

การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยเศษดินเผา

ปริญญานิพนธ์

ของ

บดินทร์ หิรัญยูปกรณ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ตุลาคม 2547

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๒๕๖.๓๕๘

๒๕๖๓

๖.๖

การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยเศษดินเผา

บทคัดย่อ

ของ

ปดิษฐ์ นิลบุญปกรณ์

๒๐๓.๓.๒๕๖๓

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ตุลาคม ๒๕๖๓

๒๕๖๓

บัดินทร์ หิรัญญูปกรณ์ . (2547) การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยเศษดินเผา
ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมศาสตร์).กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒคณะกรรมการควบคุม : ผศ.ดร. ศิริวรรณ ศรีสรจักร์
ดร. สีนสุภา รุ่ยจุลเจิม

งานวิจัยได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะกั่ว(Pb(II))
สังกะสี (Zn(II)) และแคดเมียม (Cd(II)) โดยใช้เศษดินเผาเป็นตัวดูดซับ โดยทำการทดลองทั้งแบบกะ
และแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง โดยเศษดินเผาที่ทำการทดสอบจะมีขนาด 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh -
16 mesh ปริมาณอย่างละ 5 กรัม สารละลายมีความเข้มข้นเริ่มต้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร
50 มิลลิตร จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของไอออนโลหะหนักของตะกั่ว แคดเมียม และ
สังกะสี ด้วยตัวดูดซับทั้ง 2 ขนาด จะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 300,300,300 นาทีตามลำดับ โดยเศษ
ดินเผาที่มีขนาด 4 mesh -8 mesh สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วแคดเมียม และสังกะสี ได้ 0.49 ,
0.38 , 0.34 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกรัมเศษดินเผาซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 97.51% ,
77.86% และ 68.68% ตามลำดับ จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ (30°C - 60°C) และค่า pH (2 - 7) ที่
มีต่อการดูดซับ พบว่าค่าการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับที่
เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน และที่ pH = 5,7,7 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดของไอออนโลหะตะกั่ว,
แคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 97.54%, 77.51%และ 69.461% ตามลำดับ จากการเปลี่ยนแปลงของ
อุณหภูมิทำให้สามารถคำนวณค่าตัวแปร ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานกล
(thermodynamic parameters) ได้แก่ ค่า ΔH , ΔG , ΔS ของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำการทดลองได้
และเมื่อใช้แบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich เพื่อหาแบบจำลองการดูดซับที่ดีที่สุด
ซึ่งพบว่าแบบจำลองการดูดซับทั้งสองมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอธิบายการทดลองการ
ดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นอย่างดี

คำสำคัญ : น้ำเสีย; โลหะหนัก ; แบบจำลองการดูดซับ; เศษกระเบื้องดินเผา ; คอลัมน์

REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING
EARTHENWARE CHIPS

AN ARSTRACT
BY
BODIN HIRUNYUPAKORN

Presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of Engineer degree in
Chemical engineering at Srinakharinwirot University.

October 2004

Bodin Hirunyupakom.(2004). **Removal of Heavy Metal Ions from Synthetic Wastewater using Earthenware Chips** . Master thesis, M .Eng(Chemical Engineer) .Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof.Dr. Siriwan Srisorrachatr ,Dr. Sinsupha Chuichulcherm

Adsorption capacity of heavy metal ions by earthenware chip was investigated. The experiments were conducted in batch mode and also in continuous mode with an adsorption column. Heavy metal ions used in this study were lead (Pb(II)), cadmium(Cd(II)) and zinc(Zn(II)) and the solution was kept at 10-50 mg/l initial concentration. Sizes of earthenware chip samples used in this study were in the ranges between 4 mesh -8 mesh and 8 mesh - 16 mesh. The experimental results indicated the adsorption equilibrium of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) were obtained within 300, 300, and 300 minutes respectively regardless of the earthenware chip size. The values of adsorption capacity were 0.4938, 0.3818 and 0.3364 mg of heavy metal ions /g earthenware chip respectively. Effects of pH(2-7), temperature (30⁰C - 60⁰C) have also been investigated.

The adsorption increased as the temperature increase and has the maximum value at pH 5, 7, 7. Percent maximum adsorption values of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) were 97.54%, 77.51% and 69.461% respectively at pH=5,7,7. Adsorption reaction was endothermic and the thermodynamic parameters (ΔH , ΔG , ΔS) for Pb(II), Cd(II) and Zn(II) sorption on earthenware ship were also determined as the temperature dependence. Langmuir and Freundlich adsorption model were employed to describe the single-solute sorption isotherm. The result showed that both Langmuir and Freundlich adsorption model were appropriated for describing the isotherm.

Key words: Wastewater, metal ion , Adsorption model, Earthenware chip; Column

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยเศษดินเผา

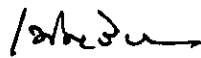
ของ

บดินทร์ หิรัญยุปกรณ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

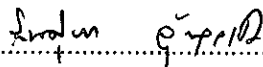
วันที่ 10 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2547

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์



.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรรค์)



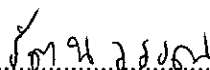
.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สิ้นสุภา จัยจุลเจิม)



.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ ดร. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว)



.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนวรรณ เกียรติโกมล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินไปและสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรวัตร ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ดร. สีนุภา จุ้ยจุลเจิม ดร. สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว ผศ.ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ โดยท่านทั้ง 4 ได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาในระหว่างดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการเตรียมการคัดขนาดของตัวดูดซับ รวมไปถึงคณะอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยอำนวยความสะดวก และคอยให้กำลังใจจนกระทั่งเป็นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

บดินทร์ หิรัญยุปกรณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย

จาก

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
หลักการและแนวความคิด.....	1
วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์.....	2
ขอบเขตของปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ระยะเวลาจัดทำปริญญานิพนธ์	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนัก	4
ความหมายของแร่ดินเหนียว.....	12
ชนิดของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ	14
ความหมายของน้ำเสีย	17
คุณลักษณะของน้ำเสีย.....	22
กระบวนการกำจัดน้ำเสีย.....	25
การดูดซับ.....	27
3 การดำเนินการทดลอง	43
วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง	42
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
วิธีการทดลอง	43
การเตรียมเศษดินเผาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ	43
ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของเศษดินเผาที่อุณหภูมิห้อง	43
ศึกษาแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich	45
ศึกษาผลของกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก	46
การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนัก	47
ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ แบบต่อเนื่องด้วยคอลัมน์ดูดซับ	48

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	49
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	93
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	100

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงค่า ตัวแปรอุณหพลศาสตร์ ของโลหะชนิดต่าง ๆ	10
2 แสดงการดูดซับไอออนโลหะแคลเซียมและสังกะสี บนแร่ Kaolinite	11
3 แสดงสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปในการเผาระยะต่างๆ	16
4 สารเคมีที่สำคัญในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	18
5 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539	21
6 หน้าทีหลักของวิธีบำบัดน้ำเสียทางกายภาพต่างๆ	26
7 ช่วงของ pH ที่ทำให้โลหะหนักเกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์	46
8 ค่า v_m , ค่า n ค่า K และค่า R^2 ของการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยใช้เศษดินเผา	56
9 คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะตะกั่ว แคลเซียม และสังกะสี	57
10 แสดงแสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคลเซียม และสังกะสีที่ค่าพีเอช ต่างๆ	60
11 แสดงแสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคลเซียม และสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ	63
12 แสดงค่า K_d และ ΔG ของโลหะตะกั่ว ,แคลเซียม และสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ	64
13 แสดงค่า ΔH และ ΔS ของโลหะตะกั่ว, แคลเซียม และสังกะสี	67
14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่ว ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส	80
15 แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh	80
16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความสามารถในการดูดซับโลหะแคลเซียม ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส	81
17 แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	81

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความสามารถในการดูดซับโลหะสังกะสี ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส.....	82
19 แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	82
20 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ดินเผา ที่ อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคใน ช่วง 4 mesh -8 mesh	83
21 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับแคดเมียมโดยใช้ดินเผา ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 4 mesh -8 mesh	83
22 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับสังกะสีโดยใช้ดินเผา ที่ อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 4 mesh -8 mesh	84
23 ค่า v_m , ค่า n , ค่า K และค่า R^2 ของการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยใช้เศษดินเผา.....	84
24 แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (Pb) ที่ pH ต่างๆ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	85
25 แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม ที่ค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	85
26 แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี ที่ค่า pH ต่างๆที่ อุณหภูมิ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 4 mesh -8 mesh	86
27 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่ ค่าพีเอช ต่างๆ.....	86

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
28	แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	87
29	แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	87
30	แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	88
31	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่อุณหภูมิ ต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh.....	88
32	แสดงปริมาณไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก คอลัมน์ดูดซับใช้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที	89
33	แสดงปริมาณไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก คอลัมน์ดูดซับใช้อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที	90
34	แสดงปริมาณการดูดซับโลหะตะกั่วโดยดินเผา	92
35	แสดงปริมาณการดูดซับโลหะแคดเมียมโดยดินเผา.....	93
36	แสดงปริมาณการดูดซับโลหะสังกะสีโดยดินเผา	94

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ผลกระทบของค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออน โดยใช้เปลือกถั่วฮาเซลนัท 4 กรัม.....	4
2 แสดงผลกระทบของค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี โดยใช้เปลือกถั่วฮาเซลนัท 4.0 กรัม.....	5
3 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับ แคดเมียม และสังกะสีโดยใช้โคลนแดง	6
4 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนสังกะสี.....	7
5 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนของแข็งของเหลวที่มีผลต่อการดูดซับไอออนสังกะสี.....	7
6 แสดงค่า Zeta potential แร่มอนทโมริลโลไนต์	8
7 รูปแสดงการหาค่าคงที่การดูดซับ Pseudo – first – order. ของสังกะสีและ ทองแดงบนแร่มอนทโมริลโลไนต์	9
8 โครงสร้างของ(a) silica tetrahedral unit และ (b) silica tetrahedral sheet	13
9 โครงสร้างของ a. alumina octahedral unit และ b. alumina octahedral sheet	13
10 การดูดซับของตัวดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์	30
11 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับผิว.....	32
12 รูปแบบของ adsorption Isotherm	36
13 การดูดซับภายในห่อดูดซับ	38
14 ลักษณะของ Langmuir adsorption Isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง.....	40
15 ลักษณะของ Freundlich adsorption Isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง.....	41
16 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณา	41
17 แสดงการทดสอบจลนศาสตร์การดูดซับโลหะหนัก	44
18 แสดงการทดลองหาความสัมพันธ์ ไอโซเทอม	45
19 แสดงผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผา.....	47
20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผา	48

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
21 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยเศษดินเผาปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร, pH = 5.....	50
22 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียมโดยเศษดินเผา ปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ pH = 5 แคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	50
23 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะสังกะสีโดยเศษดินเผา ปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร, pH = 5	51
24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส , pH =5	53
25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับโลหะแคดเมียมตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส , pH =5	53
26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส , pH= 5	54
27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว ตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 30เซลเซียส pH =5	54
28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับโลหะแคดเมียมตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส pH =5.....	55

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับโลหะ สังกะสี ตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ สารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส pH= 5	55
30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ C_x ในการดูดซับไอออนโลหะหนัก จากน้ำเสียสังเคราะห์	57
31 ผลของค่าพีเอชต่างๆของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ ตะกั่วเมื่อใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ สารละลายโลหะหนัก เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ,ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	58
32 ผลของค่าพีเอชต่างๆของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะแคด เมียมเมื่อ ใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ สารละลายโลหะหนัก เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	59
33 ผลของค่าพีเอชต่างๆของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ สังกะสีเมื่อ ใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ สารละลายโลหะหนัก เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	59
34 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม สารละลายโลหะเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH= 5.....	62
35 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ แคดเมียมเมื่อใช้เศษ ดินเผา 5.00 กรัม สารละลายโลหะ เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ,ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH= 5	62
36 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ สังกะสี เมื่อใช้เศษดินเผา 5.00 กรัม สารละลายโลหะ เริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH= 5	63
37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของ โลหะตะกั่ว	65
38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของ โลหะแคดเมียม	66

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของ โลหะสังกะสี	66
40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะตะกั่ว	67
41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะแคดเมียม	67
42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะสังกะสี	68
43 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก หลอดขับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ ตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 5	69
44 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก หลอดขับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ แคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7	70
45 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก หลอดขับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ สังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7	70
46 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ หลอดขับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ ตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 5	71
47 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ หลอดขับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ ตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7.....	71

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

48 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจาก

หอดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60

มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ

สังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7..... 72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและแนวความคิด

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาประเทศในด้านต่างๆมากมาย เช่น ด้านการคมนาคม การติดต่อสื่อสาร อุตสาหกรรม และเทคโนโลยี เพื่อที่จะสามารถแข่งขันกับประเทศอื่นๆได้รวมทั้งเป็นการยกระดับความเป็นอยู่ ของประชาชนให้ดีขึ้นและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นได้อย่างพอเพียง แต่การพัฒนาในด้านต่างๆเหล่านี้ หากขาดการวางแผนการจัดการ และป้องกันปัญหาที่จะเกิดตามมาอย่างรอบคอบแล้วอาจก่อให้เกิดผลกระทบในทางลบกับประเทศ ไม่ว่าจะเป็นทางเศรษฐกิจ ความมั่นคงของประเทศ ความเป็นอยู่ของ ประชาชน และที่สำคัญคือ ปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัจจุบันทั้งภาครัฐและเอกชน ต่างตระหนักถึง ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นที่นับวันก็ยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านมลพิษ ทางอากาศ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางดิน และปัญหาที่เกิดจากกากของเสียต่างๆ ที่ต้องเร่งหาทางจัดการแก้ไข ลด และ ป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคต

ปัญหาโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาหนึ่งที่ควรให้ความสนใจ เพราะโลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายตามธรรมชาติน้อยมาก เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมจะเกิดการสะสม ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่ถูกสะสมจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นและมีความเป็นพิษมากขึ้นตามลำดับ สาเหตุหนึ่งของการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเกิดเนื่องจากการฝังกลบกากของเสียอย่างไม่ถูกหลักสุขาภิบาล ทั้งที่เป็นกากของเสียอันตรายและไม่อันตรายแต่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ โดยจะเกิดน้ำชะขยะซึ่งมีองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามกากของเสียที่นำมาฝังกลบ แม้แต่ในสถานที่ฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล การบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยกลับคืนสู่ธรรมชาติจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

เทคนิคโดยทั่วไปในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำมีหลายวิธี เช่น เทคนิคการตกตะกอน , เทคนิคการกรองผ่านเยื่อแผ่นและเทคนิคการดูดซับ การที่จะเลือกใช้เทคนิคประเภทใดหรือใช้วัตถุดิบชนิดใดมาผลิต เป็นตัวดูดซับนั้น ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปฏิบัติงาน เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องพิจารณา โดยต้องสอดคล้องกับประสิทธิภาพของการใช้งานด้วย วิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงนั้นก็คือเทคนิคการดูดซับ เนื่องจากถ้าใช้สิ่งของเหลือทิ้งและมีราคาถูกมาใช้เป็นตัว

ขับบำบัดโลหะหนักได้โดยมีต้องนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากพบว่าเศษดินเผาที่ผลิตมาจากดินเหนียว มีโอกาสที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพราะในดินเหนียวจะประกอบไปด้วยแร่ดิน (Clay minerals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์มีประจุในตัวเอง มีรูพรุน รวมทั้งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก เพราะมีทั้งพื้นผิวนอก(external surface)และผิวชั้นใน (internal surface) รวมทั้งยังมีราคาถูกกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ และ ซีโอไลต์ (Su-Hsia lin ,2001) ทำให้คาดว่าเศษดินเผาน่าจะเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดโลหะหนักได้ นอกจากนั้นยังเป็นการนำสิ่งของที่เหลือใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งแทนที่จะนำไปถมเป็นกำแพงกันดินทรุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เศษดินเผาเหลือใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับของเศษดินเผา
3. เพื่อศึกษาแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm

1.3 ขอบเขตงานวิจัยและแผน

1. เป็นการศึกษาการใช้เศษดินเผาจากอำเภอกะเปอร์ จังหวัดนนทบุรี เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก โดยเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh
2. โลหะหนักในสารละลายเดี่ยวที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับด้วยเศษดินเผา ได้แก่ แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn)และตะกั่ว (Pb) โดยศึกษาเข้มข้นที่อยู่ในช่วง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ และช่วง pH ที่โลหะหนักไม่เกิดการตกตะกอน
4. วัดปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยใช้อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี(Atomic Absorption Spectrophotometer)
5. ศึกษาแบบจำลองการดูดซับโลหะหนักโดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich Isotherm
6. หาค่าตัวแปรอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic parameters) ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ΔG , ΔH และ ΔS เพื่อยืนยันการจำแนกชนิดของระบบนอกจากนั้นยังทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแบบต่อเนื่องด้วยหลอดดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนได้
2. ส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยี การบำบัดน้ำเสียในประเทศ
3. ส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เป็นประโยชน์
4. ส่งเสริมการรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมในเรื่องการบำบัดมลพิษทางน้ำ

1.5 ระยะเวลาจัดทำปฏิญานิพนธ์

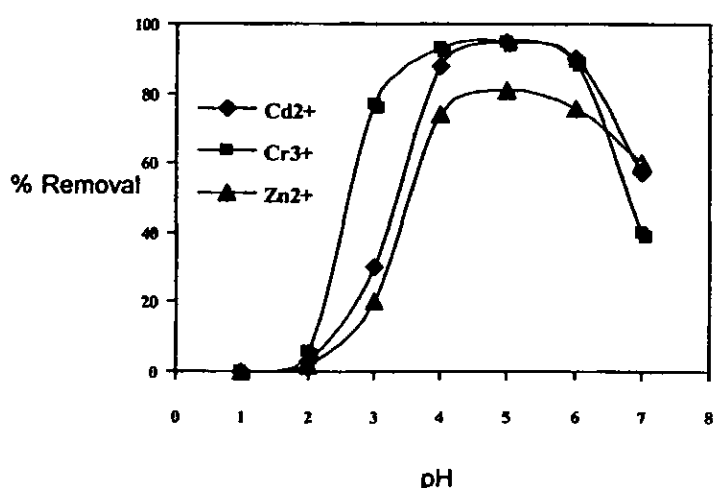
กิจกรรมขั้นตอน การดำเนินงาน	พ.ศ. 2546								พ.ศ. 2547				
	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค
1. ค้นหาข้อมูล และศึกษา													
2. ออกแบบการ ทดลอง													
3. ดำเนินงาน ทดลอง													
4. วิเคราะห์ผล การทดลอง													
5. รายงานผล													

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

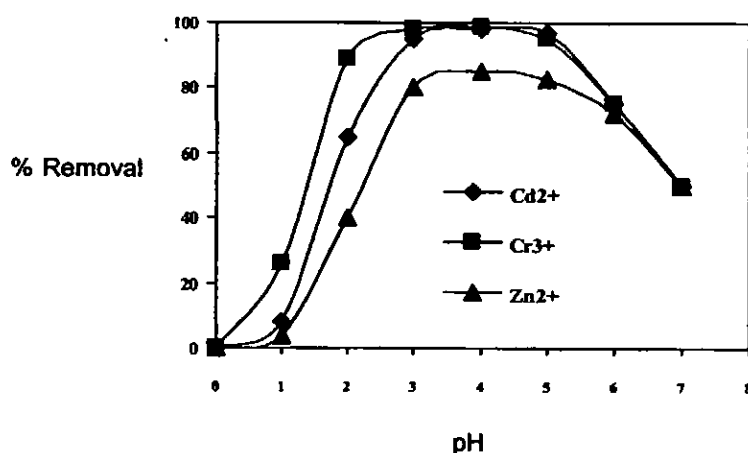
M.Prasad และคณะ(3)ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องแบบจำลองการดูดซับตะกั่ว และสังกะสี โดยใช้แร่ Francolite พบว่าแร่ Francolite ซึ่งเป็นหินฟอสเฟตที่พบในประเทศอินเดีย เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารละลายของตะกั่วและสังกะสีได้ดี โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อการดูดซับของไอออนตะกั่วและสังกะสีและยังสามารถใช้แบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich ในการอธิบายการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ จากการทดลองพบว่าแร่ Francolite ดูดซับ Pb^{2+} ได้ดีกว่า Zn^{2+} ซึ่ง แร่ Francolite มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb^{2+} ได้มากที่สุด เท่ากับ 82 – 99.9% กระบวนการดูดซับดังกล่าวจะเกิดในปฏิกิริยาคายความร้อนและแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm เป็นแบบที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักบนแร่ Francolite ที่อุณหภูมิต่างๆ

Giuseppe Cimino และคณะ(4)ได้ทำการศึกษาการขจัดโลหะหนักในการทดลองแบบกะ โดยใช้เปลือกถั่วฮาเซลนัท(hazelnut shell) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร มาทำการบดและคัดขนาด ให้มีขนาดในช่วง 0.3-0.8 มิลลิเมตร มาเป็นตัวดูดซับ พบว่าในช่วง pH ต่ำๆนั้น เปลือกถั่วฮาเซลนัท(hazelnut shell) ไม่ได้ปรับสภาพ สามารถดูดซับโลหะ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} ได้น้อยมาก และค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH อยู่ในช่วง 4-6 (เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนักเท่ากับ 92%) ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ผลกระทบของค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโดยใช้เปลือกถั่ว hazelnut (HS) 4 กรัม (Giuseppe cimino และคณะ,2000)

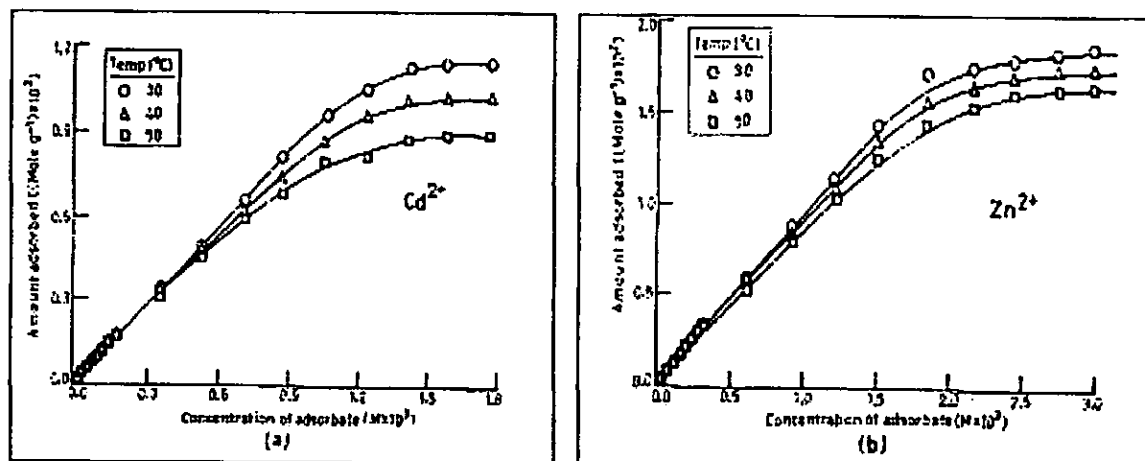
แต่เมื่อนำเปลือกถั่วชนิดที่ทำการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก และนำมาทำการดูดซับโลหะหนักดังกล่าวประกอบ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับได้ในช่วง pH ที่กว้างขึ้น สันนิษฐานว่า กรดซัลฟิวริกจะไปปรับปรุงโครงสร้างและส่วนประกอบของ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิग्นิน (Lignin) ซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเปลือกถั่วฮาเซลนัท (hazelnut shell) นอกจากนั้นยังมีการทดลองแบบ multi-element เพื่อทดลองการแข่งขันและความสามารถในการเลือกจับของไอออนโลหะหนักกับตำแหน่งว่องไว (active site) พบว่าตัวดูดซับชนิดธรรมชาติและชนิดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด สามารถดูดซับ Cr^{3+} ได้มากที่สุดที่ 95.9% และ 94.2% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจาก ไอออนของ Cr^{3+} มีขนาดเล็กกว่า Cd^{2+} และ Zn^{2+} และยังมีแรงดึงดูดระหว่างไอออนกับตำแหน่งว่องไว (active site) ที่มากที่สุดด้วย



ภาพประกอบ 2 แสดงผลกระทบของค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออน Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} โดยใช้ hazelnut 4.0 กรัม (Giuseppe cimino และคณะ, 2000)

Vlod K. Gupta และคณะ(5) ได้ทำการศึกษากการขจัดโลหะหนัก โดยใช้โคลนแดง ซึ่งเป็นวัตถุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม สามารถนำไปใช้ในการผลิตเซรามิกส์ และอื่นๆ สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้ โคลนแดง เป็นตัวดูดซับโดยแช่ในสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ที่ติดมาจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งที่ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อนำมาทดลองทำการดูดซับโดยเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิพบว่า การดูดซับไอออน Cd^{2+} และ Zn^{2+} ที่ความเข้มข้นต่ำ (1.78×10^{-5} - 1.78×10^{-4} โมลาร์ สำหรับ Cd^{2+} และ 3.06×10^{-5} - 3.06×10^{-4} โมลาร์สำหรับ Zn^{2+}) ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับนี้ เป็นแบบคายความร้อน และค่าการดูดซับของ Cd^{2+} ยังมีค่าเกือบ 100 % ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (น้อยกว่า 3.56×10^{-4} โมลาร์) และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น (มากกว่า 8.89×10^{-4} โมลาร์) คล้ายสมการดูดซับของ Zn^{2+} ที่เข้าใกล้

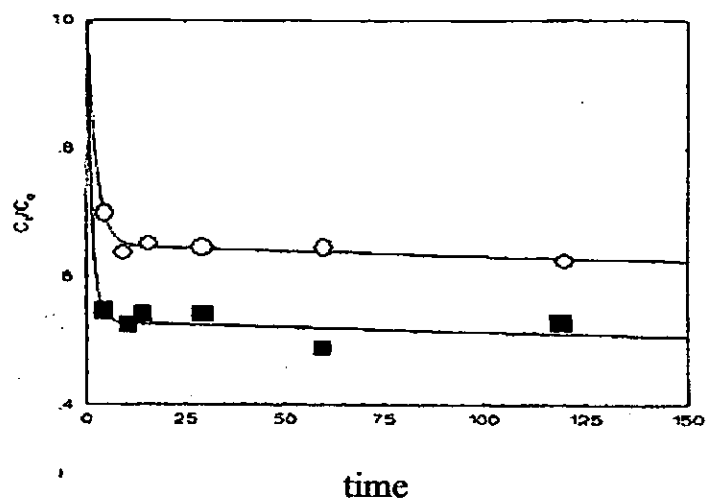
100% ที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 9.18×10^{-4} โมลาร์ และลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (มากกว่า 1.84×10^{-3} โมลาร์)



ภาพประกอบ 3 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับ Cd^{2+} , Zn^{2+} โดยใช้โคลนแดง
(Viod K. Gupta และคณะ, 2002)

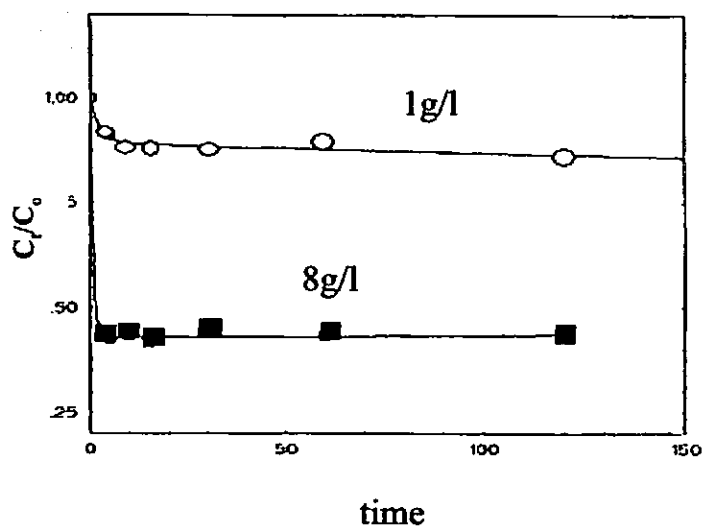
A. Mellah และคณะ(6) ได้นำแร่ เบนโทไนต์(Bentonite) ธรรมชาติมาศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับ Zn^{2+} ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแร่ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ในอุตสาหกรรมการผลิต Phosphoric acid (Bovalia.et.al.,1993) โดยการทดลองจะทำการศึกษาคูณลักษณะการดูดซับและปัจจัยสำคัญๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโดยเริ่มจาก

- ผลของอุณหภูมิ การทดลองใช้อุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แสดงถึงการดูดซับเป็นระบบคายความร้อน และการดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดแบบกายภาพ



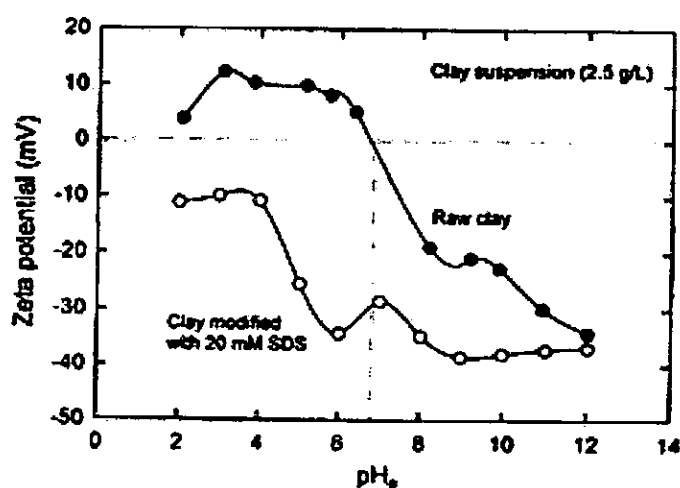
ภาพประกอบ 4 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการดูดซับไอออน Zn^{2+}
(A. Mellah และคณะ, 1997)

- ผลของอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว การทดลองใช้ปริมาณ แร่ Bentonite ที่ 1 กรัม/ ลิตร และ 8 กรัม/ ลิตรตามลำดับพบว่า มีปริมาณตัวดูดซับ 8 กรัม/ลิตร สามารถดูดซับไอออนของ Zn^{2+} ได้มากกว่าเนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวดูดซับเพิ่มขึ้นการเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงผลกระทบบของอัตราส่วนของแข็งของเหลวที่มีผลต่อการดูดซับไอออน Zn^{2+}
(A. Mellah และคณะ, 1997)

Su-Hsia Lin (6) และคณะ ได้นำแร่มอนทโมริลโลไนต์ (Montmorillonite) ที่ทำการปรับปรุงโดยใช้ Sodium dodecyl Sulfate (SDS) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักเช่น Cu^{2+} และ Zn^{2+} จากสารละลาย โดย SDS มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaSO}_3$ โดยการเตรียมตัวดูดซับเริ่มจากน้ำ 25 กรัม ของแร่ Montmorillonite มาแช่ใน สารละลาย SDS ความเข้มข้นในช่วง 10-30 มิลลิโมล ต่อน้ำปราศจากไอออน 11 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าเป็นเวลา 2 ชม. และใช้เทคนิค x-ray diffraction เพื่อตรวจสอบการเข้าไปแทรกภายในชั้นแร่มอนทโมริลโลไนต์ (Montmorillonite) ของ SDS โดยจากรูปแสดงค่า Zeta potential ทั้งก่อนและหลังการเติม SDS ที่ช่วง pH ต่างๆ โดยค่า บวก และ ลบ แสดงถึงประจุที่ผิวของอนุภาค โดยจากการทดลองพบว่าก่อนเติม SDS ผิวของแร่มอนทโมริลโลไนต์ (Montmorillonite) มีประจุลบ สามารถดึงดูดไอออนโลหะได้ที่ pH 7-12 แต่เมื่อเติม SDS แล้วพบว่าค่า Zeta potential มีค่าเป็นลบ มากขึ้นและมีช่วง pH ที่ 2-12 ทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงค่า Zeta potential บน Montmorillonite(Su-Hsia Lin ,2002)

นอกจากนี้แล้วยังศึกษาถึงจลนศาสตร์การดูดซับของไอออนโลหะเพื่อหาค่าคงที่การดูดซับจากสมการ

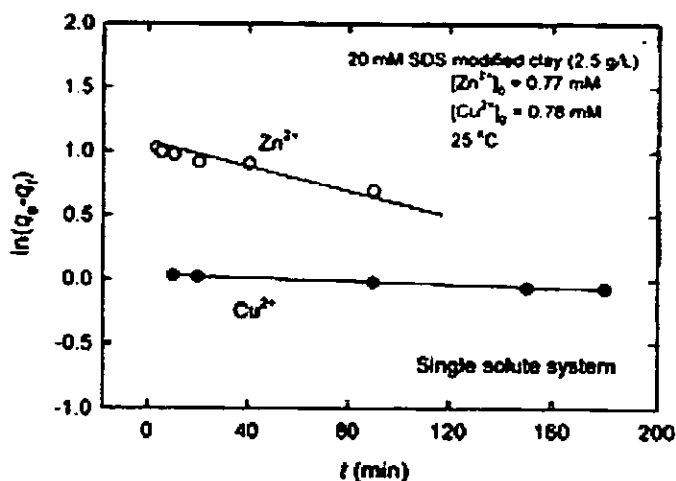
$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

q_e = ค่าการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (mmol/kg)

q_t = ค่าการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (mmol/kg)

k_1 = ค่าคงที่การดูดซับ

จากการเขียนกราฟระหว่าง $\ln (q_e - q_t)$ กับเวลาพบว่าเป็นเส้นตรง บ่งชี้ว่า การดูดซับเป็นแบบ อันดับหนึ่งและค่าคงที่การดูดซับของ Zn^{2+} และ Cu^{2+} คำนวณได้เท่ากับ 6.64×10^{-4} และ 3.14×10^{-3} นาที ที่ 25°C



ภาพประกอบ 7 รูปแสดงการหาค่าคงที่การดูดซับ Pseudo – first – order ของ Zn^{2+} และ Cu^{2+} บนแร่ Montmorillonite (Su-Hsia Lin, 2002)

Omer Yavuz และคณะ(7) ได้นำแร่คาโอลิไนต์ (Kaolinite) ในธรรมชาติ มาทำการดูดซับ โลหะหนักเช่น Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} และ Cu^{2+} จากสารละลายและได้มีการศึกษา ตัวแปรอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic parameters) จากการทดลองนี้ โดยใช้สมการในการคำนวณดังนี้

$$\ln b = \ln b' - \frac{\Delta H}{RT}$$

$$\ln b = -\frac{\Delta G}{RT} \qquad \Delta S = \frac{(\Delta H - \Delta G)}{T}$$

b = ค่าคงที่การดูดซับที่ได้จากสมการเส้นตรงของ Langmuir Isotherm

b' = ค่าคงที่ที่จุดตัดแกน y

ΔG = การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระของกิบส์

ΔH = การเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปี

ΔS = การเปลี่ยนแปลงค่าเอนโทรปี

ตาราง 1 แสดงค่า ตัวแปรอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic parameters) ของโลหะชนิดต่าง ๆ

ชนิดโลหะหนัก	b (L/mg)		ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)		ΔS (kJ/mol)
	298 K	313 K		298 K	313 K	
Mn(II)	0.067	0.14	36.73	6.69	5.08	0.101
Co(II)	0.108	0.16	21.52	5.51	4.56	0.054
Ni(II)	0.112	0.24	37.27	5.54	3.71	0.107
Cu(II)	0.155	0.348	39.52	4.61	2.75	0.117

Mohammad Ajmal(8) และคณะได้นำแร่ โคอะไนต์(Kyanite) ซึ่งโดยทั่วไปถูกใช้เป็นวัสดุทนไฟ และมี Alumina เป็นส่วนประกอบมาทำการดูดซับโลหะหนัก จำพวก Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} และ Cu^{2+} จากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ จากการทดลองถึงผลกระทบของไอออนชนิดเดิมที่มีอยู่ในน้ำเสียจึงได้ทำการเติมไอออนบางชนิด เช่น SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- และ Ca^{2+} เพื่อดูการดูดซับที่เกิดขึ้น พบว่า การดูดซับ Cu^{2+} จะไม่ขึ้นอยู่กับการมี Na_2SO_4 และ $NaCl$ อยู่ แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับ Cu^{2+} จะเพิ่มขึ้นเมื่อมี sodium hydrogen carbonate ($NaHCO_3$) ซึ่งเป็นการเพิ่ม pH ให้กับน้ำ ซึ่งทำให้สามารถดูดซับไอออนได้มากขึ้น

G.Suraj และคณะ(9)ได้นำแร่คาโอลิไนต์ (Kaolinite) มาทำการปรับปรุง โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และการปรับสภาพด้วยกรด (Calcined and acid activated) แร่ที่นำมาทำการทดลองได้มาจาก 2 แหล่งคือ South Kerala (Tk) และ North Kerala (Mk) , India จากการทดลองทำการดูดซับโลหะหนัก Cd^{2+} และ Cu^{2+} พบว่าค่าการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อนำตัวอย่างของแร่ทั้ง 2 ชนิดที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ และปรับสภาพด้วยกรด พบว่าค่าการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นมากดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงการดูดซับไอออน โลหะCd และ Zn บนแร่ Kaolinite

ตัวอย่าง	Cd (mmol/kg)		Cu (mmol/kg)	
	Tk	Mk	Tk	Mk
คาโอลิไนต์ธรรมชาติ	6.34	6.55	6.56	6.21
คาโอลิไนต์ (350 °C)	6.18	6.44	6.75	6.24
คาโอลิไนต์ (600 °C)	3.08	3.15	3.06	4.16
คาโอลิไนต์ธรรมชาติ +กรด	6.76	6.75	7.86	7.46
คาโอลิไนต์ (350 °C)+กรด	7.29	6.85	8.34	8.23
คาโอลิไนต์ (600 °C)+กรด	13.36	13.64	18.79	18.09

Ho และ McKay(10) ได้ทำการศึกษาความสามารถของพีท (อินทรีย์สารที่ถูกทับถม , peat) ในการดูดซับไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) ในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว ขนาดของอนุภาคพีท อุณหภูมิของสารละลาย และความเร็วในการกวน ผลการศึกษาความเข้มข้นของ Pb^{2+} เริ่มต้น พบว่าอัตราการดูดซับในช่วงเริ่มต้นจะเกิดอย่างรวดเร็วและค่อย ๆ ช้าลงเมื่อเข้าสู่สมดุลในทุก ๆ ความเข้มข้น สำหรับผลของอุณหภูมิของสารละลาย พบว่าอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แสดงว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่วนผลเนื่องจากขนาดอนุภาคของพีท พบว่ายิ่งขนาดอนุภาคของพีทเล็กลง อัตราการดูดซับจะสูงขึ้น และผลจากอัตราเร็วในการกวน พบว่าอัตราการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ขวัญ ฉายรัมย์, เมธี ชลไมตรี และสุนทรี เฟื่องฟู (1) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวภาพที่เหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น กากเมล็ดกาแฟ ช้างข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุชีวมวลผสมดินเหนียว โดยโลหะหนักที่ใช้ได้แก่ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล ตะกั่วและแคดเมียม พบว่าวัสดุชีวมวลที่ทำเป็นถ่านมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักมากกว่าดินเหนียว โดยถ่านกากเมล็ดกาแฟ > ถ่านช้างข้าวโพด > ถ่านชานอ้อย ตามลำดับ กากเมล็ดกาแฟมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในช่วง 7.862 – 17.544 มิลลิกรัม / กรัมชีวมวลแห้ง และหลังจากนำถ่านที่ผลิตจากชีวมวลผสมกับดินเหนียว และสามารถดูดซับโลหะหนักได้เรียงตามลำดับดังนี้ สังกะสี > แคดเมียม > ทองแดง > นิกเกิล > ตะกั่ว โดยเฉพาะถ่านกากเมล็ดกาแฟผสมดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด จากการศึกษาขนาดเม็ดชีวมวลและอัตราส่วนของวัสดุชีวมวลต่อดินเหนียว พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของวัสดุชีวมวลต่อดินเหนียว 1:1 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดีกว่าถ่านกากเมล็ด

กาแฟเพียงอย่างเดียว และเมล็ดชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักดีกว่า

การดูดซับจึงมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดซับกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น โดยเฉพาะโลหะหนัก เป็นต้น กล่าวคือ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพแล้ว ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่รบกวน รังเกียจ เงินลงทุนต่ำ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดขนาดของระบบได้ง่าย

2.1 แร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว (clay minerals หรือ complex aluminosilicates) หมายถึงกลุ่มแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต(alumino silicate minerals) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (silica sheet) และแผ่นอะลูมินา(alumina) ซ้อนกันแบบ 1:1 หรือ 2:1 บางครั้งเรียกว่า layer silicate clays มีทั้งที่ขยายตัวได้และขยายตัวไม่ได้ และเนื่องจากขนาดของแร่ดินเหนียวเล็กมาก (< 2 ไมครอน) ดังนั้นการตรวจสอบจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษ เช่น X-ray Diffraction หรือ Differential Thermal Analysis (D.T.A.) อย่างไรก็ตามสมบัติของดินเหนียวที่สามารถทดสอบได้ค่อนข้างง่าย คือ ความเหนียวและความลื่นมือ

แร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ พวกที่ไม่มีระบบผลึกหรือ ออสัณฐาน (amorphous) เช่น แร่ แอลโลเฟน (allophane) และพวกที่มีระบบผลึก เช่น

กาอลิน (kaolin) เป็นแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 คือมีแผ่นอะลูมินา และแผ่นซิลิกา อย่างละแผ่น ประกอบกันเป็น 1 หน่วย

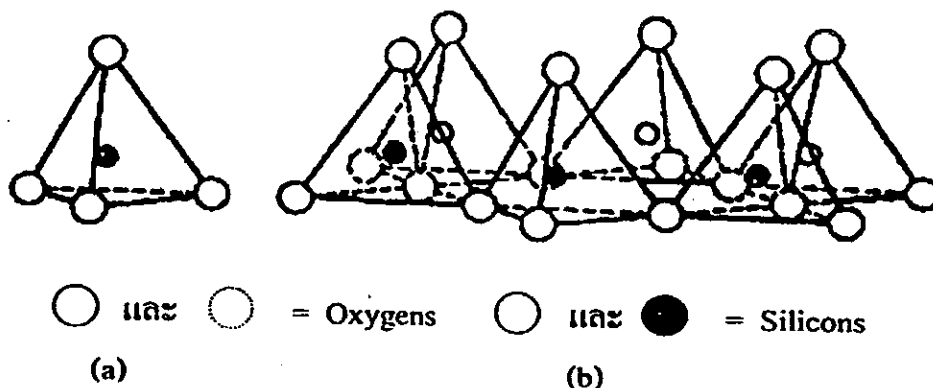
สเมกไทต์ (smectite) เป็นแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 คือ มีแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ต่อแผ่น อะลูมินา 1 แผ่น ประกอบกันเป็น 1 หน่วย

อิลไลต์หรือไฮดรอสไมกา (illite หรือ hydrous mica) การจัดเรียงตัวเป็นแบบ 2 : 1 แต่เนื่องจากในโครงสร้างจะมีโพแทสเซียมผสมอยู่ด้วยทำให้ขยายตัวได้น้อยกว่าแร่ดินเหนียวกลุ่ม smectite

แร่ดินเหนียวประเภท 2 : 1 และประเภท 1:1 มีความแตกต่างกันอยู่ที่ประเภท 2:1 จะขยายตัวและหดตัวได้มาก มีความจุในการแลกเปลี่ยน ไอออนบวกสูง และค่อนข้างเหนียวกว่าประเภท 1:1

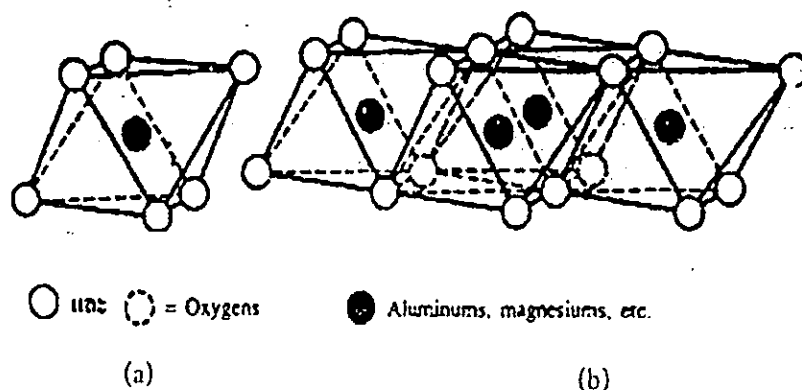
โดยทั่วไปชั้นของแร่ดินเหนียวประกอบไปด้วยหน่วยโครงสร้าง 2 ชนิด ได้แก่ silica tetrahedral sheet และ alumina octahedral sheet ซึ่งมีลักษณะ ดังนี้

2.1.1 silica tetrahedral sheet เป็นหน่วยของโครงสร้าง ซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกอน 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม จัดตัวกันโดยมี ซิลิกอนอยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงที่มี 4 ด้าน ดังนี้ จึงเรียกว่า silica tetrahedral unit (รูปที่ 8a) แต่ละหน่วยโครงสร้างนี้จะเกาะเชื่อมกันเข้าเป็นแผ่นโดยมีการเกาะออกซิเจนร่วมกันระหว่างอะตอมที่อยู่พื้นฐานทำให้เกิดเป็นแผ่นที่มีลักษณะเหมือนรังผึ้งขึ้น คือ จะเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป แผ่นนี้เรียกว่า silica tetrahedral sheet หรือเรียกสั้นๆ ว่า silica sheet (รูปที่ 8b)



ภาพประกอบ 8 โครงสร้างของ(a) silica tetrahedral unit และ (b) silica tetrahedral sheet

2.1.2 alumina octahedral unit ประกอบด้วยอลูมิเนียม 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอมจัดตัวกัน โดยมีอลูมิเนียมอะตอมอยู่ตรงกลาง เกิดเป็นรูปทรงที่มี 8 ด้านขึ้น ดังนั้นจึงเรียกว่า alumina octahedral unit (รูปที่ 9a) ซึ่งจะเกาะเข้ากันเป็นแผ่นในแนวระดับเช่นเดียวกับ silica tetrahedral unit โดยมีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน แต่แผ่นที่เกิดจะเป็นแผ่นทึบ ไม่มีช่องรูป หกเหลี่ยมเหมือนอย่าง silica sheet แผ่นของ alumina octahedral นี้เรียกว่า alumina octahedral sheet หรือและ alumina sheet (ภาพประกอบ9b)



ภาพประกอบ 9 โครงสร้างของa. alumina octahedral unit และ b. alumina octahedral sheet

ทั้ง silica tetrahedral sheet และ alumina octahedral sheet จะมีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน ทำให้เกิดเป็นชั้นของแร่ดินเหนียว (layer silicate mineral) แตกต่างกันออกไปซึ่งความแตกต่างนี้เกิดเนื่องจาก (1) จำนวนและลำดับของ tetrahedral และ octahedral sheet (2) จำนวนประจุต่อหน่วยในโครงสร้าง (3) ชนิดของพันธะและไอออนบวกระหว่างชั้น (4) ไอออนบวกใน octahedral sheet เช่น Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} [18] สามารถแบ่งแร่ดินเหนียวออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆตามลักษณะของการจัดเรียง tetrahedral และ octahedral sheet ได้แก่

แร่ดินเหนียวประเภท 1:1 ประกอบด้วย silica sheet 1 แผ่นประกบกับ alumina sheet อีก 1 แผ่น เช่น kaolinite, dickite หรือ nacrite ซึ่งจะมี Si อะตอมอยู่ใน tetrahedral sheet และ Al อะตอมอยู่ใน alumina sheet จะมีแร่ดินเหนียว antigorite

แร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ประกอบด้วย silica sheet 1 แผ่นประกบกับ alumina sheet อีก 1 แผ่นในลักษณะแซนวิชโดยมีการใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน แร่ดินเหนียวประเภทนี้จะมี ความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของ isomorphous substitution ใน tetrahedral และ octahedral sheet (isomorphous substitution เป็นการแทนที่ไอออนที่มีอยู่เดิมในโครงสร้างของ ผลึกแร่ดินเหนียวด้วยไอออนที่มีขนาดเหมือนหรือใกล้เคียงกัน) ซึ่งจะนำไปสู่การมีประจุในผลึก ประจุที่มีอยู่มากนี้จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนบวกอื่นๆ ทั้งที่อยู่ภายในผลึกและอยู่ภายนอกโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ปริมาณของประจุต่อหน่วยโครงสร้างเมื่อถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนบวกที่อยู่ภายนอกโครงสร้าง เรียกว่าประจุที่ผิว (layer charge)

2.2 ชนิดของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ

ความแตกต่างระหว่างแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการเรียงซ้อนกันของแผ่น silica และ alumina sheet กับการเปลี่ยนแปลงและแทนที่กันของซิลิกอน (Si) และ อลูมิเนียม (Al) ในแผ่นดังกล่าว กับธาตุอื่นๆ (isomorphous substitution) ชนิดของดินเหนียวที่สำคัญ ได้แก่

2.2.1 kaolinite เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่ม kaolin ประกอบด้วย silica sheet หนึ่งแผ่น ประกบทับกับ alumina sheet อีกหนึ่งแผ่นหรือแร่ดินเหนียวประเภท 1:1 โดยมีการใช้ออกซิเจน 2 ใน 3 ร่วมกันระหว่าง Si และ Al ในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้ง 2 ประสานกันแน่นรวมกันเข้าเป็นผลึกและขยายตัวเองออกไปในทางระดับได้โดยไม่จำกัด ส่วนออกซิเจนที่เหลืออีก 1 ใน 3 จะจับเป็น H^+ เกิดเป็น OH^- ในด้านที่เป็น alumina sheet ซึ่ง OH^- นี้จะดึงดูดออกซิเจนของ silica sheet ของผลึก kaolin อื่นๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ทำให้เกิดการเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะมีความหนา 7 อังสตรอม (Å) เนื่องจากช่องว่างระหว่างแผ่นโครงสร้างนี้ยึดกันด้วย hydrogen

2. Oxidation Period

เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 350-950° C สิ่งต่างๆที่ปะปนมากับดิน เช่น เศษไม้ ใบ หญ้า จะถูกไหมดไป นอกจากนี้แร่ธาตุต่างๆ เช่น พวกคาร์บอนเนต ,ซัลไฟด์ และ ซัลเฟต จะแตกตัวในระยนี้ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินจะเปลี่ยนเกี่ยวกับ น้ำหนัก ขนาด สี และ ความพรุนเปลี่ยนแปลง

3. Vitrification Period

เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 900° C ขึ้นไป เป็นระยะที่ประกอบด้วยปรากฏการณ์เหล่านี้ ส่วนผสมในเนื้อดินบางชนิดเริ่มหลอมละลาย ส่วนหลอมละลายจะพยายามละลายส่วนไม่หลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนละลายจะไหลไปตามช่องว่างทำให้เนื้อดินแน่นทึบ ถ้าหากมีส่วนผสมและอุณหภูมิที่พอเหมาะอาจเกิดการตกผลึกใหม่ในเนื้อดินได้ เพราะอะลูมินาและซิลิกาในเนื้อดินจะรวมตัวกันเป็น $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ จะมีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม ทำให้ดินมีความแข็งแกร่งขึ้น ทั้ง 3 ช่วงของกระบวนการเผาจะทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์เปลี่ยนไปได้ ดังแสดงจากตารางที่ 3

ตาราง 3 แสดงสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปในการเผาระยะต่างๆ

คุณสมบัติที่เปลี่ยนไป	Dehydration 20-600° c	ระยะในการเผาและช่วงอุณหภูมิ	
		Oxidation 350-950° c	Vitrification 900° c
สี	สีอ่อนลง	1. ดินที่มีเหล็กจะมีสีเข้มขึ้น 2. ดินที่มี carbonaceous matter จะมีสีอ่อนลง	สีเข้มขึ้น
ความพรุน	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลง
การหดตัว	เพิ่มขึ้น	ขยายตัวเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
น้ำหนัก	ลดลง	ลดลง	เกือบคงที่
ความแข็งแกร่ง	เพิ่มขึ้น	ขยายตัวเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น

ถึงแม้ว่าดินเหนียวจะถูกแบ่งออกอีกหลายประเภท แต่จะมีคุณสมบัติของแรงเหมือนกันทุกชนิด กล่าวคือแรงที่กระทำระหว่างอนุภาคดิน เป็นผลทำให้เกิดความแข็งแรง จะแบ่งได้เป็น

- ก. Primary valence forces ได้แก่ แรงผลั (repulsion) แรงดูด (attraction)
- ข. Hydrogen คือ พันธะไฮโดรเจน
- ค. Secondary valence forces เป็นแรงที่เกิดจากที่ดินจับยึดโมเลกุลน้ำ

2.3 ความหมายของน้ำเสีย

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่มีมลสาร (Pollutants) ต่างๆ ในปริมาณที่สูงมาก จนกระทั่งกลายเป็นน้ำซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป น้ำเสียก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ แก่แหล่งน้ำซึ่งเป็นที่รองรับ เช่น ทำให้น้ำเน่าเหม็นเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ

มลสาร (Pollutants) คือ สิ่งเจือปนที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสียอาจเป็นสารที่สามารถรับรู้ได้ทันทีด้วยประสาทสัมผัส หรืออาจเป็นสารที่ไม่สามารถรับรู้ได้ทันทีต้องผ่านการวิเคราะห์ก่อนจึงจะสามารถทราบได้ อาจสรุปชนิดของมลสารต่างๆ ได้ดังนี้

1. จุลินทรีย์
2. สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้
3. ตะกอนแขวนลอย
4. สารพิษ
5. สีและความขุ่น
6. สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัส
7. สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ยาก
8. น้ำมันและสิ่งสกปรกลอยน้ำ
9. สารที่ระเหยได้

2.3.1 ประเภทของน้ำเสีย

เราสามารถแบ่งประเภทของน้ำเสียได้ 3 ประเภท ใหญ่ๆ ดังนี้

1. น้ำเสียชุมชน (Municipal Wastewater)

หมายถึง น้ำเสียต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน เช่น การชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบอาหาร การขับถ่าย สิ่งสกปรกต่างๆ ในน้ำเสียประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร สบู่ ผงซักฟอก อุจจาระ ปัสสาวะ ฯลฯ

2. น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater)

หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตอุตสาหกรรมทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมจำพวกอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมโลหะ ฟอกหนัง อุตสาหกรรมเคมี จำเป็นต้องใช้น้ำเพื่อล้างทำความสะอาดวัตถุดิบหรือใช้น้ำเพื่อหล่อเย็น ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้จึงมีทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ปะปนกันอยู่ โดยเฉพาะโรงงานน้ำตาลโรงงานสุราและเครื่องดื่ม น้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาลเพียงโรงเดียวเทียบได้เท่ากับน้ำโสโครกจากเมืองเล็กๆ เมืองหนึ่งที่มีประชากรราว 10,000 คน

เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ มีความแตกต่างกันมาก ดังนั้น สารเคมีที่ได้จากน้ำทิ้งของโรงงานจึงแตกต่างกันด้วย ดังตาราง 4 ความเข้มข้นของ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อเทียบกับน้ำจากชุมชนแล้วจะมีค่าสูงกว่ามาก ผลกระทบจากน้ำเสียอุตสาหกรรมมีหลายประการ เช่น เป็นพิษต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ เกิดทัศนียภาพที่ไม่น่าดู เป็นต้น

ตาราง 4 สารเคมีที่สำคัญในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

สารเคมี	ชนิดของอุตสาหกรรม
อัลคาไลน์	อุตสาหกรรมฝ้าย, ฟอกขนแกะ , และซักกรีต
อะซิติก	อุตสาหกรรมฝ้าย และเหมืองแร่
คลอรีน	อุตสาหกรรมซักกรีต, ย่อยกระดาษ และฟอกผ้า
โครเมียม	อุตสาหกรรมหล่อโลหะ, ชุบโครเมียม และอลูมิเนียม
แคดเมียม	อุตสาหกรรมหล่อโลหะ
ทองแดง	อุตสาหกรรมหล่อโลหะ
ไซยาไนด์	อุตสาหกรรมหล่อโลหะ, ทำความสะอาดโลหะ และก๊าซ
โซลและน้ำมัน	อุตสาหกรรมฟอกขนแกะ, ซักกรีต, ทอผ้า และน้ำมัน
ตะกั่ว	อุตสาหกรรมแบตเตอรี่, เหมืองตะกั่ว, สี และน้ำมัน
เมอร์แคปแทน	อุตสาหกรรมน้ำมัน และย่อยกระดาษ
นิกเกิล	อุตสาหกรรมหล่อโลหะ และชุบโลหะ
ฟีนอล	อุตสาหกรรมก๊าซ และถ่านโค้ก, สังเคราะห์เรซิน, ทอผ้า และน้ำมัน
สังกะสี	อุตสาหกรรมแบตเตอรี่, หล่อโลหะ และยาง

2.3.2 โลหะหนัก

หมายถึง โลหะที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ในจำนวนนี้ มีส่วนที่เป็นโลหะหนัก (Heavy Metal) อยู่ 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้ หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex – compound) ได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับ สารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนใน ดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าสู่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

การที่จะตัดสินใจว่าสารใดเป็นพิษมากน้อยเท่าใด จะต้องพิจารณาถึงค่า LD₅₀ (Medium lethal dose) ซึ่งเป็นขนาด (dosage) สารนั้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตาย 50% ค่าของ LD₅₀ ยิ่งแสดงว่าเป็นพิษมากขึ้น เช่น สารที่มี LD₅₀ มากกว่า 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (เมื่อให้ทางปาก) จัดเป็นสารไม่มีพิษ แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จัดเป็นสารมีพิษมาก ตัวอย่างโลหะหนักที่เป็นพิษคือ

2.3.2.1 ตะกั่ว (Lead) เป็นโลหะที่มีพิษมาก รูปแบบที่เป็นพิษคือ Lead, Lead acetate, and Lead sulphate อาการเป็นพิษแบบเฉียบพลัน เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน การกระตุกของกล้ามเนื้อ โรคโลหิตจาง ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจาก ตะกั่วกีดขวางการสร้างและการทำงานของ hemoglobin ในเม็ดเลือดแดง โดยปกติแล้ว hemoglobin เมื่อมีอายุมากขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็น methemoglobin ซึ่งมีความสามารถนำพาออกซิเจนได้น้อยลง เม็ดเลือดแดงโดยทั่วไป มีอายุประมาณ 4 เดือน hemoglobin จะถูกเปลี่ยนเป็น methemoglobin ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังเร่งการทำงานของม้ามและตับในการกำจัดเม็ดเลือดแดง

2.3.2.2 แคดเมียม (Cadmium) เป็นโลหะที่มีพิษมาก รูปแบบที่เป็นพิษคือ สารประกอบอินทรีย์แคดเมียม เมื่อสูดกลืนไปจะมีผลต่อเมตาโบลิซึมของร่างกาย ถ้าได้รับเกิน 15 มิลลิกรัม จะอาเจียน (vomiting) อาการเป็นพิษเรื้อรังที่พบในประเทศญี่ปุ่นกับคนงานเหมืองแร่ เรียกว่าโรค itai-itai (ouch-ouch) เกิดกับผู้หญิงอายุระหว่าง 50-60 ปี จะปวดตามข้อและกระดูก แต่บางครั้งอาการนี้มีสาเหตุมาจากการขาดวิตามินดี และแคลเซียมในสารอาหารก็ได้

2.3.2.3 แมงกานีส (Manganese) เป็นโลหะที่มีพิษปานกลาง รูปแบบที่พบมากคือ Mn²⁺ และที่เป็นพิษมากคือ Mn³⁺ อาการเฉียบพลันแต่ไม่เด่นชัด แต่พิษเรื้อรังจะมีอันตรายร้ายแรงมากทำให้ร่างกายและจิตใจพิการได้ แต่ไม่ถึงตาย แมงกานีส Mn²⁺ จะเข้าไปจับกับ -SH ของโปรตีนในเนื้อเยื่อของระบบประสาทและสมองทำให้สมองฝ่อ มีอาการปวดหัว มีอารมณ์แปรปรวน จะพบว่าเม็ดเลือดแดงมากกว่าปกติ แต่มีเม็ดเลือดขาว (neutrophil) ลดลง ภูมิคุ้มกันลดลง แมงกานีสจะรบกวนการสร้าง DNA ในเซลล์ ซึ่งเป็นทั้ง mutagen และ carcinogen

2.3.2.4 สังกะสี (Zinc) เป็นโลหะที่มีพิษน้อย รูปแบบที่เป็นพิษคือ สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ปกติสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อเมตาโบลิซึมของร่างกาย และเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของเอนไซม์

หลายตัวในสิ่งมีชีวิต สังกะสีมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ การคงสภาพของผนังเซลล์ การมองเห็นในที่มืด การรับรส และระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งคนเราต้องการ

6-15 มก. ต่อวัน ถ้าขาดจะทำให้เป็นโรคเตี้ย แคระ (dwarfism) ผอมร่าง ผิวน้ำแข็งเสก ท้องร่วง ขาดภูมิคุ้มกัน แต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะมีอาการกระหายน้ำ ปวดศีรษะ มีนชา หูอื้อ และท้องเสีย ถ้าได้รับ 12 กรัม เป็นเวลา 2 วัน จะมีพิษต่อระบบหมุนเวียนโลหิต ตับ และไต

2.3.2.5 ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีพิษน้อย รูปแบบที่เป็นพิษคือ cuprous oxide (Cu^+), cupric oxide (Cu^{2+}), copper hydroxide อาการที่แสดงคือ โรคเรื้อรังตัวของหลอดเลือด ความดันโลหิตต่ำ ดีซ่าน ตับแข็ง และกรดอะมิโนถูกขับออกมามากขึ้น

2.3.3 มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

จากการนำ และการแสวงหาโลหะหนักมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อมีมากขึ้นในธรรมชาติก่อให้เกิดการเสียสมดุล หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม จะนำมาสู่ปัญหามลพิษของน้ำที่รุนแรง จึงมีมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12(2525) ให้ผู้รับใบอนุญาตกิจกรรมอุตสาหกรรมจะต้องดูแลรักษาระบบ และระบายน้ำทิ้งให้อยู่ในสภาพเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ โดยมีให้ระบายน้ำทิ้ง เว้นแต่ได้กระทำอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างแต่ต้องไม่ใช่วิธีทำให้เจือจาง ซึ่งน้ำทิ้งต้องมีลักษณะดังตาราง 5

2.3.4 น้ำทิ้งจากการเกษตรกรรม (Agricultural Wastewater)

หมายถึง น้ำทิ้งที่เป็นผลมาจากการวางแผนทางด้านการเกษตรที่ไม่ดีพอ จึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นการใช้ปุ๋ย, การใช้ยาปราบศัตรูพืช

ตาราง 5 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539): (นำมาบางส่วน)

ลักษณะน้ำทิ้ง	ค่ามาตรฐาน (mg/l)	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรด-ด่าง	5.5-9.0	-pH Meter-
ไซยาไนด์ (HCN)	ไม่มากกว่า 0.2	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
สังกะสี	ไม่มากกว่า 0.5	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma
โครเมียม	ไม่มากกว่า 0.5	-
สารหนู	ไม่มากกว่า 0.25	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma
ทองแดง	ไม่มากกว่า 1.0	-
ปรอท	ไม่มากกว่า 0.005	Atomic Absorption Cold Vapour Technique
แคดเมียม	ไม่มากกว่า 0.03	-
ตะกั่ว	ไม่มากกว่า 0.2	-
นิกเกิล	ไม่มากกว่า 1.0	-
แมงกานีส	ไม่มากกว่า 5	-
ฟีนอล และ/หรือ ครีโซลส์	ไม่มากกว่า 1.0	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
ยาฆ่าแมลง, สาร	ไม่มีเลย	-
กัมมันตรังสี		-
อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า 40 °C	-
สี หรือ กลิ่น	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ	-

2.4 คุณลักษณะของน้ำเสีย (Characteristics)

สารประกอบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากมหาศาลบนผิวโลก ได้แก่ สารประกอบที่เรียกว่า น้ำ ปริมาณน้ำที่อยู่ในมหาสมุทร น้ำแข็งที่ขั้วโลก ธารน้ำแข็ง ทะเลสาบ แม่น้ำ น้ำใต้ดินและบรรยากาศรวมกันแล้วมีอยู่ประมาณ 1.5 พันล้านลูกบาศก์กิโลเมตร และปริมาณดังกล่าวมีส่วนที่เป็นน้ำจืดเพียงร้อยละ 3 เท่านั้น สามในสี่ของน้ำจืดเป็นน้ำแข็งอยู่บริเวณขั้วโลก น้ำอีกส่วนหนึ่งของโลกคือน้ำที่อยู่ในชั้นของ mantle ของโลก น้ำพวกนี้นำมาใช้ไม่ได้ มีปริมาณเป็น 16 เท่าของโลก

ในการออกแบบและการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับลักษณะน้ำเสียเป็นอย่างดีเพื่อให้ได้ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในการพิจารณาคุณภาพน้ำจะต้องทราบคุณลักษณะของน้ำเสียทั้งทางกายภาพ ทางเคมีและชีวภาพ

2.4.1 คุณลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Characteristics of Wastewater)

คุณลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ หรือทางฟิสิกส์ของน้ำ หมายถึง ลักษณะความสกปรกของน้ำที่ปรากฏให้เห็น จะสังเกตได้จากประสาทสัมผัสทั้ง 5 โดยจะประกอบไปด้วย

2.4.1.1 ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็งทั้งหมดจะประกอบด้วย ปริมาณของแข็งที่แขวนลอย (Total Suspended Solids) และปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids) โดยปริมาณของแข็งนั้นจะเป็นของแข็งที่สามารถระเหยได้ ณ อุณหภูมิ 600 °C บวกกับของแข็งที่ไม่ระเหย ณ อุณหภูมิ 600 °C

2.4.1.2 กลิ่น

กลิ่นจากน้ำเน่าเสีย ส่วนมากแล้วมาจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ก๊าซส่วนใหญ่แล้วจะเป็น H_2S (ก๊าซไข่เน่า) ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนได้ทำการเปลี่ยนสภาพของซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ส่วนสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดกลิ่นไม่ดีเนื่องจากอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนในน้ำเสีย มีดังนี้

ไข่เน่า	→	H_2S
ผักกะหล่ำปลีเน่า	→	Organic sulfides
กลิ่นของปลาตาย	→	Organic amines
กลิ่นของพวก Worm	→	Phosphorus
กลิ่นอับ	→	Organic acids

สำหรับการกำจัดกลิ่นในน้ำเสีย อาจใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดส์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้ เช่น คลอรีน, Hypochlorite, Permanganate หรือเครื่องกรองชนิดคาร์บอน (Carbon Filter)

2.4.1.3 อุณหภูมิ

เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาชีวเคมีของพวกจุลินทรีย์ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่า ออกซิเจนในน้ำได้ถูกใช้เพิ่มมากขึ้น และค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะลดลงด้วย

2.4.1.4 สี (Color)

โรงงานหลายแห่ง เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานทอผ้า ฯลฯ มักทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากสีของน้ำเสียซึ่งค่อนข้างยากในการแยกสีออกจากน้ำเสียได้หมด หรือการเกิดสาหร่าย (Algae) มากๆ ในบ่อ หรือลำคลอง ก็จะเป็นสาเหตุให้น้ำมีสีเขียวได้ เป็นต้น

ผลของสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีดังนี้

1. กั้น หรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ลดการเกิดการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis)
2. สีเป็นสิ่งที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจะทำให้น้ำไม่น่าดูได้
3. สีส่วนใหญ่แล้วเกิดจากสารอินทรีย์ชนิด Dissolved และ Colloidal ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ จะใช้ออกซิเจนในน้ำ

2.4.1.5 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นคือ สารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ จะกั้น หรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงไปได้ น้ำได้มากถึง 100% เช่นเดียวกันกับสี น้ำที่มีความขุ่นมากจะทำให้ยากต่อการกรอง ในโรงผลิตน้ำประปา จะต้องใช้ปริมาณคลอรีนมากกว่าปกติสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

2.4.2 คุณลักษณะน้ำเสียทางเคมี (Chemical Characteristics of Wastewater)

คุณลักษณะของน้ำเสียทางเคมีจะประกอบด้วยเชิงทางอินทรีย์สาร และเชิงทางอนินทรีย์สาร

2.4.2.1 สารอินทรีย์

ส่วนประกอบที่สำคัญๆ ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำมัน สำหรับพวกคาร์โบไฮเดรต และพวกโปรตีน สามารถถูกย่อยสลายโดยทางชีวภาพ และส่วนพวกไขมันและน้ำมันจะมีเสถียรภาพมากกว่า จะถูกย่อยสลายโดยทางชีวภาพได้ช้ากว่ามาก

2.4.2.1.1 Biochemical Oxygen Demand (BOD)

ค่าของ BOD นี้เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในการแสดงถึงความสกปรกมากน้อยเพียงใดของน้ำเสียจากชุมชน และจากโรงงานต่างๆ ค่าของ BOD นี้เป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบ

และควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียโดยทางชีวภาพ สามารถใช้บอกถึงค่าภาระอินทรีย์ (Organic loading) และใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

BOD_5 คือค่าปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic) โดยจุลินทรีย์ในระยะเวลา 5 วัน ณ อุณหภูมิ 20°C นิยมใช้กันมาก

2.4.2.1.2 Chemical Oxygen Demand (COD)

การวิเคราะห์หาค่าของ COD ใช้สำหรับประมาณปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป โดยที่สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์ โดยปริมาณมากเกินพอของ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ในสภาพความเป็นกรด โดยทั่วไปแล้วค่าของ COD จะมากกว่าค่าของ BOD_5 เพราะว่ามีปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยทางชีวภาพ ประโยชน์ของการหาค่า COD ที่เหนือกว่าค่าของ BOD_5 ก็คือ เวลาของการวิเคราะห์หาค่า COD ใช้ประมาณ 3 ชั่วโมง แต่สำหรับ BOD_5 ต้องใช้เวลาถึง 5 วัน จึงจะทราบผล

2.4.2.1.3 Dissolve Oxygen (DO)

ค่า DO คือปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ออกซิเจนเป็นธาตุที่สำคัญที่ใช้ควบคุมคุณภาพของน้ำ และยังมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ

2.4.2.2 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์เป็นสารที่มีอยู่ในน้ำเสียทั่วไป ซึ่งจะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียนั้นๆ สารอินทรีย์บางชนิดก็จำเป็นต้องมีอยู่ในน้ำเสียบ้าง เพื่อช่วยให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทางชีวภาพเป็นไปได้ดี แต่ก็มียาอินทรีย์บางชนิดไม่ควรให้มีในน้ำเสียเลย เพราะอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลายได้

2.4.2.2.1 พีเอช (pH)

ค่า pH เป็นค่าที่วัดความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์อย่างมากต่อการบำบัดน้ำเสียทั้งวิธีทางชีวภาพและวิธีทางเคมี ค่า pH มากกว่า 7 หมายถึงความเป็นด่าง ค่า pH น้อยกว่า 7 หมายถึง ความเป็นกรด น้ำสะอาดจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ค่า pH ของน้ำทิ้งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5 ถึง 9

2.4.2.2.2 คลอไรด์ (Chloride)

ในน้ำธรรมชาติจะมีสารคลอไรด์ผสมอยู่ด้วยเสมอ เนื่องจากสารคลอไรด์มาจากตามดินและหินต่างๆ ซึ่งน้ำได้ไหลผ่าน และจากบริเวณชายฝั่งทะเลต่างๆ ไป ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสีย สามารถบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำเสียว่ามีมากน้อยเพียงใดได้ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวชี้ว่ามี

น้ำเสียไหลลงแหล่งน้ำนั้นๆ หรือไม่ แต่เป็นเพียงการคาดคะเนเท่านั้น สารคลอไรด์จริงๆ แล้ว ถ้ามีไม่มากจนเกินไป จะไม่มีผลอันตรายต่อคนเรา ซึ่งเป็นแต่เพียงน้ำที่มีรสเค็มเท่านั้น โดยปกติในน้ำประปาไม่ควรให้มีคลอไรด์อยู่มากเกินกว่า 250 มก./ลิตร

2.4.3 คุณลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา (Biological Characteristics of Wastewater)

โดยทั่วไป organic waste เกิดจากจุลินทรีย์ (microorganisms) หมายถึงพวกพืช (ไวรัส, แบคทีเรีย, เห็ดรา, สาหร่าย) และสัตว์ (โปรโตซัว, rotifers = สัตว์เซลล์เดียว, crustaceans) มีผลทำให้เกิดรสและกลิ่นในน้ำ ถ้ามีจุลินทรีย์บางชนิดในน้ำมากเกินไปอาจทำให้เกิดโรค เช่น ไทฟอยด์ (Typhoid จากเชื้อ *Vibrio cholerae*)

โดยปกติ น้ำจะมีสิ่งเจือปนอยู่แล้วตามธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ หรือ สารอนินทรีย์ ก็ตามถ้าไม่มีการกระทำของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง น้ำก็คงมีสภาพเป็นไปตามวัฏจักรของธรรมชาติ แต่การดำรงชีวิตของมนุษย์ และการเจริญเติบโตของสังคม ทำให้มีกิจกรรมเกี่ยวกับการเกษตร อุตสาหกรรมมากขึ้น มีการผลิตและใช้สารเคมีมากขึ้น โดยนำแร่ธาตุและพลังงานมาใช้ ประกอบกับการขยายตัวของเมืองและชุมชนต่างๆ ดังนั้นระบบสาธารณสุขไปจนถึงไม่เพียงพอก่อให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพของน้ำและการเสื่อมคุณภาพเกิดขึ้น

2.5 กระบวนการกำจัดน้ำเสีย

แบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

2.5.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Unit process)

คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้แยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Floatation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Removal) เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน ดังตาราง 6

2.5.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Unit Process)

คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) การใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอน (Coagulation/Flocculation) ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) คลอรีเนชัน (Chlorination)

ตาราง 6 หน้าที่หลักของวิธีบำบัดน้ำเสียทางกายภาพต่างๆ

วิธีบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ	หน้าที่หลัก
ตะแกรง	ดักเศษขยะต่างๆ ที่ไหลมากับน้ำเสีย โดยมากจะเป็นชิ้นแรกๆ ในโรงบำบัด
เครื่องตัดย่อย	ทำการบดตัดเศษขยะขนาดใหญ่ให้เป็นเศษตะกอนเล็กที่มีขนาดเท่าๆ กัน
การกำจัดตะกอนหนัก	ทำการแยกตะกอนหนักต่างๆ เช่น หิน กรวด ทราย เศษอาหาร เป็นต้น โดยอาศัยการควบคุมการไหลของน้ำในถัง หรือรางกำจัดตะกอนหนัก
การกำจัด และไขมัน	ทำการดักหรือกวาดพวบน้ำมันและไขมันออกจากน้ำ
การตกตะกอน	ทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีแรงโน้มถ่วง ตะกอนต้องมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1
การทำให้ตะกอนลอย	ทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทำให้ลอย โดยมากใช้กับตะกอนที่ความถ่วงจำเพาะใกล้เคียง 1
การกรอง	ทำการดักตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ด้วยชั้นทราย หรือชั้นหิน หรืออื่นๆ โดยทั่วไปตะกอนส่วนมากจะถูกดักบริเวณผิวชั้นกรองจนเกิดฟิล์มบางๆ ขึ้น

2.5.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีฟิสิกัลเคมี (Physical Chemical Process)

คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange), การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon Adsorption), ออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis), การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) เป็นต้น

กระบวนการนี้ เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง อาศัยเครื่องมือที่มีอุปกรณ์ค่อนข้างมากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียวิธีอื่นๆ แต่กระบวนการนี้จะสามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพดีจนถึงระดับเป็นน้ำดื่มได้ กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบนี้มักจะใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย หลังจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ทางชีวภาพและหรือทางเคมีต่อเนื่องตามลำดับ

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ(Adsorption) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ใน ปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดซับของก๊าซ และต่อมาใน ปี ค.ศ.1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลาย เป็นที่ทราบกันดีว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับบนของแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านไวงาน (Active carbon) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดื่มและน้ำเสีย การดูดซับเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของ 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

นิยามการดูดซับ

เมื่อวัฏภาคสองวัฏภาค (วัฏภาคหนึ่งต้องเป็นก๊าซหรือของเหลว และอีกวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็ง) มาสัมผัสซึ่งกันและกันแล้วทำให้ความเข้มข้น หรือจำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร บริเวณผิวสัมผัส แตกต่างไปจากองค์ประกอบของวัฏภาคในส่วนที่อยู่ห่างบริเวณผิวสัมผัสหรือรอยต่อออกไป ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption) และจะเกิดขึ้นได้ในทุกสถานะของระบบ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของสมดุล หรือสถานะของการเปลี่ยนแปลง วัฏภาคที่มีอนุภาคของสารอีกวัฏภาคหนึ่งมาสะสมอยู่บริเวณรอยต่อเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) และวัฏภาคที่ปล่อยให้อนุภาคของมันเองไปสะสมในวัฏภาคอื่น เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) อย่างไรก็ตาม นิยามการดูดซับตามที่กล่าวมานี้ไม่ได้กำหนดตำแหน่งหรือระยะห่างจากผิวที่จะให้สารถูกดูดซับเข้าไปเกาะ

ในระบบทั่วไป สารถูกดูดซับมักจะจับอยู่บริเวณพื้นผิว หรือรอยต่อระหว่างวัฏภาคเท่านั้น แต่ก็ มีบางระบบที่สารถูกดูดซับสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อ หรือในโครงสร้างของสารดูดซับจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางประการเช่น ละเหลว หรือเข้าไปด้วยสารถูกดูดซับ ปรากฏการณ์ตามลักษณะนี้เรียกว่า การดูดกลืน (Absorption) การดูดซับและการดูดกลืนมีข้อแตกต่างกัน 3 ประการ คือ

- 1.การดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของสารดูดซับ แต่การดูดกลืนจะมีการทะลุทะลวงของสารถูกดูดกลืนเข้าไปในเนื้อของสารดูดกลืน จนทำให้สารดูดกลืนมีสภาพผิดไปจากเดิม เช่น เกิดการพองตัว บิดเบี้ยว ละเหลว หรือเปลี่ยนสภาพเป็นอย่างอื่น

2. ขบวนการดูดซับสามารถทำลายด้วยวิธีการ คายขับ (Desorption) ซึ่งเป็นกรรมวิธีง่ายๆ เช่น การให้ความร้อน หรือการลดความดัน แต่การดูดกลืนจะไม่ถูกทำลายด้วยกรรมวิธีง่ายๆ

3. ขบวนการดูดซับมักจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสิ้นสุดในระยะเวลานั้น แต่ขบวนการดูดกลืนจะใช้เวลานานกว่าหลายเท่าตัว การดูดกลืนบางระบบอาจใช้เวลาหลายเดือนกว่าขบวนการจะสิ้นสุด

การดูดซับและการดูดกลืนสามารถเกิดควบคู่ในระบบเดียวกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารในระบบและสภาพแวดล้อม เรามักใช้คำกลางๆ เรียกว่า การดูดจับ (Sorption) คำนี้จะพบบ่อยๆ เมื่อศึกษาเรื่อง การควบแน่นในรูพรุน (Capillary Condensation) ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Ion-Exchange) และ โครมาโตกราฟี (Chromatography)

การดูดซับ (Adsorption) หรือ การดูดจับ (Sorption) อาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบทางกายภาพและทางเคมี (Chemical Adsorption or Chemisorption) ในขบวนการดูดซับกายภาพ หมอกอิเล็คตรอนของโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะกระทำโดยทั้งหมดกับโมเลกุลของสารดูดซับ ในทางตรงข้ามการดูดซับเคมีจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือการถ่ายเทอิเล็คตรอนระหว่างกันและกัน จนในที่สุดจะเกิดพันธะเคมี (Chemical Bond)

2.6.1 ลักษณะการดูดซับ

2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบ ที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบจะยึดติดแน่นบนผิว ของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่น นั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอ ของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้น ได้ที่อุณหภูมิปกติ จะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อน ของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรืออุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถใน การดูดซับลดลง ทำให้การดูดซับ เคลื่อนที่ออกจาก ตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้ เรียกว่า desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (reversible) การดูดซับนี้ สารดูดซับ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า Van der Wal's adsorption

2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption or chemisorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่าง จากการดูดซับ ทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับ กับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ซึ่งไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบน

พื้นผิวจึงเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด และการดูดซับแบบนี้ จะไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับได้ (desorption) ทั้งนี้เนื่องจาก องค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) ปฏิกิริยานี้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่ อุณหภูมิปกติองค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิด การดูดซับทางเคมีได้

2.6.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (adsorption force)

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force) แรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงวานเดอร์วาลส์ (van der Wal's force) เช่น partitioning รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) บริเวณ ผิวรบนอกของสารประกอบ เช่น ion exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องจากการเกิด ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะ เกิดกลไกการเปลี่ยนลิแกนด์ (legand) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะ ไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

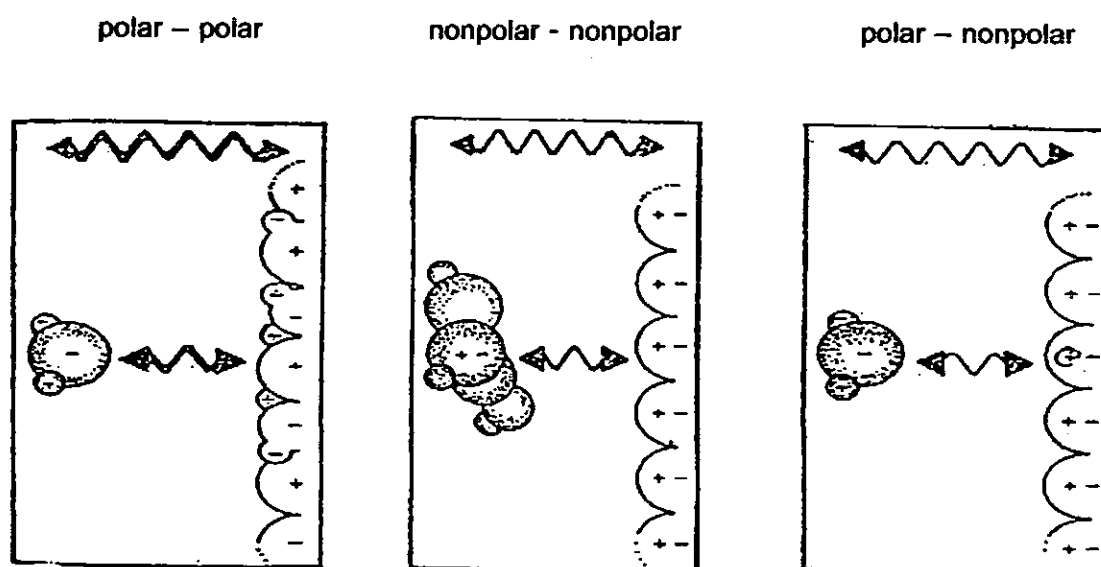
2.6.2.1 แรงวานเดอร์วาลส์ (van der Wal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระ หรือ โมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละ บริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุล ไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้น การคายการดูดซับ (desorption) จะกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2.6.2.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้ (ภาพประกอบ 10)

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม
2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (distribution effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาใกล้ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกัน

และกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่นอินทรียสารและ ถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรียสารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้ว เข้ามาใกล้โมเลกุล ที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ10 การดูดซับของตัวดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย
(ศิริรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร,2543)

2.6.2.3 แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆเช่น คอลลอยด์ดินนั้นเนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1. เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

แรงทางกายภาพและเคมีในการดูดซับด้วยดินเกิดขึ้นเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของแร่ดินเหนียว (surface function group) เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวเป็นหน่วยของโมเลกุลที่มีความไวต่อปฏิกิริยา

และอยู่ ที่บริเวณผิวรอบนอกของดิน จึงทำให้ดินมีบทบาทที่สำคัญในการดูดซับน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในดิน หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวอาจจะเป็นหน่วยของโมเลกุลที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น carboxyl, carbonyl, หรือ phenolic หรือเป็นหน่วยของโมเลกุลที่เป็นอนินทรีย์สารก็ได้ เช่น ออกซิเจนอะตอมในชั้นของ silica tetrahedral ของแร่ดินเหนียวและหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บริเวณขอบผลึกของแร่อนินทรีย์ เช่น kaolinite, amorphous materials โลหะออกไซด์ โลหะออกซีไฮดรอกไซด์ และโลหะไฮดรอกไซด์

2.6.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Adsorption Process and Rate of Molecular Transfer)

2.6.3.1 กลไกการดูดซับ(Adsorption Mechanism)

การดูดซับของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding Force) หลายชนิดระหว่าง โมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของคาร์บอนซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interaction) การดูดซับที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) (Eckenfelder, 1981) การดูดซับทั้ง 2 แบบ นี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยา (Action) ของแรงวันเดอวาล์ว (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรง ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) (Eckenfelder, 1981) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทาง กายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayered) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้าโดยจำนวนชั้นเป็น สัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความ เข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิด สารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูด ซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทาง กายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูด ซับ และตัวถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (Desorption) ขึ้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

Kiselev (1965, Voice and Weber, 1983) กล่าวว่า ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 Kcal/mol ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 Kcal/mol นอกจากนี้ Hassler (1963) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การดูดซับทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดซับทางเคมีเพิ่มขึ้น

2.6.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

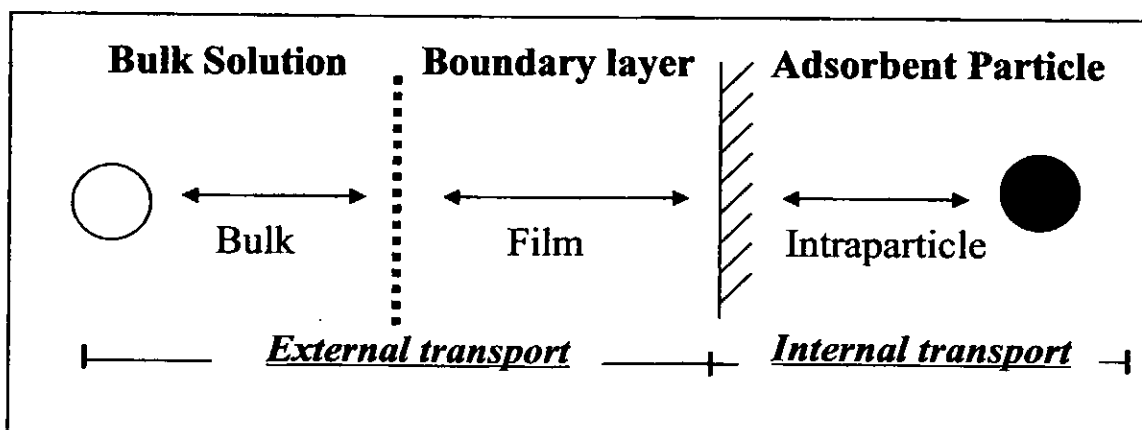
อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับผิว

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.6.4.1 ธรรมชาติของสารดูดซับ (nature of the the adsorption)

2.6.4.1 .1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2.6.4.1 .2 ขนาดของวัตถุ (particle size)

ในกรณีที่สารดูดซับที่ไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ

2.6.4.2 ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ (Nature of the the adsorbate)

2.6.4.2.1 ความสามารถในการละลาย

ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2.6.4.2.2 น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นถ้าโมเลกุลของสารที่ดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.6.4.2.1 ความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity)

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงในสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

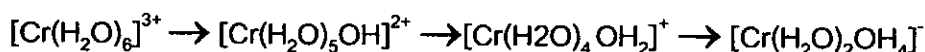
2.6.4.3 สภาพแวดล้อม

2.6.4.3.1 ผลของอุณหภูมิของสารละลาย (Effect of temperature)

เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ

2.6.4.3.2 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (Effect of pH)

เนื่องจาก pH มีผลต่อรูปแบบ (species) ของโลหะ เช่น ไอออนของตะกั่วจะมีรูปแบบต่างๆ กันขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย ที่ pH ต่ำกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่ pH สูงๆ ไอออนของตะกั่วจะมีการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบประเภท hydroxocomplexes ชนิดต่างๆ เช่น Pb^{2+} , $Pb(OH)^+$, $Pb_2(OH)^+$ และ $Pb_3(OH)^+$ ในกรณีของ Cr^{3+} pH จะทำให้ Cr^{3+} บางรูปแบบมีประจุเปลี่ยนจากบวกเป็นลบได้ดังนี้



นอกจากค่า pH ของสารละลายจะมีผลต่อประจุของไอออนของโลหะแล้ว ยังมีผลต่อประจุที่ผิวของตัวดูดซับด้วย (pH dependent charge) ซึ่งเป็นผลมาจากการ ionization ของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุในดิน

อย่างไรก็ตามสารชนิดหนึ่งจะดูดซับสารอื่นได้มากเพียงใดย่อมขึ้นอยู่กับว่าสารดูดซับนั้นมีเนื้อที่ผิวมากเพียงใด เพราะการดูดซับย่อมเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าปราศจากเนื้อที่บนผิวของสารดูดซับ สำหรับให้สารถูกดูดซับยึดเกาะ สิ่งที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมหรือกำหนดปริมาณการดูดซับในดิน ได้แก่ อนุภาคดินเหนียว และอนุภาคอินทรีย์สาร เพราะอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้โดยปกติจะเล็กละเอียดมากจึงมีเนื้อที่ผิวจำเพาะที่สูงมาก นอกจากนี้ประจุไฟฟ้าของอนุภาคเหล่านี้ยังไม่สมดุลอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงความเป็นประจุลบมากกว่าประจุบวก ประจุไฟฟ้าที่ไม่สมดุลนี้เองที่สาเหตุให้อนุภาคดินเหนียวและอนุภาคอินทรีย์สารสามารถดูดซับไอออนและโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามได้

2.6.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption equilibrium and adsorption Isotherm)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จะมีการคายการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายตัวจะเท่ากันหรือ ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ(adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นคุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเราใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เกิดขึ้น

2.6.5.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_0) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่สารละลายที่สภาวะสมดุล (C_0) ณ อุณหภูมิคงที่

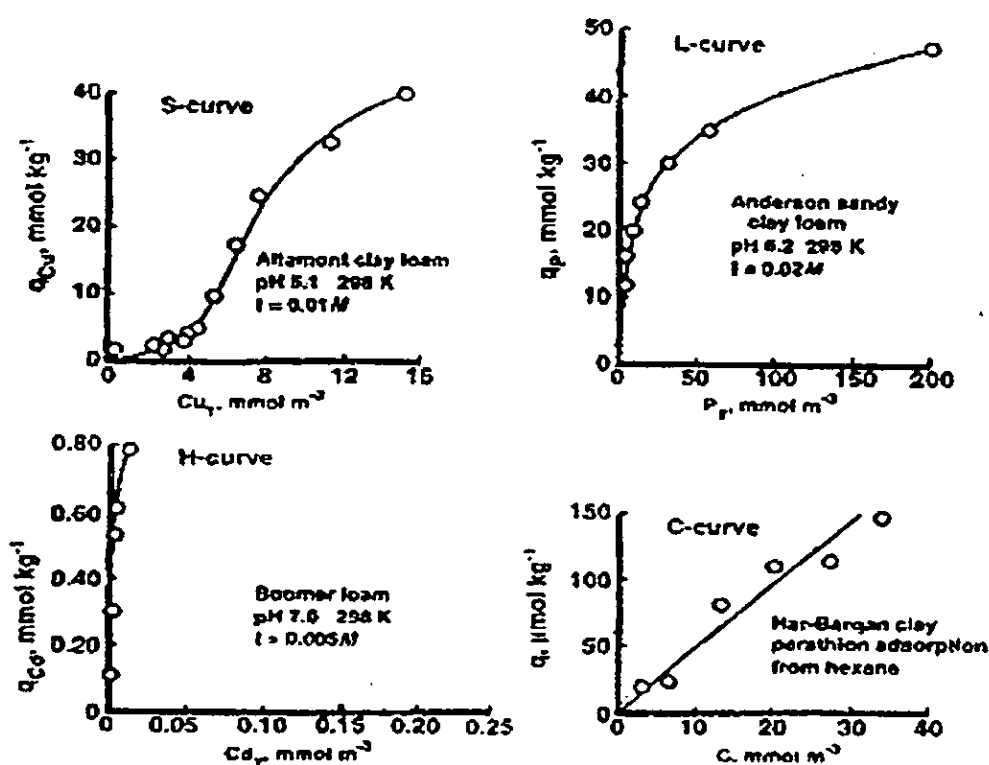
ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่างๆ เส้นนี้ได้จากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับในดินมักพบไอโซเทอมใน 4 ลักษณะ คือ S,L,H และ C ซึ่งสามารถจำแนกได้ด้วยลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอมในช่วงเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 12

S-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะต่ำแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นเพื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ในที่สุดก็จะลดลงและเป็น 0 เมื่อพื้นที่ว่างในการดูดซับของสารดูดซับเต็ม ไอโซเทอมชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ พื้นผิวของสารดูดซับจะมีแรงดึงดูด (affinity) ต่อสารที่ถูกดูดซับต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเพื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

L-curve (Langmuir) isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะสูงมากแล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า สารดูดซับมีแรงดึงดูดหรือมีความสามารถในการดูดซับสารหรือไอออนในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ว่างในการดูดซับมีน้อยลง

H-curve (High affinity) isotherm มีลักษณะในช่วงเริ่มต้นสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับ L-curve Isotherm) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าสารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ซึ่งอาจจะเกิด inner-sphere complexation หรือเกิดปฏิกิริยาดว้ยแรงวานเดอร์วาลส์ ขึ้นในกระบวนการดูดซับ

C-curve isotherm ความชันของกราฟนี้จะไม่ผันแปรตามความเข้มข้นสารละลายแสดงถึง partitioning mechanism ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับถูกทำให้แพร่กระจายหรือแยกออก ระหว่างบริเวณใกล้ผิวของตัวดูดซับ (interfacial phase) กับสารละลาย โดยปราศจากพันธะจำเพาะใดๆ (specific bonding) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ



ภาพประกอบ 12 รูปแบบของ adsorption Isotherm (ศิริรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543)

2.6.6 การดูดซับโดยใช้หอดูดซับ (The Adsorption Column)

ในคอลัมน์ตัวดูดซับจะถูกใส่ไว้ในปริมาณคงที่โดยมีการป้อนของเหลวที่มีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับโดยเป็นการป้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดีกว่าการใช้แบบขั้นตอนเดียว (batch) คือ อัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะสัมพันธ์กับชั้นของตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง

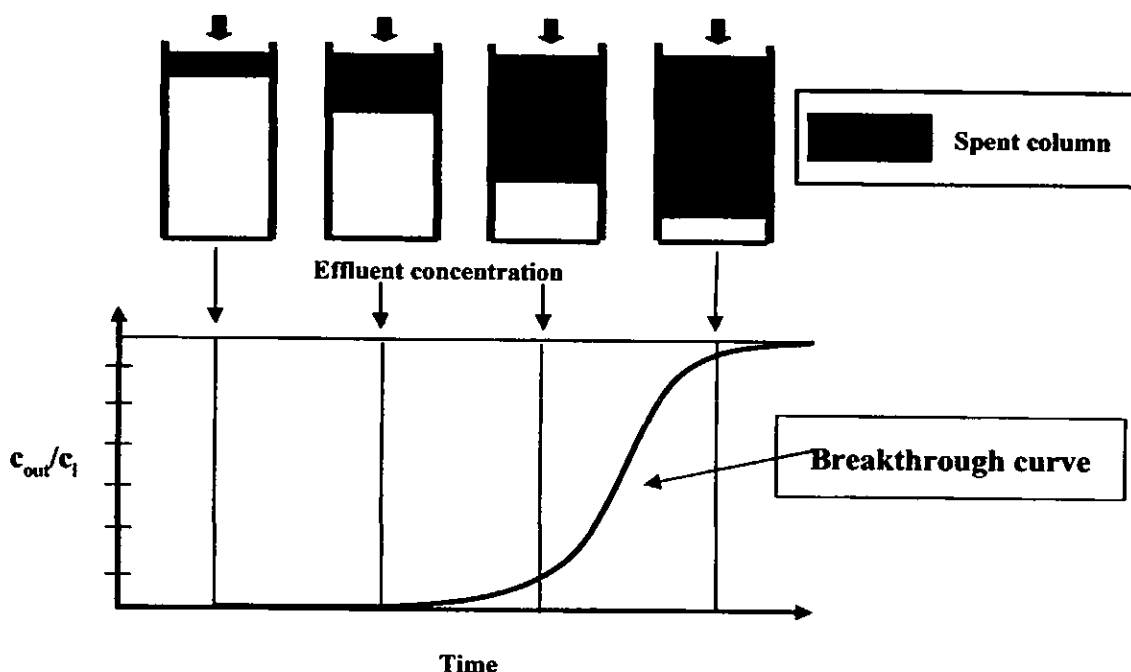
2.6.6.1 เขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone : MTZ)

เมื่อน้ำที่มีสารละลายปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ เขตการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องของตัวถูกละลายในชั้นของตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้ตัวดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับก็จะเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่ตัวถูกละลายเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสภาวะที่ถูกดูดซับนี้ เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลสารจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของสารถูกดูดซับ ลักษณะของตัวดูดซับ และปัจจัยทางพลศาสตร์

2.6.6.2 ลักษณะการหมดสภาพ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะการหมดสภาพ เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำขาออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังภาพที่ 13 แสดงรูปแบบทั่วไปของเส้นโค้งการหมดสภาพ และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งการหมดสภาพ กับปริมาณของชั้นตัวดูดซับที่หมดสภาพ ชั้นของตัวดูดซับที่ยังทำงานได้ (active zone) และชั้นของตัวดูดซับที่ปราศจากตัวถูกละลาย

การหมดสภาพของการดูดซับ(breakthrough)ของคอลัมน์ จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์มีค่าถึงจุดที่ยอมรับได้มากที่สุด หากความเข้มข้นของสารละลายเกินจากค่านี้ไปก็ต้องทำการเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ การหมดสภาพการดูดซับดูจากเส้นโค้งการหมดสภาพที่เกิดจากการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ



ภาพประกอบ 13 การดูดซับภายในหอดูดซับ

(Clark and Likins 1989)

2.6.7 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับด้วยดินคือสมการ Langmuir และ Freundlich

2.6.7.1 สมการ Langmuir

สมการของ Langmuir ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ 1918 เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิว และถูกประยุกต์ใช้กับดินครั้งแรกโดย Fride และ Shapiro ในปี ค.ศ 1956 และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ 1957 เพื่ออธิบายการดูดซับฟอสเฟสบนดิน ต่อมาจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์สมการของ Langmuir ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ เช่นเดียวกับสมการของ Freundlich

สมมุติฐานของสมการ Langmuir

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (การดูดซับแบบชั้นเดียว , monolayer)
2. การดูดซับสามารถย้อนกลับได้

3. จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุก ๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

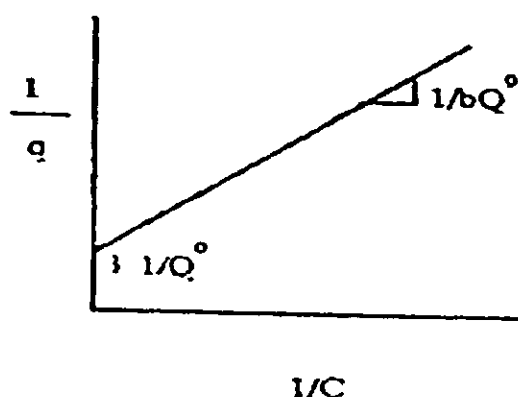
สมมุติฐานเหล่านี้ส่วนใหญ่จะไม่นำมาใช้อธิบายการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น heterogeneous เช่น ดิน เพราะสมมุติฐานของสมการ Langmuir จะใช้ได้ดีกับการดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น homogeneous สมการ Langmuir สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{C_x}{v} = \frac{C_x}{v_m} + \frac{1}{Kv_m}$$

$$v = \frac{X}{M}$$

เมื่อ	x	คือปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	M	คือปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)
	Cx	คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
	Vm	คือปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัมของดินเผา)
	K	คือค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือเป็นค่าคงที่ของความร่อนของการดูดซับ

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ C_x/v เป็นแกน y และ C_x เป็น แกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ $1/V_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/KV_m$ (รูปที่ 14) ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ X_m และ b ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y



รูป 14 ลักษณะของ Langmuir adsorption Isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง
(ศิริรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543)

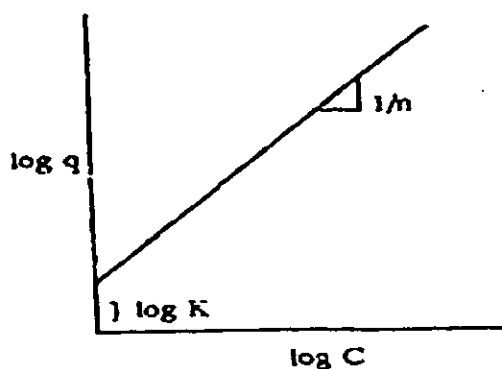
2.6.7.2 สมการ Freundlich

สมการ Freundlich ถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซและตัวถูกละลายในสารละลาย เป็นการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม ซึ่งมีการใช้มากในเคมีดินสิ่งแวดล้อม สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\log v = \log K + \frac{1}{n} \log C_x$$

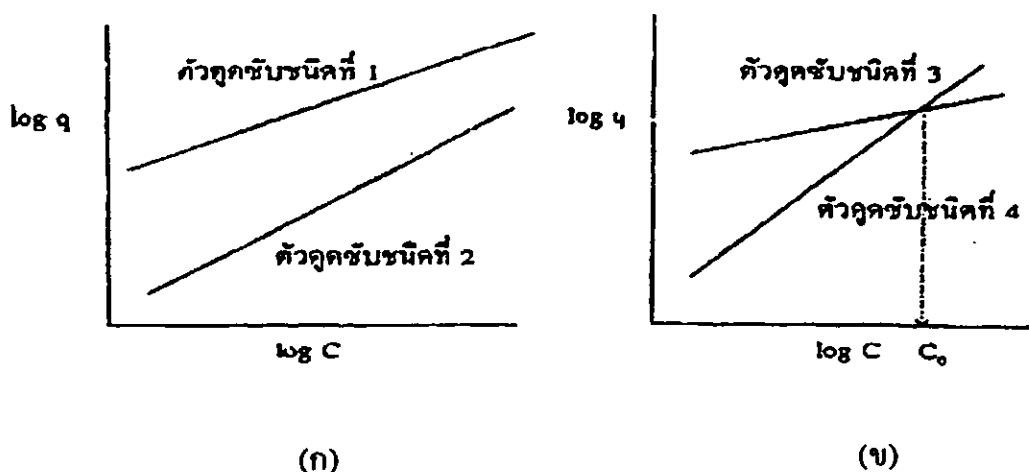
เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย
 n คือ correcting factor

เมื่อนำค่า $\log V$ กับ $\log C_x$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log V$ เป็นแกน y และ $\log C_x$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ (รูปที่ 15) เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดกับแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะของ Freundlich Isotherm จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ Freundlich ที่สำคัญข้อหนึ่งคือทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



ภาพประกอบ 15 ลักษณะของ Freundlich adsorption Isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง

สมการ Freundlich จะใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลางในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน สามารถพิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูป 16(ก) จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 16(ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีไอโซเทอมที่สูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกดูดซับให้เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ นอกจากนี้ในรูปที่ 16(ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าที่ 3 แสดงว่า ถ้าต้องการบำบัดแบบต่อเนื่อง (continuous flow) แล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าชนิดที่ 3



ภาพประกอบ 16 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจาก รูปแบบ Freundlich adsorption Isotherm (ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543)

บทที่ 3

วัตถุดิบ อุปกรณ์ และ การดำเนินการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- 1 เศษดินเผา จากโรงงานผลิตเครื่องปั้นดินเผา
- 2 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (Merck , AR-Grade)
- 3 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ (Merck , AR-Grade)
- 4 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (Merck , AR-Grade)
- 5 Cadmium Standard Solution (Merck)
- 6 Zinc Standard Solution (Merck)
- 7 Lead Standard Solution (Merck)
- 8 กรดไนตริก (HNO_3) (AR-Grade)
- 9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)(AR-Grade)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1 เครื่องคัดขนาดอนุภาค Gilson 5550/5550A
- 2 เครื่องเขย่า Gallenkamp orbital shaker
- 3 เครื่อง Centrifuge Labquip 1000 Series
- 4 เครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectrophotometer)
ยี่ห้อ GBC 908AA
- 5 Column ทำจากพลาสติกใส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 44 เซนติเมตร
- 6 เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Denver Instrument model 15
- 7 เครื่องสูบน้ำ (Pump)
- 8 ถังเก็บน้ำเสีย

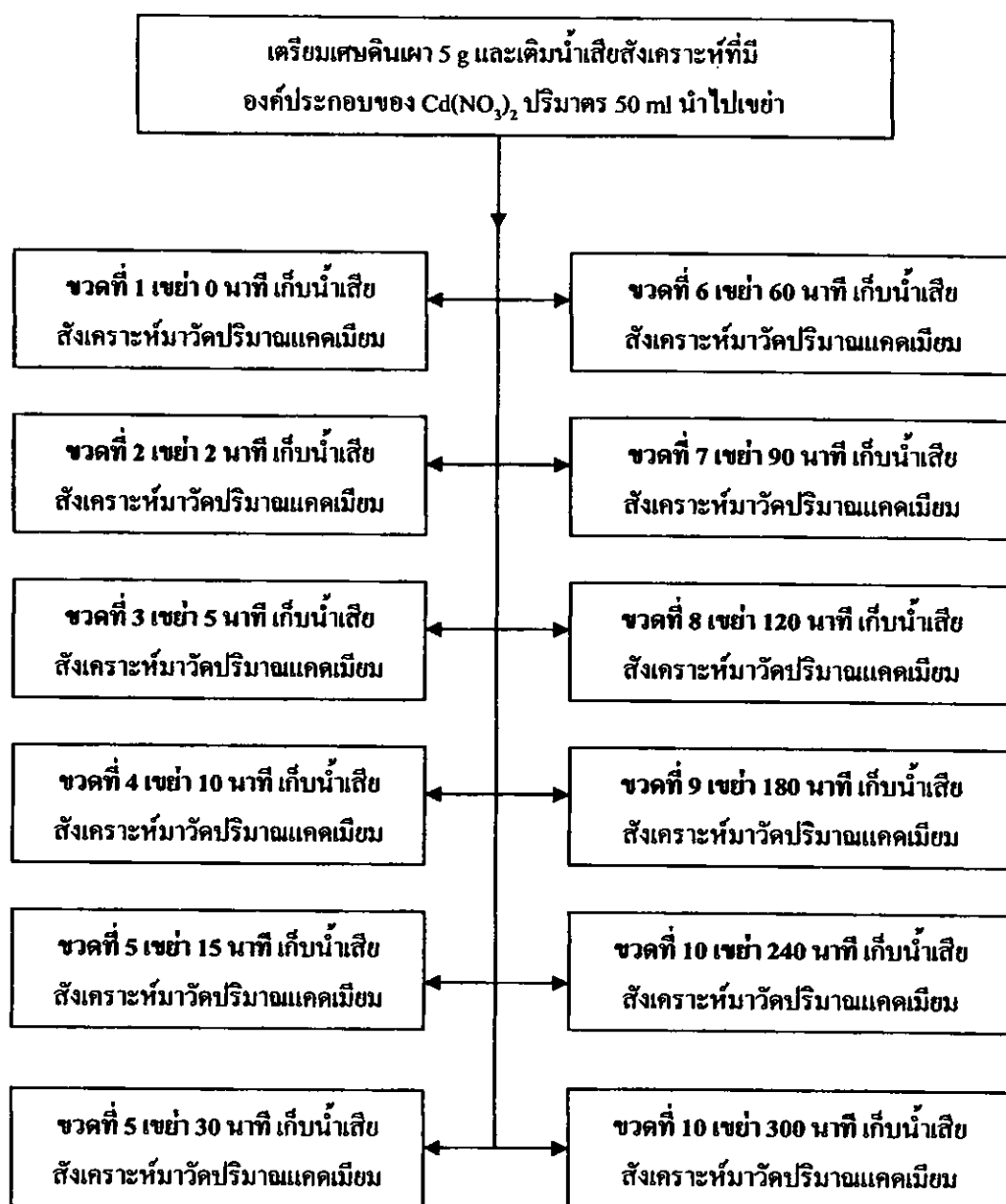
วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมเศษดินเผาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ

- 1.1 นำเศษดินเผาที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ(เศษชิ้นงานเผาดิบ)ที่ได้จากโรงงานมาทำการบด และ ทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงจนได้ขนาดอนุภาค 2 ขนาดคือ
 1. ขนาดอนุภาคที่ mesh no.4 - 8
 2. ขนาดอนุภาคที่ mesh no.8 -16
- 1.2 นำไปทำให้แห้งที่ 105°C เพื่อไล่ความชื้นด้วยเตาอบ

ตอนที่ 2 ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของเศษดินเผาที่อุณหภูมิห้อง

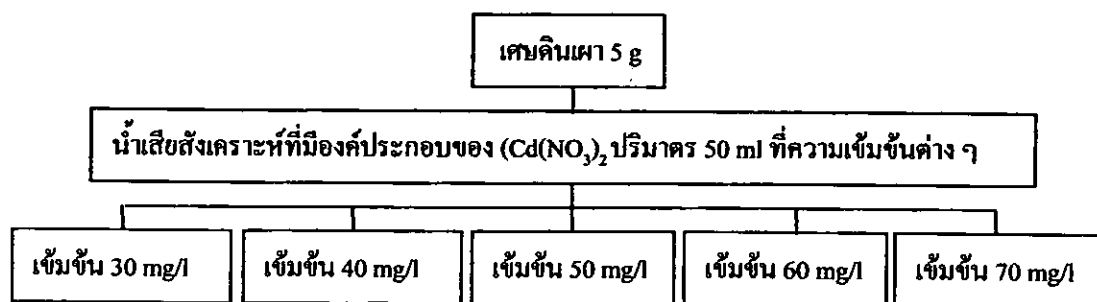
- 2.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ $\text{pH} = 5$ เก็บ ตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นเพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) และค่า pH เริ่มต้น
- 2.2 ชั่งปริมาณเศษดินเผาขนาดที่ 1หนัก 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ทั้งหมด 10 ขวด
- 2.3 ตวงน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุเศษดินเผาตามข้อ 2.2
- 2.4 นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 180 รอบต่อนาที
- 2.5 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเขย่าโดยทำการเก็บที่เวลา 0,2,5,10,15,30,60,90 120,180,240 และ 300 นาทีตามลำดับ
- 2.6 นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้ไปทำการแยกตะกอนเศษดินเผาโดยใช้กระดาษกรอง
- 2.7 เก็บตัวอย่างจากข้อ 2.6 ใส่หลอดทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมและ ค่า pH สุดท้าย
- 2.8 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำ
- 2.9 ทำซ้ำข้อ 2.1-2.8 แต่เปลี่ยนเป็นใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ
- 2.10 ทำการทดลองซ้ำข้อ 2.1-2.9 แต่เปลี่ยนมาใช้เศษดินเผาขนาดที่ 2 แทน
- 2.11 นำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่เวลาเข้าสู่สมดุลโดยวิธีการทดลองแสดงโดยย่อผังแผนภาพ 17



แผนภาพ 17 แสดงการทดสอบจลนศาสตร์การดูดซับโลหะหนัก

ตอนที่ 3 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich

- 3.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของแคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) ความเข้มข้น 30,40,50,60,70 มิลลิกรัมต่อลิตรเก็บตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นไว้เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
- 3.2 นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้ในข้อ 3.1 มาปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด พร้อมทั้งนำเศษดินเผา ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 จำนวน 5 กรัม ใส่ลงในแต่ละขวด
- 3.3 นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมดไปใส่ เครื่องเขย่า (shaker) โดยเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที
- 3.4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังเขย่าโดยใช้เวลาในการเขย่าเท่ากับเวลาที่มีการดูดซับถึงสภาวะ สมดุลของสารแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2
- 3.5 นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากข้อ 3.4 ไปทำการแยกตะกอนเศษดินเผา โดยใช้กระดาษกรอง
- 3.6 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 3.5 ใส่หลอดทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
- 3.7 ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.1-3.6 แต่เปลี่ยนชนิดของไอออนโลหะเป็น $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
- 3.8 นำค่าการดูดซับที่ได้มาทำการคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ Langmuir Adsorption Isotherm และ Freundlich Adsorption Isotherm โดยวิธีการทดลองแสดงโดยย่อผังแผนภาพ 18



แผนภาพ 18 แสดงการทดลองหาความสัมพันธ์ ไอโซเทอม

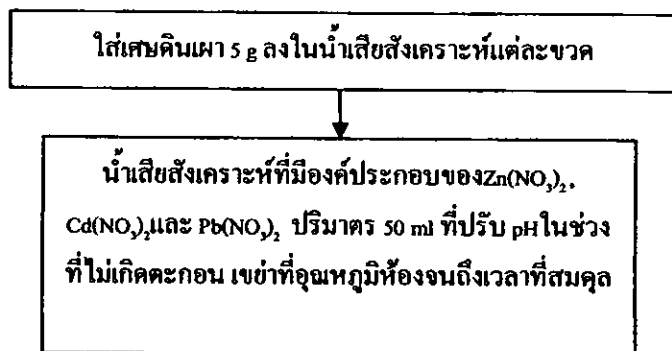
ตอนที่ 4 ศึกษาผลของ pH (กรด-ด่าง) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก

- 4.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของแคดเมียมไนเตรท($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด ที่ pH ต่าง ๆ ที่จะไม่ ทำให้ โลหะหนักเกิดการตกตะกอน โดยการปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นไปวัดความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม
- 4.2 ชั่งเศษดินเผา 5 กรัม ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดที่ได้จากตอนที่ 2 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่จากข้อ 4.1
- 4.3 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งได้ระยะเวลาตาม equilibrium time ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดที่ได้ศึกษามาแล้วจากตอนที่ 2
- 4.4 แยกตะกอนเศษดินเผาออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กระดาษกรองและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมโดยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
- 4.5 ทำการทดลองซ้ำข้อ 4.1-4.4 แต่เปลี่ยนมาใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ

ตาราง 7 ช่วงของ pH ที่ทำให้โลหะหนักเกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์
(ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543)

ไอออนโลหะ	ช่วง pH ที่ทำให้โลหะหนักตกตะกอน
Zn^{2+}	ตกตะกอนในช่วง pH 7 -13
Cd^{2+}	ตกตะกอนในช่วง pH มากกว่า 9
Pb^{2+}	ตกตะกอนในช่วง pH 8 - 12
Ni^{2+}	ตกตะกอนในช่วง pH มากกว่า 8

โดยวิธีการทดลองแสดงโดยย่อผังแผนภาพ 19

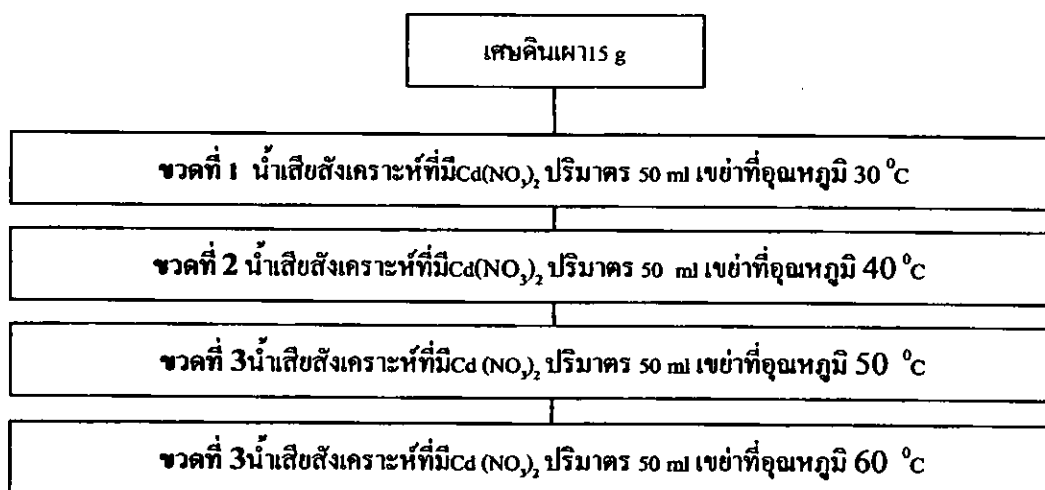


แผนภาพ 19 แสดงผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผา

ตอนที่ 5 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนัก

- 5.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของแคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เวลาเริ่มต้นไว้เพื่อนำไปวัดค่าความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม
- 5.2 ตวงน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เตรียมได้ในข้อ 5.1 จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ จำนวน 3 ขวด จากนั้นใส่เศษดินเผาซึ่งเป็นขนาดที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดที่ได้จากตอนที่ 2 จำนวน 5 กรัม ลงไปในแต่ละขวด
- 5.3 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที โดยปรับอุณหภูมิการเขย่าที่ 30, 40, 50, 60 °C โดยใช้เวลาเขย่าเท่ากับเวลาที่ equilibrium time ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดตามที่ได้ศึกษามาแล้วจากตอนที่ 2
- 5.4 นำน้ำเสียสังเคราะห์ จากข้อ 5.3 มาแยกตะกอนเศษดินเผาออกโดยใช้กระดาษกรอง จากนั้น เก็บน้ำเสียสังเคราะห์ ไปวัดความเข้มข้นโลหะแคดเมียมโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
- 5.5 ทำการทดลองซ้ำข้อ 5.1-5.4 แต่เปลี่ยนมาใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ
- 5.6 นำค่าการดูดซับที่ได้มาทำการคำนวณและหาค่าตัวแปรอุณหพลศาสตร์

โดยวิธีการทดลองแสดงโดยย่อดังแผนภาพ 20



แผนภาพ 20 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผา

ตอนที่ 6 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง (Continuous flow) ด้วยคอลัมน์ดูดซับ (adsorption column)

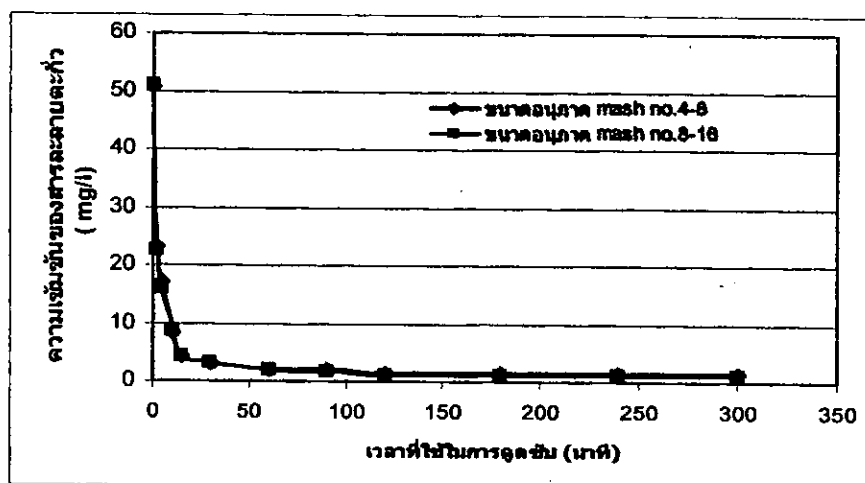
- 6.1 การทดลองใช้คอลัมน์ดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 44 เซนติเมตร ทำการปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ โดยใช้ค่า pH ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองตอนที่ 4
- 6.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัดที่เวลาเริ่มต้นเพื่อนำไปวัดค่าความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม
- 6.3 นำเศษดินเผาขนาดที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีโดยดูผลจากการทดลองตอนที่ 2 บรรจุในคอลัมน์
- 6.4 ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าทางด้านล่างของท่อโดยใช้เครื่องสูบน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากทางน้ำออกด้านบน จากนั้นเก็บน้ำเสียสังเคราะห์ไปวัดค่าความเข้มข้นโลหะแคดเมียม(โดยถ้าผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นไปตามคาดจะมีการปรับอัตราการไหลและช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างตามความเหมาะสม)
- 6.5 ทำการทดลองซ้ำข้อ 6.1-6.4 แต่เปลี่ยนมาใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ
- 6.6 จากการทดลองสามารถหา breakthrough curve เพื่อใช้ในการออกแบบระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

บทที่ 4

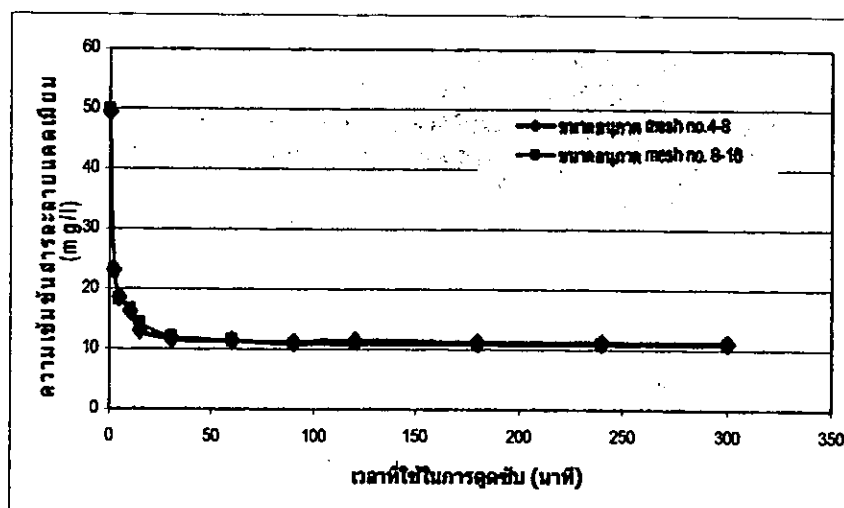
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับไอออนโลหะหนักของเศษดินเผาที่อุณหภูมิห้อง

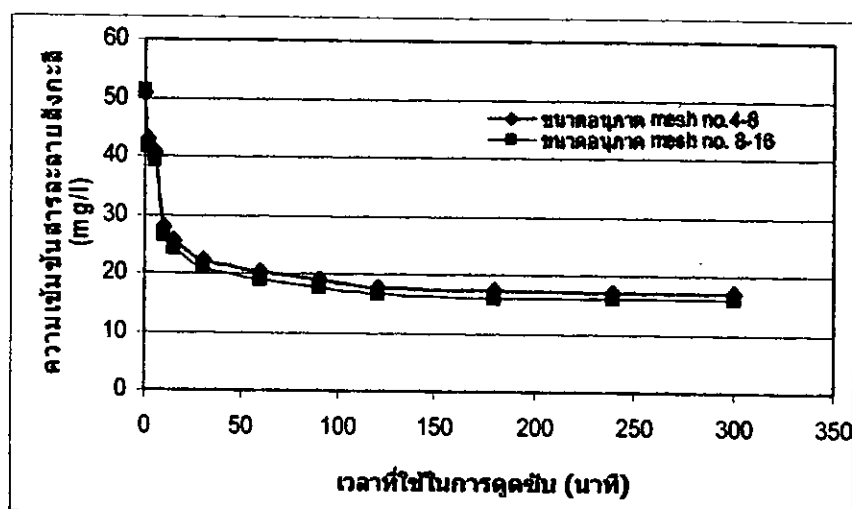
จากการทดลองนำเศษดินเผา 2 ขนาด ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 และ mesh no. 8 -16 มาทำการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว, แคดเมียมและสังกะสีที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 5 ใช้เศษดินเผา ปริมาณ 5 กรัม โดยตามขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบหาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่เหลืออยู่เมื่อผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ กันจนการดูดซับเข้าสู่สมดุล คือไม่มีการดูดซับโลหะหนักมากกว่านี้แล้วหรือการเปลี่ยนแปลงการดูดซับที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก โดยเขาาเพื่อให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลด้วยความเร็ว 180 รอบ/นาทีโดยช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลได้แก่ 0,2,5,10,15,30,60,90,120,180,240 และ 300 นาที ตามลำดับและจากการทดลองเราสามารถหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) และสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณของไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ต่อตัวดูดซับ 1 กรัม ได้ โดยรูปที่ 21-23 แสดงการเปรียบเทียบจลนศาสตร์การดูดซับโลหะหนักของดินแต่ละขนาด พบว่าเศษดินเผาทั้ง 2 ขนาดสามารถดูดซับโลหะตะกั่ว,แคดเมียมและสังกะสีได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น จากนั้นจะค่อย ๆ คงที่เมื่อเวลาผ่านไป 300 ,300 และ 300 นาที ตามลำดับ จึงถือให้เวลาดังกล่าวระบบได้เข้าสู่สมดุลแล้ว ซึ่งเราสามารถนำความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ณ. เวลาดังกล่าวมาคำนวณหาปริมาณการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ของ เศษดินเผาทั้ง 2 ขนาดได้



ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยเศษดินเผาปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร, pH = 5



ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียมโดยเศษดินเผาปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร, pH = 5



ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโลหะสังกะสีโดยเศษดินเผาปริมาณ 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH = 5

จากการทดลองตอนที่ 1 พบว่าเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว ได้ 0.49 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเศษดินเผา (97.28% Removal) เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no. 8 -16 สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว ได้ 0.49 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเศษดินเผา (97.51 % Removal)

เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียม ได้ 0.38 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมเศษดินเผา (77.12% Removal) เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no. 8 -16 สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมได้ 0.38 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมเศษดินเผา (77.86 % Removal)

เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 สามารถดูดซับไอออนโลหะสังกะสี ได้ 0.34 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมเศษดินเผา (66.17% Removal) เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no. 8 -16 สามารถดูดซับไอออนโลหะสังกะสี ได้ 0.3517 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมเศษดินเผา (68.68 % Removal)

และจากภาพประกอบ 21-23 พบว่ากราฟของตัวดูดซับทั้ง 2 ขนาดมีลักษณะคล้ายกันมากจนเกือบจะเท่ากันตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของตัวดูดซับมีผลเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนักเท่านั้น นอกจากนั้นแล้วการเลือกใช้ขนาดเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no. 8 -16 ทำได้ยากเนื่องจากเวลาทำการบดและคัดแยกขนาดนั้นปริมาณเศษดินเผาที่

ได้มีน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 เพราะส่วนมากที่ได้จะมีลักษณะเป็นผง การทดลองในตอนต่อไปจึงเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 มาทำการทดลองเพื่อหาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป

4.2 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich

การทดลองตอนนี้ เป็นการวิเคราะห์ว่าแบบจำลองการดูดซับแบบใดเป็นแบบที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละประเภทโดยใช้เศษดินเผา โดยจะใช้ค่า Correlation indexes (R^2) เป็นตัววัดว่าแบบจำลองใดเหมาะสมที่สุด และจะวิเคราะห์ว่าเศษดินเผา มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักชนิดใดได้ดีที่สุดโดยแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์การดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละประเภทด้วยเศษดินเผา คือ

1. Langmuir model :

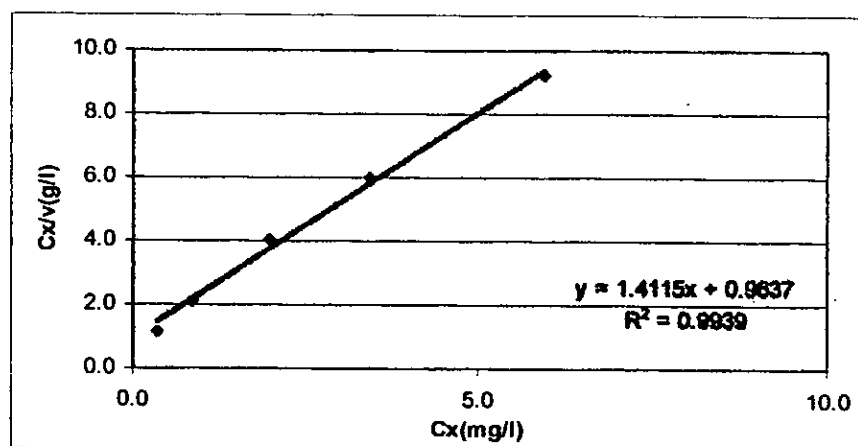
$$\frac{C_x}{V} = \frac{C_x}{V_m} + \frac{1}{KV_m}$$

ค่า C_x คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล ค่า v คือ ค่าปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักวัสดุดูดซับที่จุดสมดุล โดยใช้เวลาในการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำค่า C_x/v และค่า C_x ไปเขียนกราฟหาค่า v_m และ ค่า K ได้ โดยที่ค่า v_m จะเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้สูงสุดของตัวดูดซับ สำหรับค่า K คือค่าคงที่การดูดซับ ซึ่งจะแสดงถึงแรงดึงดูดระหว่างไอออนของโลหะหนักกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งกราฟแสดงแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir สามารถแสดงได้ดังภาพ

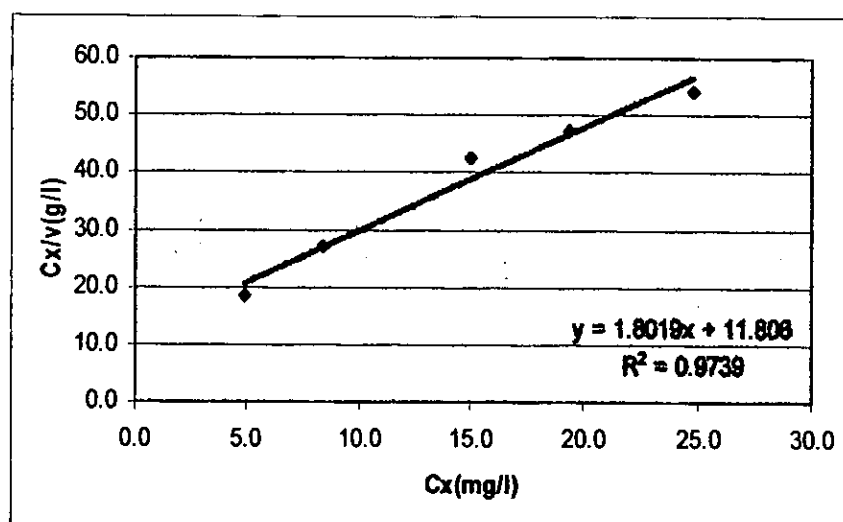
2. Freundlich model :

$$\log V = \log K + \frac{1}{n} \log C_x$$

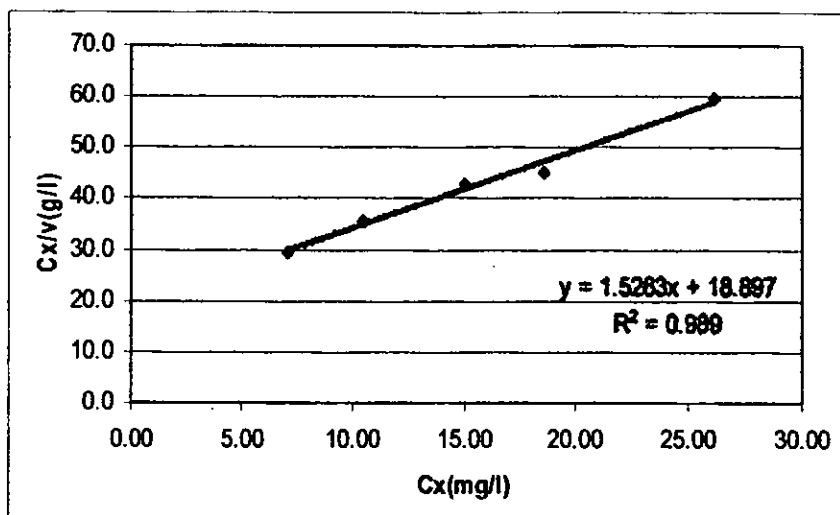
โดยที่สมการของ Freundlich ค่า n คือค่าที่แสดงถึงการกระทำต่อกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ และค่า K คือค่าความจุการดูดซับของ Freundlich ซึ่งกราฟแสดงแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich สามารถแสดงได้ดังภาพ



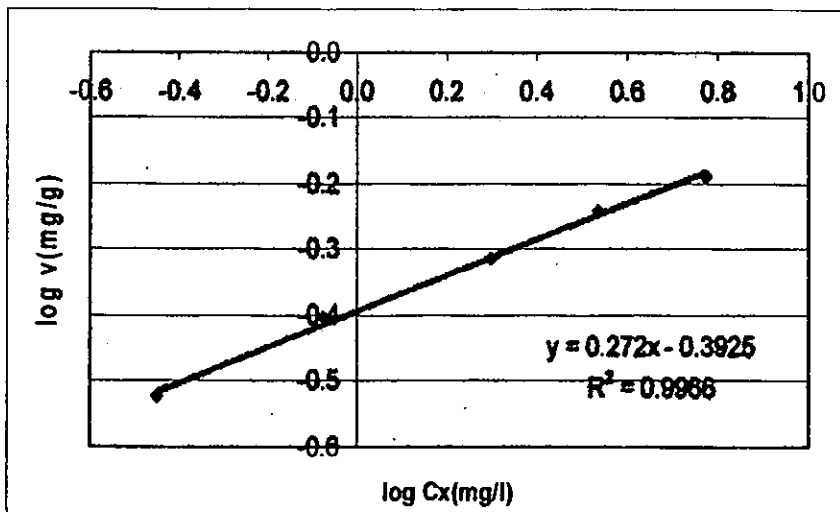
ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 เซลเซียส , pH 5



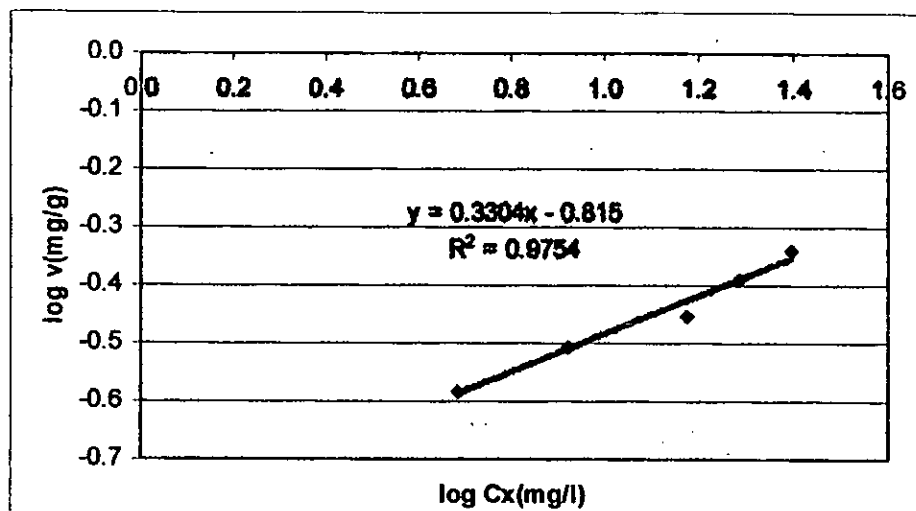
ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับโลหะแคดเมียมตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส , pH 5



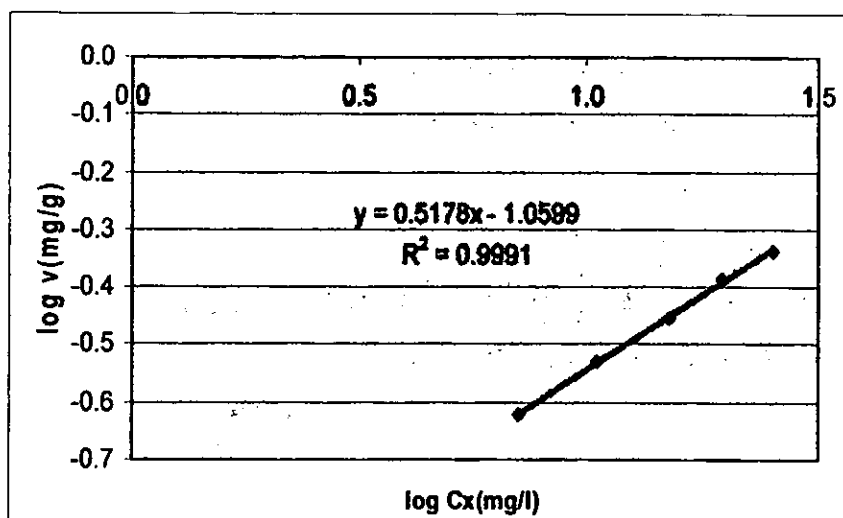
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_x/v กับ C_x ของการดูดซับไอออนโลหะ
สังกะสีตามทฤษฎี Langmuir Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ น้ำเสียสังเคราะห์
เท่ากับ 30 เซลเซียส , pH 5



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับไอออน
โลหะตะกั่ว ตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ
น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30เซลเซียส pH 5



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับโลหะแคดเมียมตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 เซลเซียส pH 5



ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log v$ กับ $\log C_x$ ของการดูดซับโลหะสังกะสี ตามทฤษฎี Freundlich Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 เซลเซียส pH 5

ค่าปริมาณไอออนโลหะหนักที่ดูดซับได้สูงสุด (v_m) และค่าคงที่การดูดซับ(K) สำหรับ Langmuir model และค่า n กับค่าคงที่การดูดซับ (K)สำหรับ Freundlich model และค่า Correlation indexes (R^2) สำหรับการดูดซับแบบจำลองทั้งสอง ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว (Pb)สังกะสี (Zn) และ แคดเมียม (Cd) โดยใช้เศษดินเผา สรุปไว้ในตาราง 8

ตาราง 8 ค่า v_m , ค่า n ค่า K และค่า R^2 ของการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยใช้เศษดินเผา

โลหะหนัก	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	$V_m(\text{mg/g})$	$K(\text{L/mg})$	R^2	n	$K(\text{g/mg})$	R^2
Pb	0.709	1.465	0.994	3.676	0.405	0.997
Cd	0.555	0.153	0.974	3.027	0.153	0.975
Zn	0.655	0.066	0.989	1.931	0.087	0.999

จากตารางที่ 8 จะพบว่าค่า Correlation indexes (R^2) ของ Langmuir model และ Freundlich model จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นแบบจำลองการดูดซับทั้ง 2 แบบเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้อธิบายการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยใช้เศษดินเผาได้ สำหรับแบบจำลองของ Langmuir ค่า V_m คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้สูงสุดต่อกรัมเศษดินเผาของโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี มีค่าดังนี้คือ 0.7085, 0.5549 และ 0.655 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมเศษดินเผา ตามลำดับและค่า K มีค่าดังนี้คือ 1.4647, 0.1526 และ 0.0662 ตามลำดับ

ส่วนแบบจำลองของ Freundlich สามารถอธิบายได้ด้วยค่า n คือค่าที่แสดงถึงการกระทำต่อกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ พบว่าค่า n ของโลหะตะกั่ว, โลหะแคดเมียม และโลหะสังกะสี มีค่าดังนี้คือ 2.6817, 3.0266 และ 1.9312 ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่การดูดซับ (K) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงดูดระหว่างไอออนโลหะหนักกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าค่า K มีค่าสูงแสดงว่าโลหะหนักตัวนั้นมีแรงดึงดูดสูง มีการดูดซับได้ดีและเข้าสู่สมดุลได้เร็ว จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าคงที่การดูดซับของโลหะตะกั่ว, โลหะแคดเมียม และโลหะสังกะสี มีค่าดังนี้คือ 0.2892, 0.1531 และ 0.0871 กรัมเศษดินเผา ต่อ มิลลิกรัม ตามลำดับ

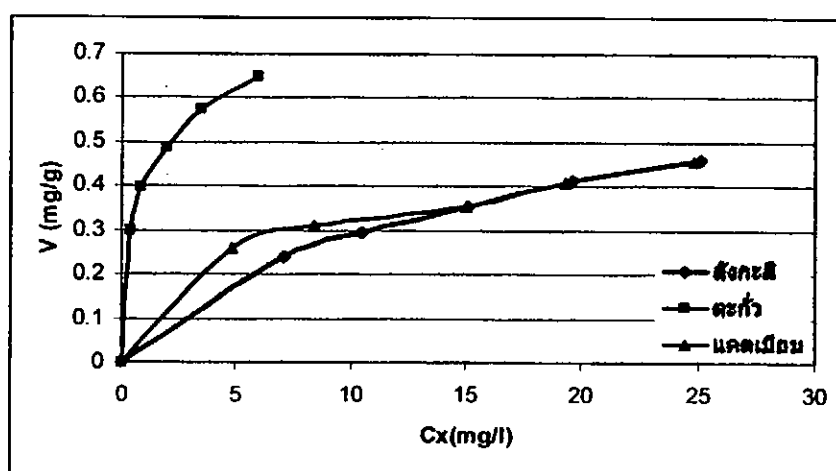
และจากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักของเศษดินเผา พบว่า ลำดับความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักของเศษดินเผา จะเรียงลำดับดังนี้ ตะกั่ว > แคดเมียม > สังกะสี จากการวิจัยของ Tobin และคณะพบว่า ความแตกต่างของการดูดซับไอออน

โลหะหนักมีความสัมพันธ์กับรัศมีไอออนโลหะหนัก โดยไอออนโลหะหนักที่มีขนาดใหญ่จะถูกดูดซับได้แข็งแรงกว่าไอออนโลหะหนักที่มีขนาดเล็ก ทำให้ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามรัศมีไอออนที่เพิ่มขึ้นของโลหะแต่ละชนิด

นอกจากนั้นการดูดซับไอออนโลหะจะมีความสัมพันธ์กับค่า Electronegativities โดยไอออนโลหะที่มีค่า electronegativities สูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าไอออนโลหะที่มี electronegativities ต่ำ จากคุณสมบัติของโลหะจะพบว่าค่า electronegativities ของโลหะตะกั่ว, โลหะแคดเมียม และโลหะสังกะสีมีค่าเท่ากับ 2.3, 1.7 และ 1.6 ตามลำดับ จึงทำให้โลหะตะกั่วถูกดูดซับได้มากที่สุด สำหรับโลหะแคดเมียม และโลหะสังกะสี มีค่า Electronegativities ที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ในการดูดซับโลหะแคดเมียมและโลหะสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกัน คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีสรุปไว้ในตาราง 9

ตาราง 9 คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี

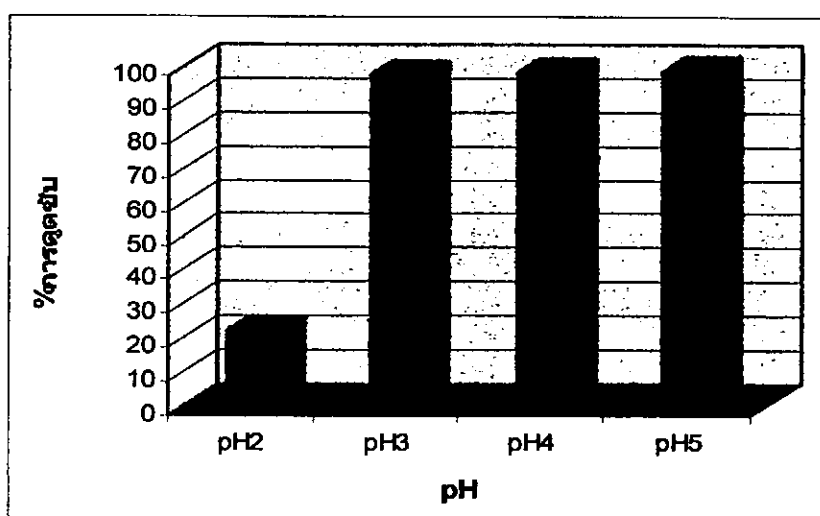
คุณสมบัติ	ชนิดของโลหะหนัก		
	Pb	Cd	Zn
Atomic Number (Z)	82	48	30
Oxidation Number	2 ⁺	2 ⁺	2 ⁺
Electronegativities	2.3	1.7	1.6
Ionic Radius (Å)	1.20	0.97	0.74



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ C_x ในการดูดซับไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์

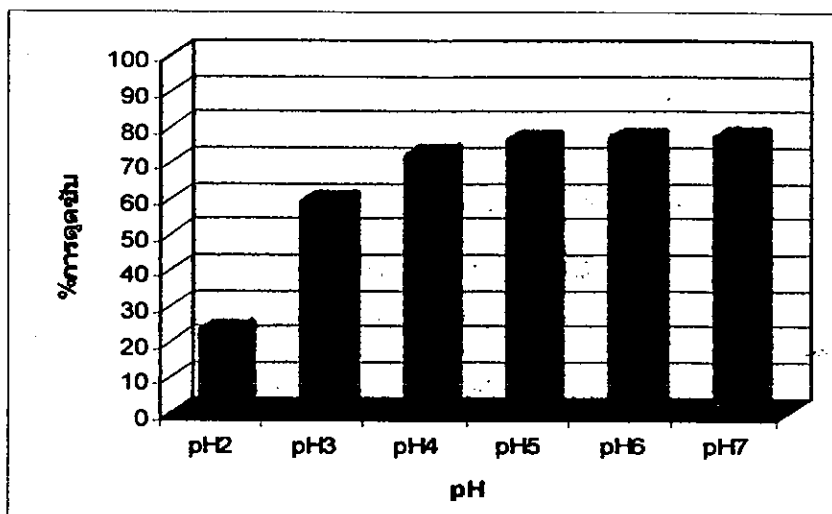
4.3 ศึกษาผลของกรด-ด่าง (pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

ในการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว , แคดเมียมและสังกะสีด้วยเศษดินเผาซึ่งที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 ทำการปรับสภาพพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักเพื่อใช้ในการศึกษาทั้งหมด 6 ค่า คือ ค่าพีเอชตั้งแต่ 2 - 7 โดยใช้เศษดินเผา ปริมาณ 5 กรัมเป็นตัวดูดซับ นำไปแช่อยู่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 300 นาทีโดยรูปที่ 31-33 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ช่วงพีเอชต่าง ๆ กัน เราสามารถหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)



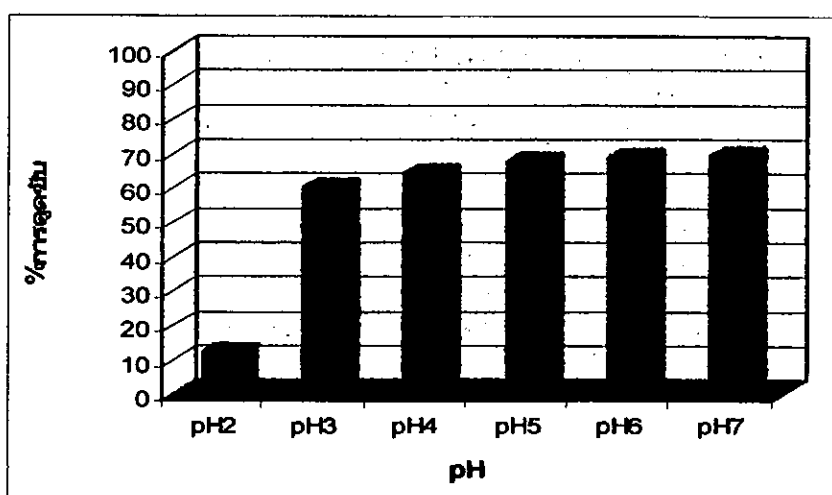
ภาพประกอบ 31 ผลของค่าพีเอชต่างๆของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะตะกั่วเมื่อใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร , ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 31 พบว่าที่ค่าพีเอช 5 เศษดินเผาสามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วได้มากที่สุดเท่ากับ 0.461 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเศษดินเผาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะตะกั่วเท่ากับ 98.78%



ภาพประกอบ 32 ผลของค่าพีเอชต่างๆของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมเมื่อ ใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 32 พบว่าที่ค่าพีเอช 7 เศษดินเผาสามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมได้มากที่สุดเท่ากับ 0.369 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมเศษดินเผาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมเท่ากับ 77.5 %



ภาพประกอบ 33 ผลของค่าพีเอชต่างๆของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะสังกะสีเมื่อ ใช้ เศษดินเผา 5.00 กรัมโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 33 พบว่าที่ค่าพีเอช 7 เศษดินเผาสามารถดูดซับไอออนโลหะสังกะสีได้มากที่สุดเท่ากับ 0.322 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมเศษดินเผาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะสังกะสีเท่ากับ 69.46 %

จากกราฟทั้ง 3 รูปจะพบว่า อัตราการดูดซับไอออนโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดคือตะกั่ว , แคดเมียมและสังกะสี ด้วยเศษดินเผาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการดูดซับสามารถอธิบายได้ว่าในน้ำเสียสังเคราะห์จะเกิดการแข่งขันกันระหว่าง H^+ กับไอออนโลหะหนัก และที่ค่าพีเอชต่ำๆ (2-3) จะมี H^+ อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นจำนวนมาก เมื่อความหนาแน่นของ H^+ มีค่ามาก ทำให้ H^+ มีโอกาสที่จะเข้าไปจับกับ active site ที่เป็นประจุลบของเศษดินเผาได้มากกว่า ไอออนของโลหะหนักทำให้อัตราการดูดซับไอออนโลหะหนักในช่วงพีเอช 2-3 มีค่าน้อย นอกจากนั้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชยังเป็นการลดประจุลบที่ผิวของผลึกในเศษดินเผา ซึ่งเกิดจาก ไฮดรอกไซด์ (hydrated oxide) อีกด้วย

ตาราง 10 แสดงแสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่ค่าพีเอชต่างๆ

pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ(%)		
	ตะกั่ว	แคดเมียม	สังกะสี
pH2	22.013	23.289	12.452
pH3	95.760	59.259	60.563
pH4	96.552	72.388	64.467
pH5	97.537	76.710	67.729
pH6	-	77.059	69.018
pH7	-	77.508	69.461

เมื่อพิจารณาหมู่ไฮดรอกซิล(OH)บริเวณขอบและผิวของโครงสร้างผลึกในเศษดินเผา พบว่า หมู่ไฮดรอกซิลจะเกาะยึดอยู่กับไอออนอลูมิเนียม(Al) เช่น $Al-OH$ ภายใต้สภาพความเป็นกรด อนุภาคเหล่านี้จะไม่มีประจุหรือมีประจุน้อยมาก แต่เมื่อพีเอชสูงขึ้นไฮโดรเจนจะแตกตัวออกมาจากหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้เกิดประจุลบขึ้นดังนี้

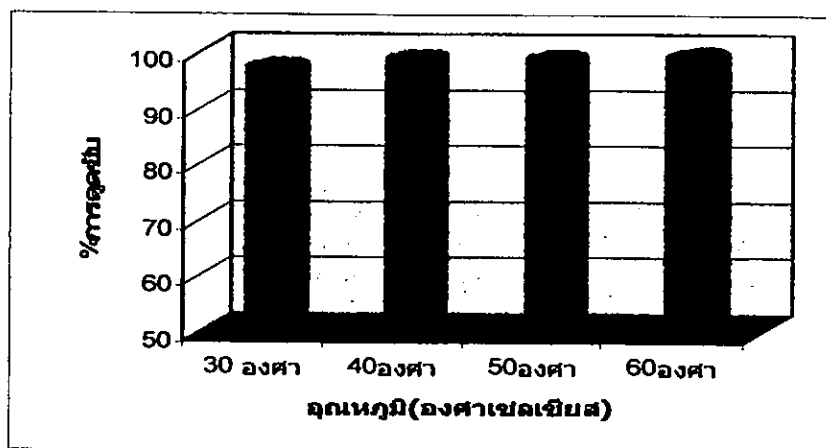


ดังนั้นในบางกรณี พื้นที่เดียวกันบนอนินทรีย์สาร อาจจะมีประจุลบเมื่อพีเอชสูง ไม่มีประจุเมื่อพีเอชเป็นกลาง หรือมีประจุเป็นบวกเมื่อพีเอชต่ำมากๆก็ได้ จากเหตุผลที่กล่าวมา เมื่อพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักสูงขึ้นทำให้ประจุที่ผิวของแบริดเหนียวเป็นลบมากขึ้น จึงสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักซึ่งมีประจุบวกได้มากกว่าเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักที่มีพีเอชต่ำ

เมื่อค่าpHมีการเปลี่ยนแปลง ค่าการดูดซับก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงด้วยอันเนื่องมาจากค่าประจุไฟฟ้าบนผิวตัวดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการข้างต้น ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันได้ว่าระบบการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นการดูดซับทางเคมี เพราะถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพนั้น การเปลี่ยนแปลงค่า pH จะไม่มีผลต่อการดูดซับ และจะไม่มีผลกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล(การเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวหน้า) ด้วย

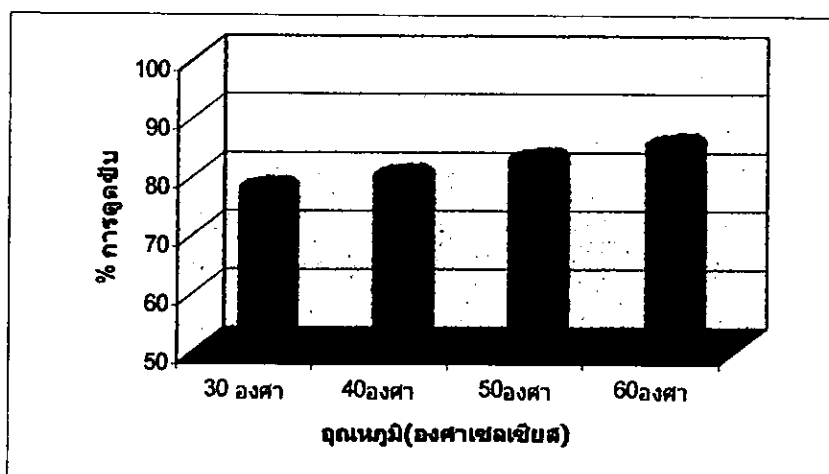
4.4 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

การทดลองในตอนนี้จะนำเศษดินเผาซึ่งที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 มาทำการดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว , แคดเมียม และสังกะสี โดยตามขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยนำตัวดูดซับปริมาณ 5 กรัมไปแช่ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 ,60°C ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ความเร็ว 180 รอบ/นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 300 นาที ที่ pH 5,7,7 สำหรับโลหะตะกั่ว,แคดเมียมและสังกะสีตามลำดับ และจากการทดลอง เราสามารถหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) และสามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับของไอออนโลหะหนักได้ ผลจากการทดลอง แสดงได้ดังภาพ



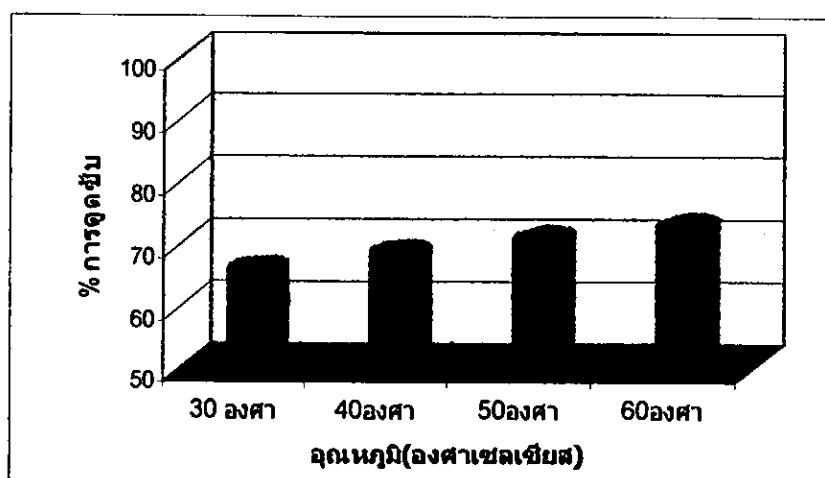
ภาพประกอบ 34 ผลของอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ,ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH 5

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยใช้ดินเผาจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่การดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมที่อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30, 40, 50 และ 60 เซลเซียส พบว่า เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดินเผาสามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วได้ 0.476 0.484, 0.484, 0.486 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมเศษดินเผาคิดเป็น 96.99, 98.5, 98.59, 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 35 ผลของอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมเมื่อใช้เศษ ดินเผา 5.00 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ,ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH 5

สำหรับการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมที่อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30, 40, 50 และ 60 เซลเซียส พบว่า เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดินเฝ้าสามารถดูดซับโลหะแคดเมียมได้ 0.395, 0.406, 0.421, 0.433 มิลลิกรัมแคดเมียม ต่อกรัมเศษดินเฝ้าคิดเป็น 77.35, 79.56, 82.58, 84.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 36 ผลของอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะสังกะสี เมื่อใช้เศษดินเฝ้า 5.00 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ,ปริมาตร 50 มิลลิลิตร , pH 5

และการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีที่อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30, 40, 50 และ 60 เซลเซียส พบว่า เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดินเฝ้าสามารถดูดซับโลหะสังกะสีได้ 0.323, 0.336, 0.347, 0.357 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมเศษดินเฝ้า คิดเป็น 65.79, 68.45, 70.67, 72.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตาราง 11 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว,แคดเมียมและสังกะสีที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิดโลหะหนัก	อุณหภูมิ			
	30°C	40°C	50°C	60°C
ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (%)	96.99	98.5	98.59	99
ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม (%)	77.35	79.56	82.58	84.99
ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี (%)	65.79	68.45	70.67	72.73

เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้น แสดงว่าการทดลองเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน (endothermic) แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ ตัวแปรอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic parameters) ได้แก่ค่า ΔG ค่า ΔH และค่า ΔS ซึ่งเป็นค่าที่แสดงแนวโน้มระบบของการดูดซับโลหะตะกั่ว, แคดเมียม และสังกะสีด้วยเศษดินเผาสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$K_d = \frac{V}{C_x}$$

$$\Delta G = -RT \ln K_d$$

$$\log K_d = \left(-\frac{\Delta H}{2.303R} \right) \frac{1}{T} + \frac{\Delta S}{2.303R}$$

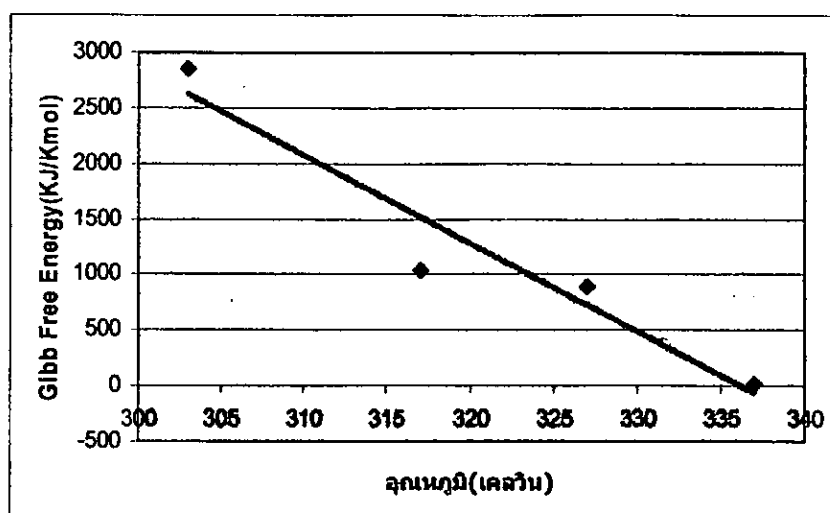
โดยที่ v คือ มิลลิกรัมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมวัสดุดูดซับ

C_x คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล

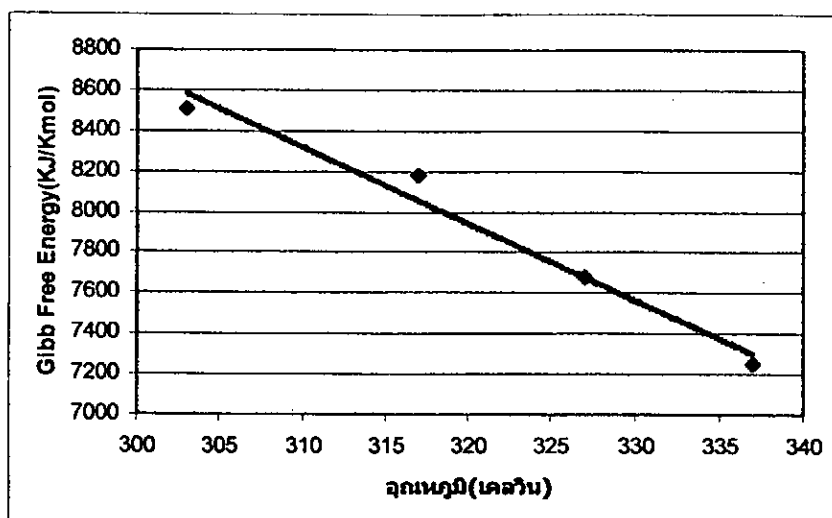
R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.3141 kJ/kmol.K)

ตาราง 12 แสดงค่า K_d และ ΔG ของโลหะตะกั่ว, แคดเมียม และสังกะสีที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 เซลเซียส

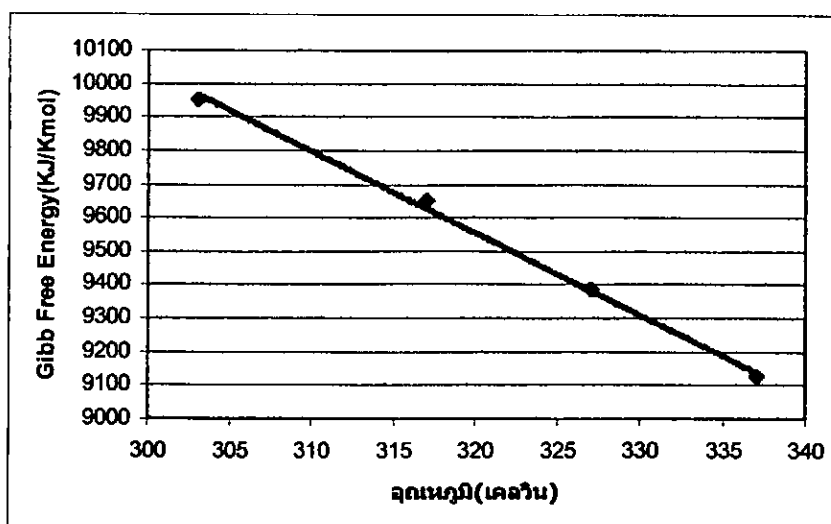
อุณหภูมิ		$K_d(L/g)$			$\Delta G (kJ/Kmol)$		
(°C)	(K)	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Zn^{2+}	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Zn^{2+}
30	303	0.323	0.034	0.019	2849.00	8507.28	9953.25
40	317	0.660	0.039	0.022	1045.65	8176.95	9649.52
50	327	0.702	0.047	0.024	893.00	7680.25	9385.73
60	337	0.995	0.056	0.027	11.53	7251.21	9128.80



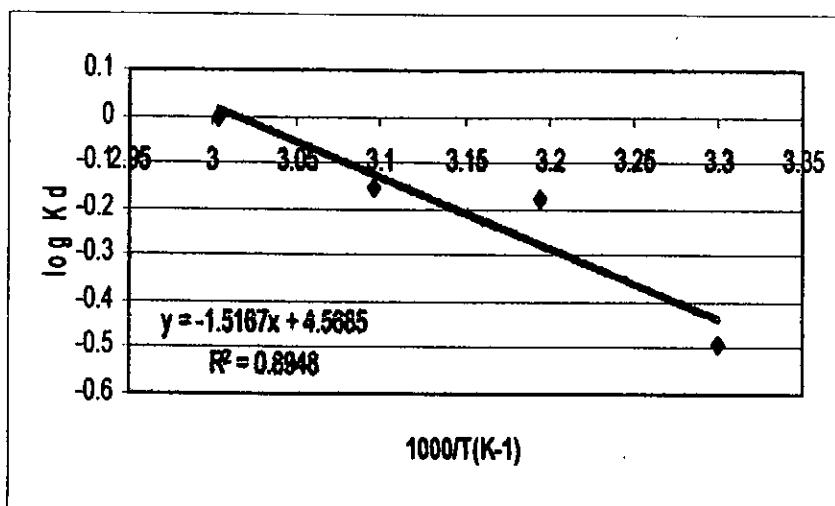
ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของโลหะตะกั่ว (Pb^{2+})



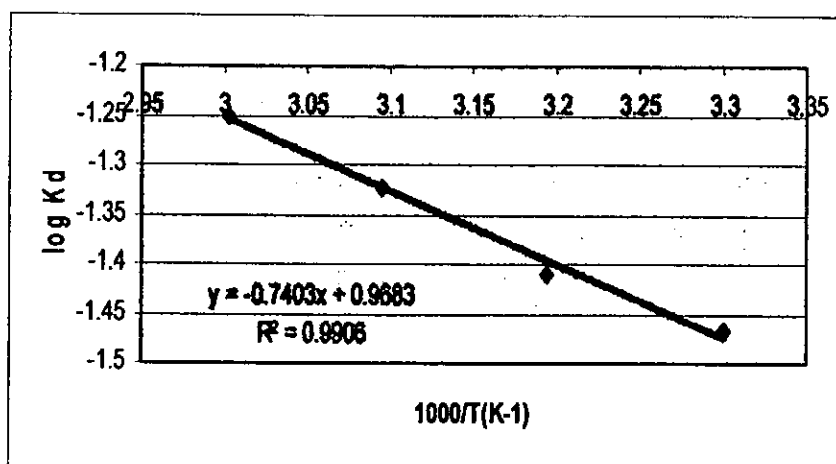
ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของโลหะ แคดเมียม (Cd^{2+})



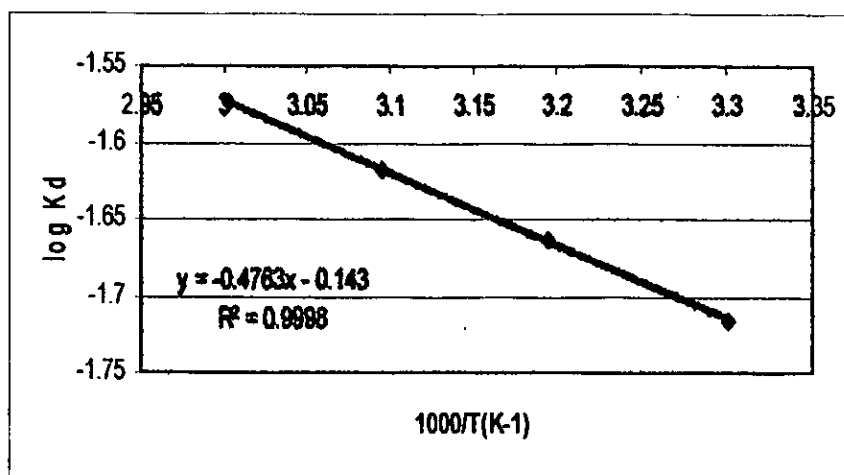
ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Gibb Free Energy กับอุณหภูมิของโลหะ สังกะสี (Zn^{2+})



ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะตะกั่ว (Pb^{2+})



ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะแคดเมียม (Cd^{2+})



ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_d$ กับอุณหภูมิของโลหะสังกะสี (Zn^{2+})

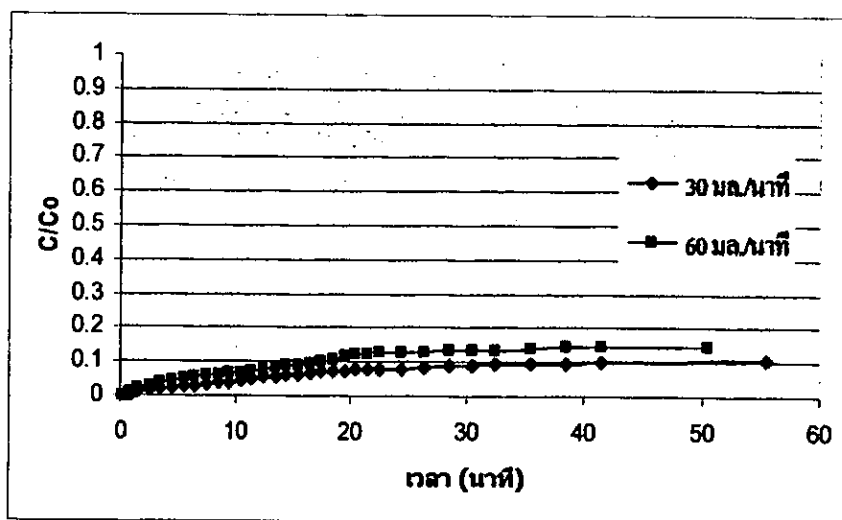
ตาราง 13 แสดงค่า ΔH และ ΔS ของโลหะตะกั่ว, แคดเมียม และสังกะสี

โลหะ	ΔH (kJ/kmol)	ΔS (J/molK)
Pb	29.041	87.473
Cd	14.174	18.540
Zn	9.119	2.738

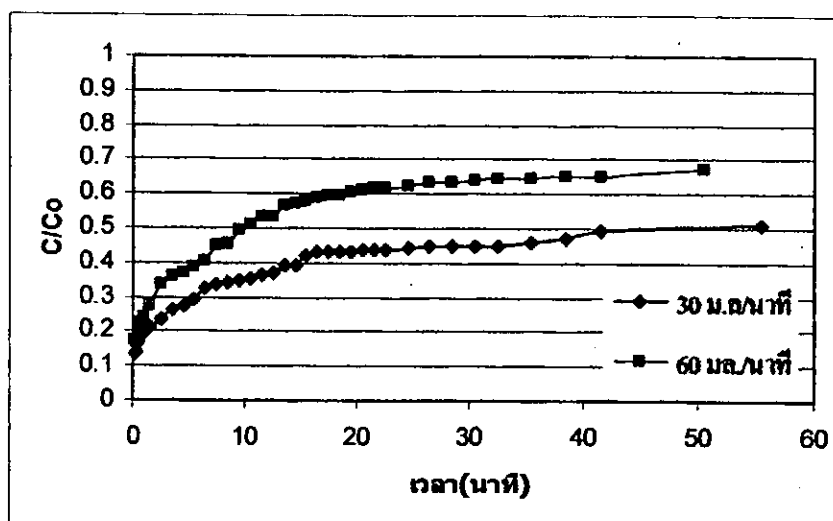
สำหรับค่า ΔG นั้น เราทำการคำนวณหา ค่า ΔG ทุกๆอุณหภูมิที่เราทำการศึกษาเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง โดยจากการทดลองและคำนวณค่า ΔG จากสมการข้างต้นพบว่าค่า ΔG จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบการดูดซับนี้สามารถเกิดได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในส่วนของค่า ΔH นั้น เมื่อค่า ΔH มีค่ามาก แสดงว่าพลังงานที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวพันธะมีค่ามาก โดยจากการทดลองจะพบว่าโลหะตะกั่วจะมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวกับตัวดูดซับมากที่สุดรองลงไปก็คือโลหะแคดเมียมและสังกะสีตามลำดับ และค่า ΔS เป็นค่าที่แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของการดูดซับ และระบบสามารถเกิดขึ้นเองได้ จากการทดลอง พบว่าโลหะตะกั่วเมื่อค่า ΔS มากที่สุดรองลงไปก็คือโลหะแคดเมียม และสังกะสีตามลำดับ

4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง(Continued flow) ด้วยคอลัมน์ดูดซับ (adsorption column)

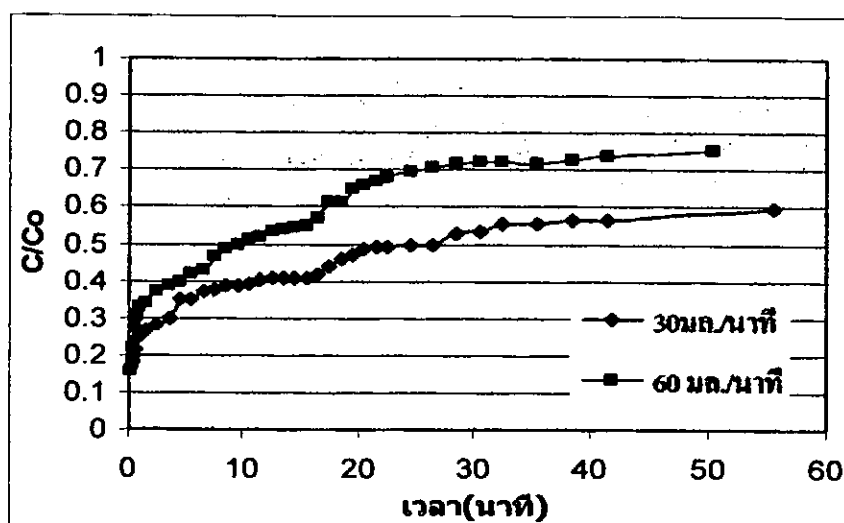
ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี โดยใช้คอลัมน์ดูดซับซึ่งภายในคอลัมน์บรรจุเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 มาทำการทดลอง เนื่องจากเวลาทำการบดและคัดแยกขนาดนั้น ปริมาณเศษดินเผาที่ได้จะมีมากกว่าเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง mesh no. 8 - 16 โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของเศษดินเผาทั้ง 2 ขนาดแตกต่างกันน้อยมาก ปริมาณเศษดินเผาที่ใช้มีค่าเท่ากับ 105 กรัม และอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 2 ค่า คือ 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชที่ใช้สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะตะกั่ว,แคดเมียม และสังกะสีมีค่าเท่ากับ 5, 7 และ 7 ซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 4 ตามลำดับ การป้อนน้ำเสียเป็นแบบไหลขึ้น (Up flow) การเก็บตัวอย่าง น้ำเสียจะเก็บที่ทางน้ำออกด้านบน แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(Atomic Absorption Spectrophotometer) และสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้ โดยผลจากการทดลองแสดงได้ดังรูป และตาราง



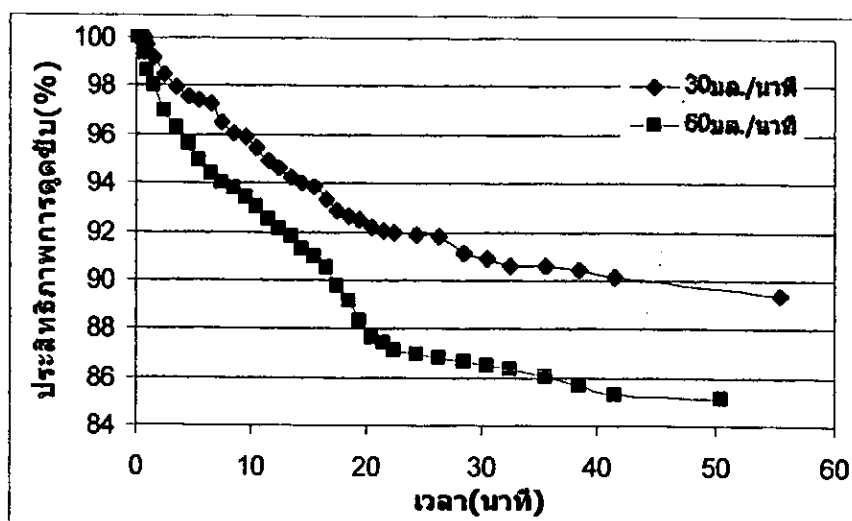
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากหลอดดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 5



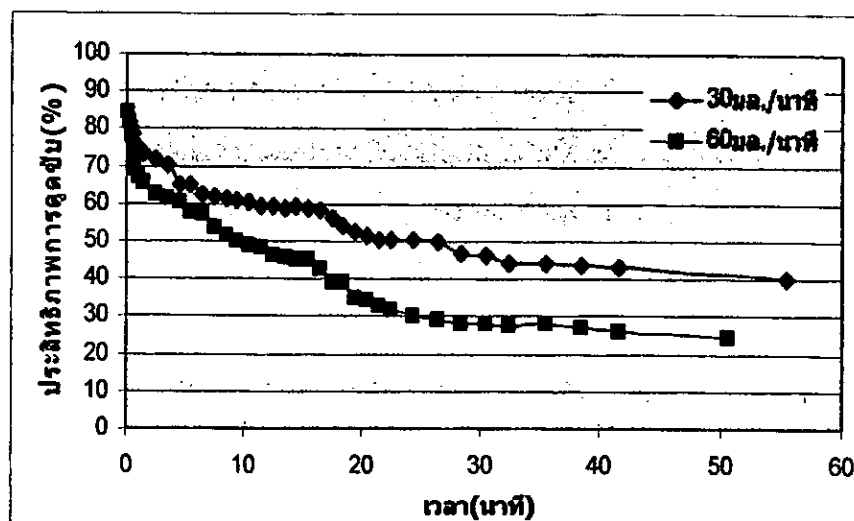
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากหลอดดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7



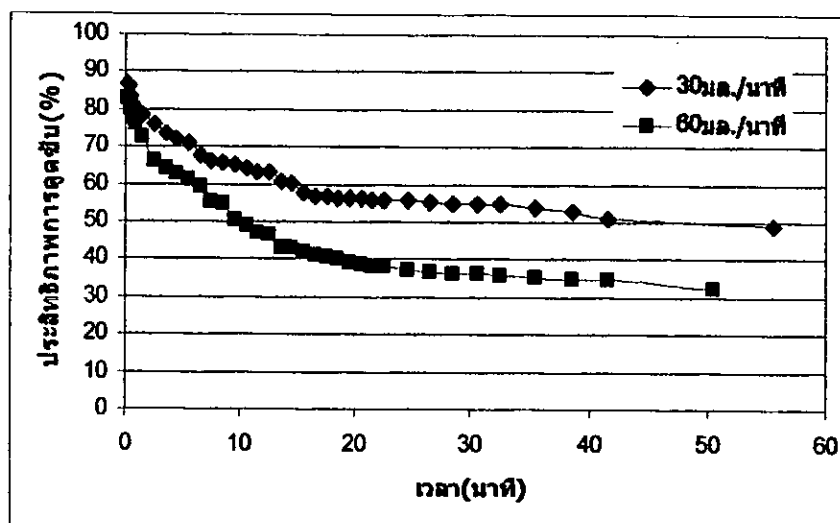
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากหลอดดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้
 หอดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที
 น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 5



ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้
 หอดูดซับ โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตร
 ต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงปริมาณไอออนโลหะสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากหลอดดูด โดยเศษดินเผาปริมาณ 150 กรัม ใช้อัตราการไหล 30 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH = 7

ภาพประกอบ 43-45 เป็นการทดลองที่ใช้อัตราการไหลที่ 60 มิลลิลิตร/นาที สำหรับโลหะตะกั่วจะพบว่าในช่วง 0.63 นาทีแรกของการทดลอง ปริมาณไอออนโลหะตะกั่วในน้ำที่ออกมาจากคอลัมน์ดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ต่อลิตร ซึ่งหมายความว่าเศษดินเผาสามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วได้ทั้งหมด คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วจะลดลง โดยสังเกตจากการที่มีปริมาณไอออนโลหะตะกั่ว ผ่านออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดมากขึ้น จนทำให้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณไอออนโลหะตะกั่วเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ว่า ปริมาณโลหะตะกั่วต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ในส่วนของโลหะแคดเมียมและสังกะสีนั้น จะมีลักษณะของการดูดซับที่คล้ายกัน โดยใน 0.13 นาที ซึ่งเป็นเวลาเริ่มต้นของการบำบัด ปริมาณไอออนโลหะแคดเมียมและสังกะสีที่ออกมา มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้สำหรับโลหะแคดเมียมและสังกะสี ว่าต้องมีค่าไม่เกิน 0.03 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

และเนื่องจากอัตราการไหลที่ 60 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ยังมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ถูกกำหนดไว้ จึงได้ทำการปรับอัตราการไหลลงโดยทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ 30 มิลลิลิตร/นาที จากภาพประกอบ 43 - 45 สำหรับโลหะตะกั่วจะพบว่าในช่วง 0.79

นาที่ หลังจากลดความเร็วในการไหลลง ปริมาณไอออนโลหะตะกั่วในน้ำที่ออกมาจากคอลัมน์ดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ต่อลิตรทั้งหมด คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ในส่วน of โลหะแคดเมียมและสังกะสีนั้น จะมีลักษณะของการดูดซับที่คล้ายกัน โดยใน 0.13 นาที ซึ่งเป็นเวลาเริ่มต้นของการบำบัดปริมาณโลหะแคดเมียมและสังกะสีที่ออกมาก็ยังมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม ที่กำหนดไว้

ดังนั้นเราจึงพยายามที่จะคำนวณหาอัตราการไหลและขนาดของคอลัมน์ให้เหมาะสมกับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่ใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยจากการทดลองแบบ batch พบว่าที่เวลาการดูดซับในช่วงแรก(นาทีที่1) อัตราเร็วในการดูดซับ(dc/dt) ของโลหะตะกั่ว , แคดเมียมและสังกะสี มีค่าเท่ากับ 13.81, 13.46, 4 มิลลิกรัม/ลิตร . นาที

ซึ่งหมายความว่า ในเวลา 1 นาที เศษดินเผาต้องดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 13.81, 13.46, 4 มิลลิกรัม/ลิตร. นาที จึงจะเทียบเท่าการดูดซับที่สมดุล แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เราใช้ในการทดลองคือ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้ทราบว่าเป็นจริงต้องใช้เวลา $\frac{50}{13.81} = 3.62$ นาที, $\frac{50}{13.46} = 3.71$ นาที, $\frac{50}{4} = 12.5$ นาทีในการที่จะดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ให้เท่ากับความเข้มข้นที่สมดุล ดังนั้นเมื่อนำผลการทดลองแบบ batch มาเปรียบเทียบกับ การทดลองแบบคอลัมน์ที่มีการใช้อัตราการไหลต่างๆจึงสามารถสรุปได้ว่าการที่สามารถตรึงจับไอออนโลหะหนักได้ในช่วงเวลา 1 นาทีแรกเป็นผลมาจากการทดลองใช้เวลาในการดูดซับน้อยเกินไป ดังนั้นเมื่อต้องใช้เวลา 3.62, 3.71, 12.5 นาทีในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร จากสูตร

$$\frac{\text{volume} \cdot x \cdot \varepsilon}{\text{Flowrate}} = \text{time}$$

$$\varepsilon = \text{ปริมาตรช่องว่างใน column} / \text{ปริมาตร column}$$

เราสามารถคำนวณหาปริมาตรคอลัมน์ที่ต้องใช้ในการดูดซับ เมื่อรู้ค่าอัตราการไหล และเวลาได้หรือสามารถคำนวณหาอัตราการไหลเมื่อรู้ปริมาตรคอลัมน์กับเวลาได้เช่นเดียวกัน จากการทดลองเมื่อกำหนดให้ปริมาตรคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 138 มิลลิลิตร และ ε มีค่าเท่ากับ 0.65 เราจึงคำนวณหาว่าอัตราการไหลที่ต้องใช้ในการดูดซับโลหะโลหะตะกั่ว, แคดเมียมและสังกะสีที่เหมาะสมคือ

$$\frac{(138)(0.6)}{3.62} = 22.873, \quad \frac{(138)(0.6)}{3.71} = 22.318, \quad \frac{(138)(0.6)}{12.5} = 6.624 \text{ มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ}$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองพบว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ด้วยเศษดินเผาที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ(เศษชิ้นงานเผาดิบ)ที่ได้จากโรงงานที่ผ่านการบดและทำการคัดขนาดจนได้อนุภาคอยู่ในช่วง mesh no.4 - 8 และ mesh no.8 -16 มีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันมากเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง

โดยแท้จริงแล้วการดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ผิว แต่จากการทดลองนั้นเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวดูดซับแล้ว ความสามารถในการดูดซับมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งอาจเนื่องมาจากเกิดความต้านทานที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มที่อยู่โดยรอบของตัวดูดซับ จึงอาจทำการออกแบบการทดลองได้โดยการปรับความเร็วรอบในการเขย่าให้เพิ่มขึ้น แล้วเปรียบเทียบค่าการดูดซับ เนื่องจากการปรับค่าความเร็วรอบนั้นเป็นการเพิ่มค่า Mass transfer coefficient จากสมการ

$$K_c = \frac{D_{AB}}{D_p} N_{sh}$$

$$N_{sh} = 2 + .95 N_{Re}^{0.5} N_{Sc}^{1/3} \quad \text{เมื่อ } N_{Re} \text{ มีค่าอยู่ในช่วง } 2 - 2000$$

$$N_{sh} = 0.347 N_{Re}^{0.62} N_{Sc}^{1/3} \quad \text{เมื่อ } N_{Re} \text{ มีค่าอยู่ในช่วง } 2000 - 17000$$

$$\text{โดย } N_{Re} = \frac{\rho D_p v}{\mu}$$

K_c = Mass transfer coefficient

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลาง(เมตร)

D_{AB} = ค่าคงที่การแพร่(Diffusivity)(ตารางเมตร/นาที่)

N_{Re} = ค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์(Reynolds number)

μ = ค่าความหนืด(กิโลกรัม/ เมตร.นาที่)

v = ความเร็วในการกวน (รอบ/ นาที่)

ρ = ค่าความหนาแน่น(กิโลกรัม/ลบ.เมตร)

(Christie J. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, University of Minnesota)

จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า Mass transfer coefficient ที่ได้จากการคำนวณเมื่อปรับความเร็วในการกวนของตัวดูดซับแต่ละขนาด ถ้าค่า Mass transfer coefficient ที่ได้จากการปรับความเร็วในการกวนเมื่อใช้ตัวดูดซับขนาดเดียวกันมีค่าเท่ากันแสดงว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มไม่มีผลต่อการดูดซับ

2. การดูดซับไอออนโลหะหนักทุกชนิดที่ทำการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir และ Freundlich ซึ่งเห็นได้จากค่า Correlation indexes (R^2) ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 และจากค่า V_m ซึ่งเป็นค่าความจุการดูดซับสูงสุด ที่ได้จากสมการ Langmuir ของโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.7085, 0.5549 และ 0.655 (มิลลิกรัม/กรัม) ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อมีการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นเช่น โคลนแดงและเปลือกถั่วฮาเซลนัท ซึ่งมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการดูดซับแคดเมียมเท่ากับ 13.038 และ 5.395 มิลลิกรัม/กรัม และสังกะสีเท่ากับ 14.512 และ 1.76 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

3. การทดลองการดูดซับโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชหลายๆค่า ทำให้ทราบถึงแนวโน้มการดูดซับว่า เศษดินเผามีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะ ของตะกั่ว , แคดเมียมและสังกะสี มีค่าสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 , 7 และ 7 ตามลำดับ คิดเป็น 98.78 , 77.5 , 69.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนั้นการที่ค่าการดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่า pH เปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการที่ประจุไฟฟ้าบนผิวตัวดูดซับมีการเปลี่ยนแปลง เป็นเครื่องยืนยันได้ว่าระบบการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นการดูดซับทางเคมี

4. จากการนำดินเผา มาทำการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลายที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 เซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นเศษดินเผาจะดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น ดังเช่นการทดลองของ Omer Yavuz และคณะ[8] ที่ได้ทำการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยใช้แร่ Kaolinite แสดงให้เห็นว่าการทดลองเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งจากการคำนวณค่า ΔG ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ΔG จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้เศษดินเผาดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าระบบการดูดซับนี้เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน และจากค่า ΔH พบว่าโลหะตะกั่วมีค่า ΔH มากที่สุดจึงมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวกับตัวดูดซับมากที่สุดรองลงไปก็คือโลหะแคดเมียมและสังกะสีตามลำดับ

5. จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการผ่านเข้าออกของไอออนโลหะหนักเร็วมาก ส่วนอัตราการไหลที่มีค่าต่ำจะทำให้เกิดการผ่านเข้าออกของสารปนเปื้อนช้า ทำให้เศษดินเผาสามารถดูดซับได้นานขึ้น ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการดูดซับได้สูงสุด โดยสังเกตจากรูปที่เวลาเดียวกันของโลหะแต่ละชนิดจะพบว่ากราฟมีลักษณะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ทำให้มีไอออนโลหะหนักออกมามากที่เวลาใดๆ แต่อย่างไรก็ตามน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดแล้วก็ยังมีปริมาณโลหะหนักเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ จึงไม่สามารถนำไปทำการ scale up ได้ ดังนั้นอาจจะต้องมีการปรับปรุงโดยการปรับอัตราการไหลให้มีค่าน้อยลง หรือปรับความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจากจุดประสงค์ของการทดลองนั้น การใช้เศษดินเผามาทำการดูดซับไอออนของโลหะหนักเป็นการบำบัดเบื้องต้น เพื่อให้ปริมาณไอออนลดลง ก่อนที่จะนำไปทำการบำบัดด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพต่อไป ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และลดค่าใช้จ่ายได้

6. การที่จะสรุปว่าการดูดซับของระบบใดๆนั้นเป็นการดูดซับทางเคมีนั้นจะต้องประกอบไปด้วยส่วนประกอบย่อยๆดังนี้คือ

6.1 ระบบการดูดซับจะต้องมีความสัมพันธ์ที่ดีกับสมการ Langmuir

6.2 ระบบการดูดซับจะต้องเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

6.3 ประจุที่ผิวหน้าตัวดูดซับจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่า pH มีการเปลี่ยนแปลง

6.4 ปฏิกิริยาการดูดซับไม่สามารถย้อนกลับได้

และจากการทดลองที่ได้เราจึงสรุปได้ว่าการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผาเป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับส่วนประกอบย่อยๆที่สามารถบ่งชี้ได้ว่าการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี แต่เพื่อเป็นการยืนยันว่าการดูดซับโลหะหนักด้วยเศษดินเผาเป็นการดูดซับทางเคมีอีกทางหนึ่ง อาจทำการทดลองโดยการทดสอบการดูดซับที่อุณหภูมิค่าหนึ่งแล้วทำการลดอุณหภูมิการดูดซับลงมา แล้วสังเกตว่าการดูดซับนั้นมีการคายโลหะหนักออกมาเมื่อมีการลดอุณหภูมิหรือไม่ โดยถ้าระบบเป็นการดูดซับทางเคมี การคายของโลหะหนักจะไม่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- (1) ขวัญชัย งามวงศ์, เมธี ชลไมตรี และสุนทรี เพ็ญฟู, 2541 , การดูดซับโลหะหนักด้วยวัสดุชีวมวล
ขึ้นรูปด้วยดินเหนียว,วิทยานิพนธ์ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรม
เคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า132
- (2) ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพ็ชร,2543,การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง ,
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและ
วัสดุ ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- (3) M. Prasad, S.Saxena, and S.S. Amritphale, Adsorption models for sorption of lead
and zinc on francolite mineral, Ind. Eng.Chem. Res.2002 41 , 105-111.
- (4) Giuseppe cimino, Amedeo passerni and Giovanin toscano, Removal of toxic cations and
Cr(VI) from aqueous solution by hazelnut shell, Water Res. Val
34 ,No.11 ,pp.2955- 2962 , 2000.
- (5) K. Vinod. Gupta and Saurabh sharma , Removal of Cadmium and Zinc from aqueous
solutions by Red Mud, Environmental. Sci. Technology. 2002,36,3612-3617.
- (6) A. Mellah And S. Chegrouche , The removal of Zinc from aqueous solutions by natural
bentonite ,Water Research Val.31 ,No.30 ,pp. 621-629 ,1997.
- (7) Su-Hsia lin , Ruey- Shin Juang ,Heavy metal removal from water by sorption using
surfactant-modified montmorillonite , Journal of hazardous materials B92 (2002)
315-326 .
- (8) Omer Yavuz , Yalcin Altunkaynak , Fuat Guzel ,Removal of Copper ,Nickel , Cobalt and
Manganese from aqueous solution by kaolinite ,Water Research 37 (2003) 948-
952 .
- (9) Mohammad Ajmal , Rifaqat A.K. Rao , Rais Ahmad , Jameel Ahmad , Liaqat A.K.
Rao,Removal and recovery of heavy metals from electroplating wastewater by
using Kyanite as an adsorbent, , Journal of hazardous materials B87 (2001)
127-137 .
- (10) G.Suraj , C.S.P. Iyer , Lalithambika , Adsorption of cadmium and copper by modified
kaolinite, Applied Clay Science13 (1998) 293-306.

- (11) T. Vengris, R.Binkiene,A.Sveikauskaite, Nickel, copper and zinc removal from waste water by a modified clay sorbent ,Applied Clay Science 18(2001) 183-190 .
- (12) Ho, Y.S. and Mckey , G.,1999, " The Sorption of Lead (II) ions on Peat" , Wat.Res., vol.33, no.2 , pp. 578-584.
- (13) Christie J. Geankoplis,Transport Processes and Unit Operations, University of Minnesota,pp. 445-446

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่ว (Pb) ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส

4 mesh -8 mesh					8 mesh - 16 mesh				
เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)				เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย		1	2	3	เฉลี่ย
0	49.550	50.450	52.252	50.751	0	49.550	51.351	52.252	51.051
2	22.523	22.523	24.324	23.123	2	21.622	22.523	23.423	22.523
5	16.216	16.216	18.919	17.117	5	14.414	15.315	18.018	15.916
10	9.009	8.018	8.378	8.468	10	9.910	7.838	8.288	8.679
15	4.234	4.595	4.414	4.414	15	4.324	4.505	4.324	4.384
30	3.063	3.243	3.423	3.243	30	3.153	3.153	3.243	3.183
60	2.162	2.072	2.252	2.162	60	1.982	1.892	2.072	1.982
90	1.892	1.892	2.072	1.952	90	1.802	1.802	1.892	1.832
120	1.441	1.351	1.351	1.381	120	1.261	1.351	1.171	1.261
180	1.441	1.351	1.351	1.381	180	1.261	1.171	1.351	1.261
240	1.351	1.261	1.441	1.351	240	1.171	1.171	1.351	1.231
300	1.351	1.261	1.441	1.351	300	1.351	1.171	1.261	1.261

ตาราง 15 แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (Pb) เมื่อการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

ความเข้มข้น (mg/l)	ก่อนการดูดซับ (mg/l)	ความเข้มข้นที่สมดุล(mg/l)			
		1	2	3	เฉลี่ย
30	30.364	0.455	0.304	0.304	0.354
40	40.486	0.709	0.911	0.911	0.844
50	50.607	2.024	2.024	1.898	1.982
60	60.729	3.188	3.644	3.492	3.441
70	70.850	5.845	6.022	6.022	5.963

ตาราง 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียม (cd) ของ
 เศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของ
 สารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส

4 mesh -8 mesh					8 mesh - 16 mesh				
เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)				เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย		1	2	3	เฉลี่ย
0	50.093	49.474	48.856	49.474	0	50.093	49.784	48.856	49.577
2	22.758	23.377	23.129	23.088	2	20.408	24.366	23.748	22.841
5	18.182	18.429	18.677	18.429	5	16.574	18.924	19.171	18.223
10	16.450	16.017	16.141	16.203	10	16.883	16.141	16.327	16.450
15	12.369	13.049	14.224	13.214	15	13.296	14.719	14.842	14.286
30	11.750	11.812	11.750	11.771	30	11.688	12.369	11.998	12.018
60	11.255	11.194	11.565	11.338	60	11.255	11.750	11.441	11.482
90	11.194	11.194	11.255	11.214	90	10.823	10.761	11.008	10.864
120	11.317	11.255	11.379	11.317	120	10.761	10.884	10.946	10.864
180	11.194	11.255	11.317	11.255	180	10.946	10.823	10.884	10.884
240	11.132	11.317	11.255	11.235	240	10.823	10.884	10.823	10.843
300	11.132	11.194	11.317	11.214	300	10.823	10.823	10.884	10.843

ตาราง 17 แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (cd) เมื่อการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลที่
 อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

ความ เข้มข้น (mg/l)	ก่อนการ ดูดซับ (mg/l)	ความเข้มข้นที่สมดุล(mg/l)			
		1	2	3	เฉลี่ย
30	30.980	4.890	4.719	4.976	4.861
40	39.581	8.493	8.321	8.373	8.396
50	50.308	15.014	14.927	15.014	14.985
60	60.203	19.355	19.149	19.458	19.321
70	70.592	24.863	24.862	24.743	24.823

ตาราง 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความสามารถในการดูดซับโลหะสังกะสี (Zn) ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh และ 8 mesh - 16 mesh ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส

4 mesh -8 mesh					8 mesh - 16 mesh				
เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)				เวลา	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย		1	2	3	เฉลี่ย
0	51.265	50.616	50.616	50.833	0	51.702	51.047	51.047	51.265
2	43.478	43.154	41.856	42.829	2	42.212	41.885	40.576	41.558
5	40.234	40.234	41.531	40.666	5	38.940	38.940	40.249	39.376
10	28.553	27.904	26.931	27.796	10	27.160	26.505	25.524	26.396
15	24.659	25.633	26.282	25.525	15	23.233	24.215	24.869	24.106
30	22.713	22.064	22.064	22.280	30	21.270	20.615	20.615	20.833
60	20.441	19.792	20.766	20.333	60	18.979	18.325	19.306	18.870
90	18.494	18.494	20.117	19.035	90	17.016	17.016	18.652	17.561
120	17.521	17.197	18.170	17.629	120	17.016	16.361	16.688	16.688
180	18.170	16.548	17.197	17.305	180	16.034	15.707	16.361	16.034
240	17.846	16.872	16.872	17.197	240	15.707	16.034	16.034	15.925
300	16.872	16.872	17.846	17.197	300	16.034	15.707	16.034	15.925

ตาราง 19 แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (Zn) เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

ความเข้มข้น	ก่อนการดูดซับ	ความเข้มข้นที่สมดุล(mg/l)			
		1	2	3	เฉลี่ย
(mg/l)	(mg/l)				
30	30.933	7.047	7.138	7.001	7.062
40	40.268	10.616	10.494	10.372	10.494
50	50.488	14.948	15.177	15.024	15.050
60	60.952	19.585	19.768	19.494	19.616
70	71.324	27.198	28.198	26.985	27.460

ตาราง 20 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับตะกั่ว (Pb) โดยใช้ดินเผา ที่
อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคใน
ช่วง 4 mesh - 8 mesh

ความเข้มข้น	v	C_x	C_x/v	$\log C_x$	$\log v$
เริ่มต้น(มก. /ลิตร)	(มก. /กรัม)	(มก. /ลิตร)	(กรัม /ลิตร)		
30	0.300	0.354	1.181	-0.451	-0.523
40	0.396	0.844	2.128	-0.074	-0.402
50	0.486	1.982	4.076	0.297	-0.313
60	0.573	3.441	6.007	0.537	-0.242
70	0.649	5.963	9.189	0.775	-0.188

ตาราง 21 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับแคดเมียม(cd)โดยใช้ดินเผา
ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียสของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง
4 mesh -8 mesh

ความเข้มข้น	v	C_x	C_x/v	$\log C_x$	$\log v$
เริ่มต้น(มก. /ลิตร)	(มก. /กรัม)	(มก. /ลิตร)	(กรัม /ลิตร)		
30	0.261	4.861	18.610	0.687	-0.583
40	0.312	8.396	26.928	0.924	-0.506
50	0.353	14.985	42.426	1.176	-0.452
60	0.409	19.321	47.263	1.286	-0.388
70	0.458	24.823	54.234	1.395	-0.339

ตาราง 22 แสดงค่า v , C_x , C_x/v , $\log v$ และ $\log C_x$ ของการดูดซับสังกะสี (Zn) โดยใช้ดินเผา ที่
อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 เซลเซียส ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง
4 mesh -8 mesh

ความเข้มข้น	v	C_x	C_x/v	$\log C_x$	$\log v$
เริ่มต้น(มก. /ลิตร)	(มก. /กรัม)	(มก. /ลิตร)	(กรัม /ลิตร)		
30	0.239	7.062	29.583	0.849	-0.622
40	0.296	10.494	35.420	1.021	-0.528
50	0.353	15.050	42.690	1.178	-0.453
60	0.411	18.616	45.280	1.270	-0.386
70	0.439	26.127	59.569	1.417	-0.358

ตาราง 23 ค่า v_m , ค่า n , ค่า K และค่า R^2 ของการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยใช้เศษดินเผา

โลหะหนัก	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	$V_m(\text{mg/g})$	$K(\text{L/mg})$	R^2	n	$K(\text{g/mg})$	R^2
Pb	0.709	1.465	0.994	3.676	0.405	0.997
Cd	0.555	0.153	0.974	3.027	0.153	0.975
Zn	0.655	0.066	0.989	1.931	0.087	0.999

ตาราง 24 แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (Pb) ที่ค่า pH ต่างๆ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส
ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

pH	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
pH2	47.586	48.736	49.885	48.736	38.161	37.241	38.621	38.008
pH3	48.506	48.046	47.126	47.893	2.000	1.931	2.161	2.031
pH4	48.506	48.966	49.195	48.889	1.793	1.678	1.586	1.686
pH5	47.816	46.897	46.207	46.973	1.103	1.241	1.126	1.157

ตาราง 25 แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (Cd) ที่ค่า pH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส
ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

pH	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
pH2	49.241	49.675	50.108	49.675	38.178	37.961	38.178	38.106
pH3	48.373	49.024	49.024	48.807	20.607	19.306	19.740	19.884
pH4	48.807	47.939	48.590	48.445	15.835	13.232	11.063	13.377
pH5	49.241	50.108	49.675	49.675	10.195	12.148	12.364	11.569
pH6	48.807	48.807	49.892	49.168	10.412	11.497	11.931	11.280
pH7	47.072	47.289	48.373	47.578	9.978	10.195	11.931	10.701

ตาราง 26 แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (Zn) ที่ค่า pH ต่างๆ ที่ อุณหภูมิ 30 เซลเซียส
ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

pH	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
pH2	48.418	48.002	48.418	48.280	41.759	42.175	42.869	42.268
pH3	48.696	49.251	49.806	49.251	19.284	19.839	19.145	19.423
pH4	49.112	48.835	49.251	49.066	17.897	17.064	17.342	17.434
pH5	48.973	49.390	49.528	49.297	15.677	16.232	15.816	15.908
pH6	48.696	48.418	48.418	48.511	14.151	15.816	15.122	15.030
pH7	46.615	46.060	46.337	46.337	14.567	14.290	13.596	14.151

ตาราง 27 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่
ค่าพีเอช ต่างๆ

pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะ(%)		
	ตะกั่ว (pb)	แคดเมียม (cd)	สังกะสี (zn)
pH2	22.012	23.289	12.452
pH3	95.764	59.259	60.563
pH4	96.551	72.388	64.467
pH5	97.544	76.710	67.729
pH6	-	77.058	69.018
pH7	-	77.507	69.461

ตาราง 28 แสดงความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (Pb) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	49.045	49.204	49.045	49.098	1.497	1.497	1.433	1.476
40	49.045	49.204	49.045	49.098	0.764	0.764	0.669	0.732
50	49.045	49.204	49.045	49.098	0.669	0.669	0.732	0.690
60	49.045	49.204	49.045	49.098	0.478	0.478	0.510	0.488

ตาราง 29 แสดงความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (Cd) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	50.863	50.493	51.751	51.036	11.714	11.560	11.406	11.560
40	50.863	50.493	51.751	51.036	10.635	10.327	10.327	10.430
50	50.863	50.493	51.751	51.036	8.785	8.940	8.940	8.888
60	50.863	50.493	51.751	51.036	7.707	7.552	7.861	7.707

ตาราง 30 แสดงความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (Zn) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของเศษดิน
เผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ลิตร)				ความเข้มข้นที่สมดุล (มก./ลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	49.129	49.303	48.955	49.129	16.659	16.768	16.986	16.805
40	49.129	49.303	48.955	49.129	15.244	15.788	15.462	15.498
50	49.129	49.303	48.955	49.129	14.373	14.591	14.264	14.409
60	49.129	49.303	48.955	49.129	13.175	13.393	13.611	13.393

ตาราง 31 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่อุณหภูมิ
ต่างๆ ของเศษดินเผาที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 4 mesh -8 mesh

อุณหภูมิ(°C)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ(%)		
	Pb	cd	zn
30	96.99	77.35	65.79
40	98.5	79.56	68.45
50	98.59	82.58	70.67
60	99	84.99	72.73

ตาราง 32 แสดงปริมาณไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากคอลัมน์ดูด
ซับใช้อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

เก็บน้ำ ครั้งที่	เวลา(นาทึ)	ความเข้มข้นของโลหะที่เหลือ/ความเข้มข้นโลหะเริ่มต้น(C/Co) อัตราการไหล 60 มล./นาที		
		ตะกั่ว	แคดเมียม	สังกะสี
1.	0.13	0.007	0.155	0.173
2.	0.29	0.013	0.182	0.170
3.	0.46	0.020	0.218	0.203
4.	0.63	0.031	0.271	0.221
5.	0.79	0.037	0.305	0.225
6.	0.96	0.044	0.327	0.239
7.	1.5	0.051	0.342	0.273
8.	2.5	0.056	0.374	0.338
9.	3.5	0.060	0.385	0.359
10.	4.5	0.062	0.397	0.371
11.	5.5	0.066	0.421	0.389
12.	6.5	0.070	0.428	0.406
13.	7.5	0.075	0.465	0.448
14.	8.5	0.079	0.485	0.453
15.	9.5	0.082	0.498	0.497
16.	10.5	0.087	0.513	0.509
17.	11.5	0.090	0.518	0.531
18.	12.5	0.095	0.535	0.536
19.	13.5	0.103	0.539	0.568
20.	14.5	0.109	0.547	0.571
21.	15.5	0.116	0.549	0.579
22.	16.5	0.124	0.571	0.589
23.	17.5	0.126	0.611	0.595
24.	18.5	0.129	0.611	0.598
25.	19.5	0.130	0.650	0.607
26.	20.5	0.132	0.659	0.613
27.	21.5	0.133	0.670	0.617
28.	22.5	0.135	0.682	0.619
29.	24.5	0.137	0.695	0.625
30.	26.5	0.140	0.706	0.632
31.	28.5	0.143	0.717	0.635
32.	30.5	0.147	0.721	0.638
33.	32.5	0.149	0.723	0.644
34.	35.5	0.007	0.718	0.647
35.	38.5	0.013	0.727	0.653
36.	41.5	0.020	0.738	0.654

ตาราง 33 แสดงปริมาณไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกมาจากคอลัมน์ดูด
ซับใช้อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

เก็บน้ำ ครั้งที่	เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของโลหะที่เหลือ/ความเข้มข้นโลหะเริ่มต้น(C/Co) อัตราการไหล 30 มล./นาที		
		ตะกั่ว	แคดเมียม	สังกะสี
1.	0.13	0	0.166	0.133
2.	0.29	0	0.183	0.139
3.	0.46	0	0.200	0.169
4.	0.63	0	0.215	0.187
5.	0.79	0	0.245	0.194
6.	0.96	0.003	0.251	0.199
7.	1.5	0.009	0.267	0.215
8.	2.5	0.015	0.282	0.238
9.	3.5	0.020	0.297	0.264
10.	4.5	0.024	0.348	0.278
11.	5.5	0.026	0.351	0.290
12.	6.5	0.027	0.374	0.324
13.	7.5	0.035	0.379	0.338
14.	8.5	0.040	0.385	0.345
15.	9.5	0.041	0.389	0.347
16.	10.5	0.046	0.395	0.356
17.	11.5	0.051	0.406	0.367
18.	12.5	0.054	0.407	0.370
19.	13.5	0.057	0.410	0.391
20.	14.5	0.060	0.407	0.395
21.	15.5	0.061	0.409	0.423
22.	16.5	0.067	0.418	0.431
23.	17.5	0.071	0.438	0.432
24.	18.5	0.073	0.460	0.434
25.	19.5	0.075	0.472	0.435
26.	20.5	0.078	0.487	0.436
27.	21.5	0.080	0.493	0.439
28.	22.5	0.080	0.494	0.440
29.	24.5	0.081	0.497	0.443
30.	26.5	0.082	0.499	0.447
31.	28.5	0.088	0.530	0.449
32.	30.5	0.091	0.536	0.451
33.	32.5	0.094	0.555	0.451
34.	35.5	0.094	0.556	0.463
35.	38.5	0.095	0.564	0.471
36.	41.5	0.098	0.567	0.493

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะตะกั่วเข้มข้น 49.098 มิลลิกรัม /ลิตรปริมาตร 50 มิลลิลิตร

จะได้ว่า สารละลายเริ่มต้น 1000 มิลลิลิตร มีตะกั่ว 49.098 มิลลิกรัม
 สารละลายเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร มีตะกั่ว $(49.098) (50) / 1000$
 $= 2.455$ มิลลิกรัม

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุลสารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 1.476 มิลลิกรัม /ลิตร
 จะได้ว่า สารละลายเริ่มต้น 1000 มิลลิลิตร มีตะกั่ว 1.476 มิลลิกรัม
 สารละลายเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร มีตะกั่ว $(1.476) (50) / 1000$
 $= 0.0738$ มิลลิกรัม

แสดงว่าดินเผา 5.00 กรัม สามารถดูดโลหะตะกั่วได้ $2.455 - 0.0738$
 $= 2.381$ มิลลิกรัม

ดังนั้นดินเผา 1.00 กรัม สามารถดูดโลหะตะกั่วได้ $2.381 / 5$
 $= 0.4762$ มิลลิกรัม

ตาราง 34 แสดงปริมาณการดูดซับโลหะตะกั่วโดยดินเผา

อุณหภูมิ				
สารละลาย	ปริมาณการดูดซับ (มก.)	ปริมาณการดูดซับ (มก.)		% การดูดซับ
(เซลเซียส)	ต่อดินเผา 5.00 กรัม	ต่อดินเผา 1.00 กรัม		
30	2.381	0.476		96.99
40	2.418	0.484		98.5
50	2.420	0.484		98.59
60	2.430	0.486		99

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะแคดเมียมเข้มข้น 51.036 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า} \quad & \text{สารละลายเริ่มต้น } 1000 \text{ มิลลิลิตร มีแคดเมียม } 51.036 \text{ มิลลิกรัม} \\ & \text{สารละลายเริ่มต้น } 50 \text{ มิลลิลิตร มีแคดเมียม } (51.036) (50) / 1000 \\ & = 2.552 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุลสารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 11.56 มิลลิกรัม/ลิตร

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า} \quad & \text{สารละลายเริ่มต้น } 1000 \text{ มิลลิลิตร มีแคดเมียม } 11.56 \text{ มิลลิกรัม} \\ & \text{สารละลายเริ่มต้น } 50 \text{ มิลลิลิตร มีแคดเมียม } (11.56) (50) / 1000 \\ & = 0.578 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แสดงว่าดินเผา 5.00 กรัม} \quad & \text{สามารถดูดโลหะแคดเมียมได้ } 2.552 - 0.578 \\ & = 1.974 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นดินเผา 1.00 กรัม} \quad & \text{สามารถดูดโลหะแคดเมียมได้ } 1.974 / 5 \\ & = 0.3945 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ตาราง 35 แสดงปริมาณการดูดซับโลหะแคดเมียมโดยดินเผา

อุณหภูมิ			
สารละลาย	ปริมาณการดูดซับ (มก.)	ปริมาณการดูดซับ (มก.)	% การดูดซับ
(เซลเซียส)	ต่อดินเผา 5.00 กรัม	ต่อดินเผา 1.00 กรัม	
30	1.974	0.395	77.35
40	2.030	0.406	79.56
50	2.107	0.421	82.58
60	2.166	0.433	84.99

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะสังกะสีเข้มข้น 49.129 มิลลิกรัม /ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า} \quad & \text{สารละลายเริ่มต้น} \quad 1000 \text{ มิลลิลิตร} \quad \text{มีสังกะสี} \quad 49.129 \text{ มิลลิกรัม} \\ & \text{สารละลายเริ่มต้น} \quad 50 \text{ มิลลิลิตร} \quad \text{มีสังกะสี} \quad (49.129) (50) / 1000 \\ & = 2.456 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุลสารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 16.805 มิลลิกรัม /ลิตร

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า} \quad & \text{สารละลายเริ่มต้น} \quad 1000 \text{ มิลลิลิตร} \quad \text{มีสังกะสี} \quad 16.805 \text{ มิลลิกรัม} \\ & \text{สารละลายเริ่มต้น} \quad 50 \text{ มิลลิลิตร} \quad \text{มีสังกะสี} \quad (16.805) (50) / 1000 \\ & = 0.840 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แสดงว่าดินเผา 5.00 กรัม} \quad & \text{สามารถดูดโลหะสังกะสีได้} \quad 2.456 - 0.840 \\ & = 1.616 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นดินเผา 1.00 กรัม} \quad & \text{สามารถดูดโลหะสังกะสีได้} \quad 1.616 / 5 \\ & = 0.323 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ตาราง 36 แสดงปริมาณการดูดซับโลหะสังกะสีโดยดินเผา

อุณหภูมิ			
สารละลาย	ปริมาณการดูดซับ (มก.)	ปริมาณการดูดซับ (มก.)	% การดูดซับ
(เซลเซียส)	ต่อดินเผา 5.00 กรัม	ต่อดินเผา 1.00 กรัม	
30	1.616	0.323	65.790
40	1.682	0.336	68.450
50	1.736	0.347	70.670
60	1.787	0.357	72.730

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ที่ความเข้มข้น 30.364 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีตะกั่ว 30.364 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีตะกั่ว $(30.364) (50) / 1000$

$$= 1.518 \text{ มิลลิกรัม}$$

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุล สารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 0.354 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีตะกั่ว 0.354 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีตะกั่ว $(0.354) (50) / 1000$

$$= 0.018 \text{ มิลลิกรัม}$$

แสดงว่า ดินเผา 5.00 กรัม สามารถดูดโลหะตะกั่วได้ $1.518 - 0.018$

$$= 1.501 \text{ มิลลิกรัม}$$

ดินเผา 1.00 กรัม สามารถดูดโลหะตะกั่วได้ $1.501/5$

$$= 0.300 \text{ มิลลิกรัม}$$

หมายเหตุ : ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 20

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ที่ความเข้มข้น 30.980 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีแคดเมียม 30.98 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีแคดเมียม $(30.98) (50) / 1000$

$$= 1.549 \text{ มิลลิกรัม}$$

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุล สารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 4.861 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีแคดเมียม 4.861 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีแคดเมียม $(4.861) (50) / 1000$

$$= 0.243 \text{ มิลลิกรัม}$$

แสดงว่า ดินเผา 5.00 กรัม สามารถดูดโลหะแคดเมียมได้ $1.549 - 0.243$

$$= 1.306 \text{ มิลลิกรัม}$$

ดินเผา 1.00 กรัม สามารถดูดโลหะแคดเมียมได้ $1.31 / 5$

$$= 0.261 \text{ มิลลิกรัม}$$

หมายเหตุ : ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 21

เมื่อใช้ดินเผา 5.00 กรัม ต่อสารละลายโลหะสังกะสีที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ที่ความเข้มข้น 30.933 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีสังกะสี 30.933 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีสังกะสี $(30.922) (50) / 1000$

$$= 1.547 \text{ มิลลิกรัม}$$

เมื่อทำการดูดซับจนเข้าสู่สมดุล สารละลายมีความเข้มข้นเหลือ 7.062 มิลลิกรัม /ลิตร

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีสังกะสี 7.062 มิลลิกรัม

สารละลาย 50 มิลลิลิตร มีสังกะสี $(7.062) (50) / 1000$

$$= 0.353 \text{ มิลลิกรัม}$$

แสดงว่า ดินเผา 5.00 กรัม สามารถดูดโลหะสังกะสีได้ $1.547 - 0.353$

$$= 1.193 \text{ มิลลิกรัม}$$

ดินเผา 1.00 กรัม สามารถดูดโลหะตะกั่วได้ $1.216 / 5$

$$= 0.239 \text{ มิลลิกรัม}$$

หมายเหตุ : ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 22

การคำนวณค่า Void Fraction (อัตราส่วนของช่องว่างภายในหอดูดซับ)

1. ให้ปริมาตรของน้ำที่นำมาแทนที่ปริมาตรของหอดูดซับเท่ากับ A ลบ.ซม
2. นำเศษดินเผาบรรจุลงไปในหอดูดซับแล้วให้ปริมาตรน้ำที่ล้นมีค่าเท่ากับ B ลบ.ซม.
3. ค่า Void Fraction มีค่าเท่ากับ $(A-B)/A$

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายบดินทร์ หิรัญญปกรณ
วันเดือนปีเกิด	14 กุมภาพันธ์ 2522
สถานที่เกิด	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	อำเภอ อยุธยา จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13000
E- mail	Bodin_14@yahoo.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนีย์)
พ.ศ. 2543	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2547	การศึกษานิเทศศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ