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PACB-Di ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	35.609	15.009	0.067	0.028	1.176	1.552
100	0.500	78.388	23.157	0.043	0.013	1.365	1.894
200	0.500	176.170	62.542	0.016	0.006	1.796	2.246
300	0.500	244.074	91.061	0.011	0.004	1.959	2.388
400	0.500	345.251	109.498	0.009	0.003	2.039	2.538
500	0.500	417.908	164.183	0.006	0.002	2.215	2.621

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย PACB-Di ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	0.500	38.325	13.651	0.073	0.026	1.135	1.583
100	0.500	80.425	16.367	0.061	0.012	1.214	1.905
200	0.500	176.849	39.454	0.025	0.006	1.596	2.248
300	0.500	241.358	54.393	0.018	0.004	1.736	2.383
400	0.500	348.646	102.707	0.010	0.003	2.012	2.542
500	0.500	421.983	156.035	0.006	0.002	2.193	2.625

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	10.756	5.657	0.177	0.093	0.753	1.032
100	5.00	42.671	9.867	0.101	0.023	0.994	1.630
200	5.00	143.169	12.719	0.079	0.007	1.104	2.156
300	5.00	215.147	15.163	0.066	0.005	1.181	2.333
400	5.00	316.324	16.735	0.060	0.003	1.224	2.500
500	5.00	385.586	22.883	0.044	0.003	1.360	2.586

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	20.263	4.570	0.219	0.049	0.660	1.307
100	5.00	52.856	7.422	0.135	0.019	0.871	1.723
200	5.00	152.675	10.953	0.091	0.007	1.040	2.184
300	5.00	219.900	13.941	0.072	0.005	1.144	2.342
400	5.00	323.114	15.377	0.065	0.003	1.187	2.509
500	5.00	395.772	20.846	0.048	0.003	1.319	2.597

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	32.485	2.533	0.395	0.031	0.404	1.512
100	5.00	63.721	4.978	0.201	0.016	0.697	1.804
200	5.00	161.503	7.015	0.143	0.006	0.846	2.208
300	5.00	219.900	9.731	0.103	0.005	0.988	2.342
400	5.00	324.472	15.106	0.066	0.003	1.179	2.511
500	5.00	399.846	20.031	0.050	0.003	1.302	2.602

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S-Di ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	27.902	2.227	0.449	0.036	0.348	1.446
100	5.00	66.607	5.079	0.197	0.015	0.706	1.824
200	5.00	169.142	7.524	0.133	0.006	0.876	2.228
300	5.00	226.860	12.820	0.078	0.004	1.108	2.356
400	5.00	328.716	14.257	0.070	0.003	1.154	2.517
500	5.00	411.559	17.688	0.057	0.002	1.248	2.614

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S-Di ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	29.260	2.771	0.361	0.034	0.443	1.466
100	5.00	68.644	4.265	0.234	0.015	0.630	1.837
200	5.00	166.426	8.203	0.122	0.006	0.914	2.221
300	5.00	232.293	11.462	0.087	0.004	1.059	2.366
400	5.00	321.247	15.751	0.063	0.003	1.197	2.507
500	5.00	419.708	16.058	0.062	0.002	1.206	2.623

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับลิแกนด์ด้วย S-Di ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น ลิแกนด์เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นลิแกนด์ ที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
50	5.00	34.692	2.092	0.478	0.029	0.320	1.540
100	5.00	72.718	3.178	0.315	0.014	0.502	1.862
200	5.00	171.179	5.079	0.197	0.006	0.706	2.233
300	5.00	230.935	7.524	0.133	0.004	0.876	2.363
400	5.00	324.642	15.072	0.066	0.003	1.178	2.511
500	5.00	411.559	17.688	0.057	0.002	1.248	2.614

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PAC ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
57	0.200	38.413	91.781	0.011	0.026	1.963	1.584
100	0.200	71.553	140.738	0.007	0.014	2.148	1.855
202	0.200	167.960	170.865	0.006	0.006	2.233	2.225
312	0.200	256.835	276.311	0.004	0.004	2.441	2.410
417	0.200	354.748	310.204	0.003	0.003	2.492	2.550
526	0.200	456.428	347.863	0.003	0.002	2.541	2.659

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PAC ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
32	0.200	23.918	40.620	0.025	0.042	1.609	1.379
103	0.200	90.143	64.902	0.015	0.011	1.812	1.955
240	0.200	213.322	133.335	0.007	0.005	2.125	2.329
318	0.200	283.079	173.070	0.006	0.004	2.238	2.452
421	0.200	359.900	303.313	0.003	0.003	2.482	2.556
529	0.200	452.615	382.783	0.003	0.002	2.583	2.656

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PAC ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
51	0.200	25.151	129.472	0.008	0.040	2.112	1.401
103	0.200	69.872	164.078	0.006	0.014	2.215	1.844
195	0.200	148.668	230.628	0.004	0.007	2.363	2.172
291	0.200	238.111	262.572	0.004	0.004	2.419	2.377
376	0.200	313.445	314.481	0.003	0.003	2.498	2.496
410	0.200	340.598	349.087	0.003	0.003	2.543	2.532

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
57	0.500	51.497	10.545	0.095	0.019	1.023	1.712
100	0.500	85.390	28.621	0.035	0.012	1.457	1.931
202	0.500	181.044	42.178	0.024	0.006	1.625	2.258
312	0.500	254.102	115.990	0.009	0.004	2.064	2.405
417	0.500	349.756	134.066	0.007	0.003	2.127	2.544
526	0.500	459.720	132.560	0.008	0.002	2.122	2.662

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
32	0.500	10.278	43.529	0.023	0.097	1.639	1.012
103	0.500	73.412	59.423	0.017	0.014	1.774	1.866
240	0.500	195.266	89.445	0.011	0.005	1.952	2.291
318	0.500	262.374	110.637	0.009	0.004	2.044	2.419
421	0.500	345.376	150.372	0.007	0.003	2.177	2.538
529	0.500	448.246	161.851	0.006	0.002	2.209	2.652

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
51	0.500	15.386	71.318	0.014	0.065	1.853	1.187
103	0.500	62.238	80.901	0.012	0.016	1.908	1.794
195	0.500	144.760	100.067	0.010	0.007	2.000	2.161
291	0.500	232.073	117.104	0.009	0.004	2.069	2.366
376	0.500	290.371	171.941	0.006	0.003	2.235	2.463
410	0.500	316.725	187.381	0.005	0.003	2.273	2.501

ตารางที่ ข-22 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
57	0.500	34.647	44.244	0.023	0.029	1.540	1.646
100	0.500	60.255	78.891	0.013	0.017	1.780	1.897
202	0.500	138.586	127.094	0.008	0.007	2.142	2.104
312	0.500	239.512	145.171	0.007	0.004	2.379	2.162
417	0.500	336.672	160.234	0.006	0.003	2.527	2.205
526	0.500	440.611	170.779	0.006	0.002	2.644	2.232

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
32	0.500	10.777	42.531	0.024	0.093	1.629	1.032
103	0.500	71.262	63.723	0.016	0.014	1.804	1.853
240	0.500	203.712	72.553	0.014	0.005	1.861	2.309
318	0.500	271.262	92.862	0.011	0.004	1.968	2.433
421	0.500	346.758	147.608	0.007	0.003	2.169	2.540
529	0.500	444.771	168.800	0.006	0.002	2.227	2.648

ตารางที่ ข-24 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย PACB-Di ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
51	0.500	17.931	66.229	0.015	0.056	1.821	1.254
103	0.500	54.932	95.511	0.010	0.018	1.980	1.740
195	0.500	144.642	100.303	0.010	0.007	2.001	2.160
291	0.500	226.365	128.520	0.008	0.004	2.109	2.355
376	0.500	302.232	148.219	0.007	0.003	2.171	2.480
410	0.500	328.054	164.723	0.006	0.003	2.217	2.516

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
57	5.00	35.025	4.349	0.230	0.029	0.638	1.544
100	5.00	84.735	2.993	0.334	0.012	0.476	1.928
202	5.00	117.875	16.852	0.059	0.008	1.227	2.071
312	5.00	148.756	32.668	0.031	0.007	1.514	2.172
417	5.00	209.010	41.556	0.024	0.005	1.619	2.320
526	5.00	273.783	50.443	0.020	0.004	1.703	2.437
703	5.00	346.089	70.782	0.014	0.003	1.850	2.539
998	5.00	488.440	102.312	0.010	0.002	2.010	2.689

ตารางที่ ข-26 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
32	5.00	8.114	4.786	0.209	0.123	0.680	0.909
103	5.00	56.679	9.289	0.108	0.018	0.968	1.753
240	5.00	149.394	18.119	0.055	0.007	1.258	2.174
318	5.00	202.374	23.064	0.043	0.005	1.363	2.306
421	5.00	237.694	36.574	0.027	0.004	1.563	2.376
529	5.00	290.674	47.699	0.021	0.003	1.679	2.463
703	5.00	392.219	61.556	0.016	0.003	1.789	2.594
998	5.00	578.532	84.294	0.012	0.002	1.926	2.762

ตารางที่ ข-27 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S ที่พีเอช 9

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
51	5.00	6.698	8.869	0.113	0.149	0.948	0.826
103	5.00	13.353	17.867	0.056	0.075	1.252	1.126
195	5.00	20.274	34.904	0.029	0.049	1.543	1.307
291	5.00	42.635	49.598	0.020	0.023	1.695	1.630
376	5.00	80.968	59.075	0.017	0.012	1.771	1.908
410	5.00	102.264	79.547	0.013	0.010	1.901	2.010
703	5.00	221.255	95.749	0.010	0.005	1.981	2.345
998	5.00	333.591	133.282	0.008	0.003	2.125	2.523

ตารางที่ ข-28 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 5

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
57	5.00	43.685	2.617	0.382	0.023	0.418	1.640
100	5.00	80.591	3.822	0.262	0.012	0.582	1.906
202	5.00	88.876	22.651	0.044	0.011	1.355	1.949
312	5.00	161.934	30.033	0.033	0.006	1.478	2.209
417	5.00	245.537	34.250	0.029	0.004	1.535	2.390
526	5.00	271.899	50.820	0.020	0.004	1.706	2.434
703	5.00	422.535	55.493	0.018	0.002	1.744	2.626
998	5.00	555.848	88.830	0.011	0.002	1.949	2.745

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

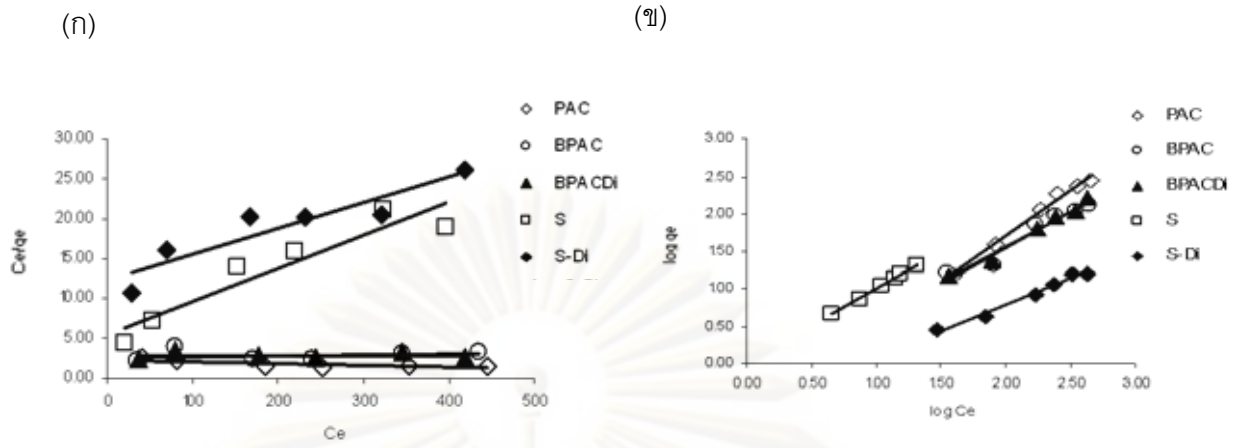
ตารางที่ ข-29 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 7

ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
32	5.00	18.076	2.793	0.358	0.055	0.446	1.257
103	5.00	71.056	6.414	0.156	0.014	0.807	1.852
240	5.00	168.186	14.361	0.070	0.006	1.157	2.226
318	5.00	221.166	19.305	0.052	0.005	1.286	2.345
421	5.00	256.486	32.815	0.030	0.004	1.516	2.409
529	5.00	274.146	51.005	0.020	0.004	1.708	2.438
703	5.00	362.446	67.511	0.015	0.003	1.829	2.559
998	5.00	618.516	76.297	0.013	0.002	1.883	2.791

ตารางที่ ข-30 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนินด้วย S-Di ที่พีเอช 9

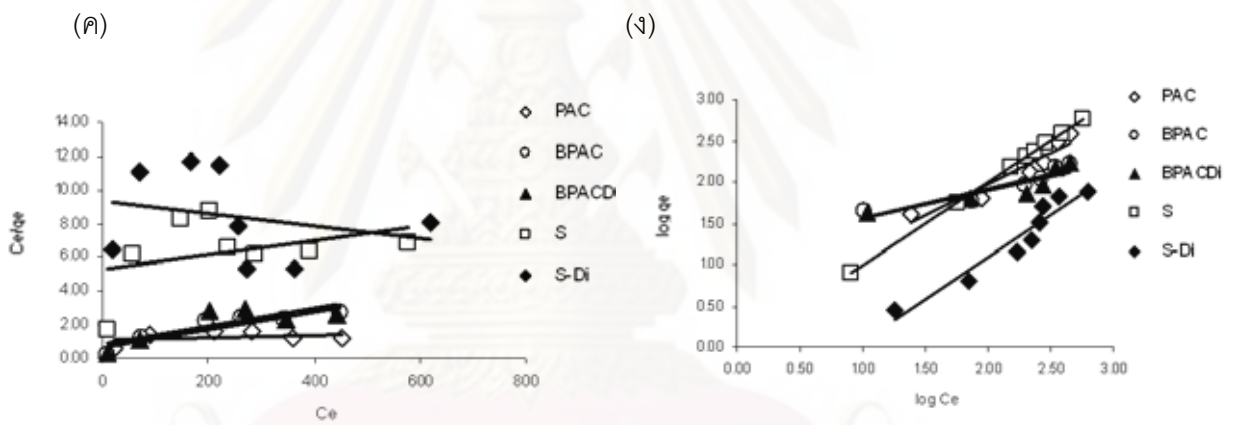
ความเข้มข้น แทนนินเริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก ตัวกลางดูดซับ (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นแทน นินที่สมดุล (มก./ล.)	ความสามารถใน การดูดซับ (มก./ก.)	1/q	1/Ce	log q	log Ce
51	5.00	3.386	9.532	0.105	0.295	0.979	0.530
103	5.00	4.717	19.594	0.051	0.212	1.292	0.674
195	5.00	16.430	35.673	0.028	0.061	1.552	1.216
291	5.00	36.927	50.740	0.020	0.027	1.705	1.567
376	5.00	78.188	59.631	0.017	0.013	1.775	1.893
410	5.00	108.003	60.482	0.017	0.009	1.782	2.033
703	5.00	353.995	69.201	0.014	0.003	1.840	2.549
998	5.00	533.252	93.350	0.011	0.002	1.970	2.727

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข-1 ไอโซเทอร์มการดูดซับลิกัน

(ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรุนดลิช



ภาพที่ ข-2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแทนนิน

(ก) แลงมัวร์ (ข) ฟรุนดลิช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอิสริยาภรณ์ บุญยืน เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี ปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ยี่สิบสี่เวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย