

ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์
ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต



นาย ทศพร ภูระหงษ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1719-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENTCY OF SOME HEAVY METAL REMOVAL FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS
INDUSTRIAL WASTE WATER BY CONCRETE RUBBISH MEDIA

Mr. THOSSAPORN POORAHONG

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Inter-department of Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1719-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต
โดย	นาย ทศพร ภูระหงษ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ธีเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทธมน วัฒนผลไพบูลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

ทศพร ภู่วะหงษ์ : ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม
แผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต.(EFFICIENTCY OF SOME HEAVY METAL
REMOVAL FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS INDUSTRIAL WASTE WATER BY
CONCRETE RUBBISH MEDIA)

อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์ 121 หน้า. ISBN 974-17-1719-9

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการ
กำจัดโลหะหนัก 5 ชนิดในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต การ
ทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ขั้นแรกเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีตที่เตรียม
ไว้สำหรับทำการทดลองพบว่า เศษคอนกรีตขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 10.5057 sq.m./g
และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ 30.1 cmole/Kg concrete เศษคอนกรีตที่เตรียม
ได้มี ขนาด 0.5-0.6 มม. 15.00% ขนาด 0.6-0.8 มม. 46.67 % และ ขนาด 0.8-1.0 มม. 27.67 %
ตามลำดับ ขั้นตอนที่สองคือการทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์เพื่อศึกษาปัจจัย
ต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดผิวโลหะได้แก่ ค่าพีเอช เวลาสัมผัส และปริมาณเศษคอนกรีต เพื่อ
ทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพุนดิช พบว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน ประสิทธิภาพการ
กำจัดโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ต่างกัน สำหรับโลหะทั้ง 5 ชนิด และไอโซเทอมการดูดติดผิว
สำหรับโลหะทั้ง 5 ชนิดด้วยเศษคอนกรีต เป็นไปดังสมการ $y = 0.1348X^{0.4525}$, $y = 0.7724X^{0.2531}$,
 $y = 0.7416X^{0.3410}$, $y = 0.1034X^{1.8844}$ และ $y = 0.7398X^{0.4458}$ สำหรับ โครเมียม, ทองแดง, นิกเกิล,
ตะกั่ว และ สังกะสี ตามลำดับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะ 10 mg/L และขั้น
ตอนสุดท้ายคือการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์รัศมี 180 เซนติเมตร
เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเศษคอนกรีตในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงที่มีความ
เข้มข้นของ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีเป็น 0.75, 0.17, 0.61 และ 0.15 mg/L ตามลำดับ
พบว่าเศษคอนกรีตสามารถลดความเข้มข้นของโลหะทั้ง 4 ชนิดในน้ำเสียลงได้มากที่สุด 50 % ที่
อัตราการไหล 2.4 ลิตร/ชั่วโมง และมีอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ 30 ชั่วโมง

สหสาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4289664820 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : HEAVY METALS ,ADSORPTION ,PRINTED CIRCUIT BOARDS,CONCRETE RUBBISH

THOSSAPRON POORAHONG : EFFICIENTCY OF SOME HEAVY METAL REMOVAL FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS INDUSTRIAL WASTE WATER BY CONCRETE RUBBISH MEDIA. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D.121 pp. ISBN 974-17-1719-9

This is a laboratory scale experiment to study the efficiency of concrete rubbish to remove 5 metals in waste water from printed circuit boards industrial. The experiment was divided into 3 parts. First was physical study of concrete rubbish properties which found that concrete rubbish has 10.5057 sq.m./g surface area . For concrete rubbish size distribution there are 15.00%,46.67 % and 27.67 %by weigh for 0.5-0.6mm.,0.6-0.8 mm. and 0.8-1.0 mm. respectively and cation exchange capacity is 30.1 cmole/Kg concrete. The second was batch experiment to determine contact time, suitable pH and adsorption isotherm for removes Cr^{3+} Cu^{2+} Ni^{2+} Pb^{2+} and Zn^{2+} from 10 mg/L synthetic waste water. From batch study found that Freundlich isotherm can use to describe the adsorption process. Freundlich isotherm for each metal are $y = 0.1348X^{0.4525}$, $y = 0.7724X^{0.2531}$, $y = 0.7416X^{0.3410}$, $y = 0.1034X^{1.8844}$ and $y = 0.7398X^{0.4458}$ for Cr,Cu,Ci,Pb,and Zn respectively. The third was 1.80-m. depth adsorption column which found that concrete rubbish has maximum 50 % removal efficiency for Cu, Ni,Pb and Zn in waste water form printed circuit boards with in 30 hr. operation.

Inter-department.....Environmental Science.....Student's signature.....

Field of study.....Environmental Science.....Advisor's signature.....

Academic year.....2002.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ จากบุคคล
หลายๆฝ่าย ดังนั้นจึงขอขอบพระคุณทุกท่านดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่
ให้ ความรู้ความช่วยเหลือ คอยชี้แนะ ส่งเสริม รวมทั้งให้หลักการและข้อคิดต่างๆอันเป็นประโยชน์
อย่างยิ่งต่อศิษย์ในการทำวิทยานิพนธ์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำวิจัยตลอดมาจนกระทั่งจบโครง
การ ทำให้การวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบุณย์ ผู้อำนวยการหลักสูตร
สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา และ รอง
ศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้ง
นี้ อีกทั้งยังได้ให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่างๆอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอบพระคุณ คุณ ลักขณา เมี้ยนกำเนิด เจ้าหน้าที่การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
ประจำนิคมอุตสาหกรรมบางปู ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเสียจริงจากโรงงานที่นำมาใช้ในการทดลอง
adsorption Column

ขอบคุณห้องปฏิบัติการกำจัดขยะภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื้อเพื่อสถานที่ อุปกรณ์ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณภาควิชา ธรณีวิทยาโดย อาจารย์ มาละตี ทัยคุปต์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องแ
Atomic adsorption Spectrophotometer และคุณ จิระประภา เนียมปานที่ให้ความช่วยเหลือและ
อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิ ชินโสภณพนิช ที่กรุณา
มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

และสุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์
ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทศพร ภูระหงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิด หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การผลิตแอมวงจรมิมพ์.....	4
2.1.1 การผลิตแอมวงจรมิมพ์	4
2.1.2 ขั้นตอนประกอบอื่นๆ.....	4
2.2 ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแอมวงจรมิมพ์.....	7
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแอมวงจรมิมพ์	8
2.4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย	11
2.5 ทฤษฎีการตกตะกอนทางเคมี.....	12
2.5.1 การกำจัดโลหะด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์.....	13
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอน	14
2.6 การกรอง(Filtration).....	17
2.6.1 ลักษณะการกรอง.....	17
2.6.2 กลไกการกรอง	17
2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองน้ำ.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.4 ประสิทธิภาพการกรอง	20
2.7 การดูดติดผิว(adsorption)	21
2.7.1 สมดุลการดูดติดผิว.....	22
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	22
2.7.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	24
2.7.3.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	25
2.7.3.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที.....	27
2.7.3.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช.....	28
2.8 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์(The Adsorption column).....	29
2.8.1 The Breakthrough Curve and Mass Transfer Zone.....	29
2.9 คอนกรีต(Concrete).....	32
2.9.1 ปูนซีเมนต์.....	33
2.9.1.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์.....	33
2.9.1.2 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ	34
2.10 ทบทวนเอกสาร.....	38
บทที่ 3 ขั้นตอนและการดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 แผนการทดลอง.....	42
3.2 วิธีการทดลอง.....	43
3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบของเศษคอนกรีตที่ใช้ทำการวิจัย.....	51
4.2 ผลศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการการกำจัดโลหะด้วยเศษคอนกรีต.....	53
4.2.1 ผลการทดลองช่วงเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม.....	53
4.2.2 ผลการทดลองช่วงพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะ.....	61
4.2.3 ผลการทดสอบ Isotherm การดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	71
4.3 ผลศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานแฉงวงจรมิพ.....	74

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลศึกษาประสิทธิภาพในการดูตติตตพวโดยการทดลอง	
ในถงดูตตตพวแบบคอถมน์.....	75
4.5 วจารณผลการทดลอง.....	80
บทที่ 5 สรพผลการทดลองและขอเสนอแนะ.....	87
5.1 สรพผลการทดลอง.....	87
5.2 ขอเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	110
ภาคผนวก ค.....	112
ภาคผนวก ง.....	115
ภาคผนวก จ.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์บางชนิด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	14
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	34
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต.....	50
ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดเศษคอนกรีต.....	50
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีตก่อนและหลังการทดลอง.....	52
ตารางที่ 4.4 สมการการดูดติดผิวของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ.....	73
ตารางที่ 4.5 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลาง เศษคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น 10 mg/l.....	74
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	74
ตารางที่ 4.7 แสดงสมมูลมวลสารของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ผ่านการบำบัดด้วยตัวกลาง เศษคอนกรีต ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในช่วงเวลาที่ 0 - 30	85

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....	5
รูปที่ 2.2 แผนผังการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....	10
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ ที่พีเอชต่างๆ	16
รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด.....	18
รูปที่ 2.5 กลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง.....	18
รูปที่ 2.6 กลไกการกรองน้ำในเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว.....	19
รูปที่ 2.7 ลักษณะรูปร่างของการดูดติดผิวทางกายภาพ.....	25
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	26
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที.....	28
รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช.....	29
รูปที่ 2.11 เขตการถ่ายมวลสารในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	30
รูปที่ 2.12 ลักษณะโดยทั่วไปในการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	31
รูปที่ 2.13 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต.....	33
รูปที่ 2.14 ลักษณะของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต.....	36
รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างคอนกรีต.....	37
รูปที่ 3.1 สรุปการศึกษาถึงสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะ ด้วยเศษคอนกรีตในสภาวะ Batch.....	46
รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆของชุดการทดลองถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์	47
รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	51
รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของเศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง(กำลังขยาย 1,500 เท่า).....	51
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม.....	53
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง.....	53
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	54
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว.....	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี	55
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	58
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	58
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	59
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	59
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี.....	60
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ กับ % การกำจัดโครเมียม.....	61
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ กับ % การกำจัดทองแดง.....	62
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ กับ % การกำจัดนิกเกิล.....	62
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ กับ % การกำจัดตะกั่ว.....	63
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ กับ % การกำจัดสังกะสี.....	63
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	65
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	65
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	66
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	66
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นกับพีเอชท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี.....	67
รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4 - 9	68
รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4 - 9	68
รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4 - 9	69
รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4 - 9.....	69
รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4 - 9.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundich ของเศษคอนกรีต ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	71
รูปที่ 4.29 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundich ของเศษคอนกรีต ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	71
รูปที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundich ของเศษคอนกรีต ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว.....	72
รูปที่ 4.31 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundich ของเศษคอนกรีต ในน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	72
รูปที่ 4.32 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundich ของเศษคอนกรีต ในน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี.....	73
รูปที่ 4.33 อัตราการไหลของน้ำเสียในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	76
รูปที่ 4.34 พีเอชของน้ำตัวอย่างจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	76
รูปที่ 4.35 ค่าของแข็งละลายของน้ำตัวอย่างจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	77
รูปที่ 4.36 ค่าความเข้มข้นของทองแดงจากจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	77
รูปที่ 4.37 ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	78
รูปที่ 4.38 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	78
รูปที่ 4.39 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุเหลือทิ้งต่างๆมีอยู่มากมายตามกิจกรรมต่างๆ ทั้งจากภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม ภาคการก่อสร้าง และภาคการบริโภคในครัวเรือน ตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ปัญหาที่ติดตามมาจากกิจกรรมเหล่านี้ก็คือการจัดการกับวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้เพื่อมิให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ติดตามมา เช่น ของเสียปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ปัญหาการทำลายวัสดุที่เป็นอันตราย ปัญหาการหาที่ฝังกลบ เป็นต้น หากเราพิจารณาวัสดุที่กล่าวมาจะพบว่าวัสดุเหลือทิ้งหลายอย่างที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารอันตราย ซึ่งจะต้องมีการจัดการอย่างถูกต้องเพื่อมิให้เกิดปัญหาติดตามมา ขณะเดียวกันวัสดุเหลือทิ้งหลายอย่างมีองค์ประกอบที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยอาจต้องมีการปรับปรุงสภาพวัสดุนั้นก่อนนำไปใช้ หรือว่าบางชนิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยไม่ต้องปรับปรุงสภาพแต่อย่างใด

ในโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียที่เกิดจากการกระบวนการผลิตมักจะมีสารเคมีต่างๆปะปนอยู่ เช่น สารอินทรีย์ ตัวทำละลาย โลหะหนัก รวมทั้งของเสียอื่นๆ กระบวนการบำบัดน้ำเสียและกำจัดสารเคมีเหล่านี้มีอยู่หลายเทคนิค การเลือกใช้กระบวนการใดกระบวนการหนึ่งนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณน้ำเสีย องค์ประกอบ ความเข้มข้นของสารเคมีที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย ตลอดจนความเหมาะสมและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการบำบัดในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น

- เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange)
- เทคนิคการตกตะกอน(Precipitation)
- เทคนิคการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Adsorption)
- เทคนิคการตกตะกอนร่วม(Coagulation/Flocculation)
- เทคนิครีเวอร์ออสโมซิส(Reverse Osmosis)
- อิเล็กโทรไดอะไลซิส และอื่นๆ(Electro Dialysis)

วิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้นนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักต่างๆได้ดีและมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีทั้งการใช้เทคนิคเดียวหรือหลายๆเทคนิครวมกัน และในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดแตกต่างกัน ปัจจุบันการเทคนิคการดูดซับเพื่อกำจัดโลหะหนัก สารอินทรีย์ และสิ่งปนเปื้อนจากการกระบวนการทางอุตสาหกรรมมีการพัฒนาไปมาก เช่น การใช้วัสดุดูดซับที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่(regenerate)

หรือการใช้วัสดุดูดซับที่มีราคาถูก การดูดซับเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษ โลหะหนักต่างๆ และ ถ่านกัมมันต์ก็เป็นวัสดุสำหรับใช้ในการดูดซับที่แพร่หลายมากที่สุด แต่อย่างไรก็ดีในประเทศที่กำลังพัฒนาการใช้ถ่านกัมมันต์มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ราคา ความไม่สะดวกในการใช้งาน การนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการที่ซับซ้อน ดังนั้นการใช้วัสดุดูดซับที่มีข้อจำกัดน้อยกว่าข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นน่าจะเป็นการแก้ปัญหาข้อจำกัดที่มีอยู่ได้ วัสดุเหล่านั้น เช่น ของเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม หรือสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม เช่น ถ่านลอย ซึ่งเป็นวัสดุน่าจะเหมาะสมในการนำมาใช้ในการดูดซับเพื่อการบำบัดโลหะหนักต่างๆ ที่ปะปนอยู่กับน้ำเสียที่เกิดขึ้น

เศษคอนกรีต(Concrete Rubbish)เป็นวัสดุเหลือใช้จากการก่อสร้าง มีคุณสมบัติบางประการ เช่น มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก และสามารถหาได้ง่าย การที่สามารถนำเอาเศษคอนกรีตมาใช้ให้เกิดประโยชน์จึงน่าจะเป็นการแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น การลดการใช้สารเคมี การใช้ประโยชน์ของเสีย หรือว่าการกำจัดโลหะหนักต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของโรงงานวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต อันได้แก่ เวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรดต่าง
- 2.ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยใช้ตัวกลางเศษคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.ศึกษาคุณสมบัติของเศษคอนกรีตที่เตรียมได้ อันได้แก่ พื้นที่ผิว(Surface Area)ปริมาตรโพรง(Pore Volume) ความหนาแน่น(Density) ขนาดสัมฤทธิ์(Effective Size) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ(Cation exchange capacity)
- 2.ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของน้ำทิ้งของโรงงานแผงวงจรพิมพ์ ได้แก่ ความขุ่น(Turbidity) ค่าของแข็งละลายทั้งหมด(Total Dissolved Solids, TDS)พีเอช(pH) ทองแดง(Cu) สังกะสี(Zn) ตะกั่ว(Pb) โครเมียม(Cr) นิกเกิล(Ni)

3. ศึกษาความเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียของโรงงานแผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต อันได้แก่ พีเอช ช่วงเวลาการสัมผัส

4. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียของโรงงานแผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์

5. จุดยุติการทดลองถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์คือ คือจุดที่อัตราการไหลของน้ำที่ออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์มีค่าลดลง ครึ่งหนึ่งของอัตราการไหลเริ่มต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์ได้ และใช้กับโรงงานชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะน้ำเสียใกล้เคียงกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แนวคิด หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตแผงวงจรพิมพ์

แผงวงจรพิมพ์ (Printed circuit boards) คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ บนแผ่น thin fiber epoxy แล้วจึงสร้างเส้นเชื่อมวงจรระหว่างองค์ประกอบต่างๆ แผงวงจรที่ได้จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน

แผงวงจรพิมพ์มีอยู่สองประเภทคือ

1. แบบ single-layer
2. แบบ Multilayer

ขนาด ความหนาแน่น และความซับซ้อนของแผงวงจรพิมพ์ที่ต้องการผลิตจะเป็นตัวกำหนดว่า แผงวงจรพิมพ์ที่จะผลิตแบบใด

2.1.1 การผลิตแผงวงจรพิมพ์ (Coombs,1990)

ในการผลิตแผงวงจรพิมพ์ทั้ง 2 ชนิดมีขั้นตอนเริ่มต้นที่เหมือนกัน โดยมีขั้นตอนการผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยสรุปดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.2 ขั้นตอนประกอบอื่นๆ(Miscellaneous Operation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่จะทำก่อนประกอบอุปกรณ์อื่นๆลงบนชิ้นงาน เพื่อการขนส่ง หรือก่อนนำไปทำแผงวงจรเฉพาะแบบอื่นๆ

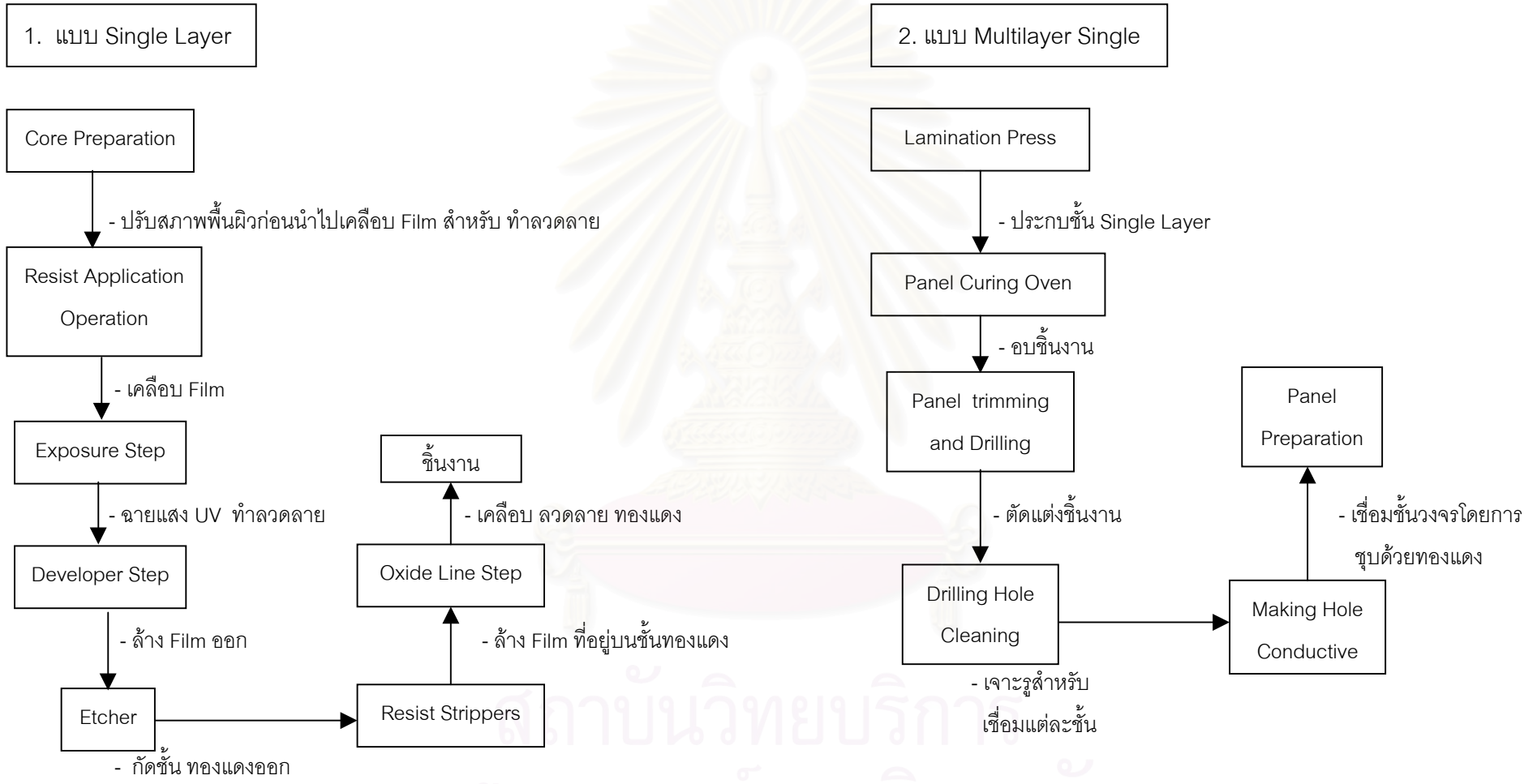
1.Solder mask

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการป้องกันแผ่นชิ้นงานที่จะเข้าสู่กระบวนการอื่นๆในภายหลัง โดยการใช้สารเคมีจำพวก Monomer ชนิด Liquid Photoimageable เคลือบบนพื้นที่ผิวของชิ้นงาน แล้วนำไปผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ต ชั้น Liquid Photoimageable ก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นฟิล์มป้องกันชิ้นงานเช่นเดียวกับขั้นตอน Exposure Step

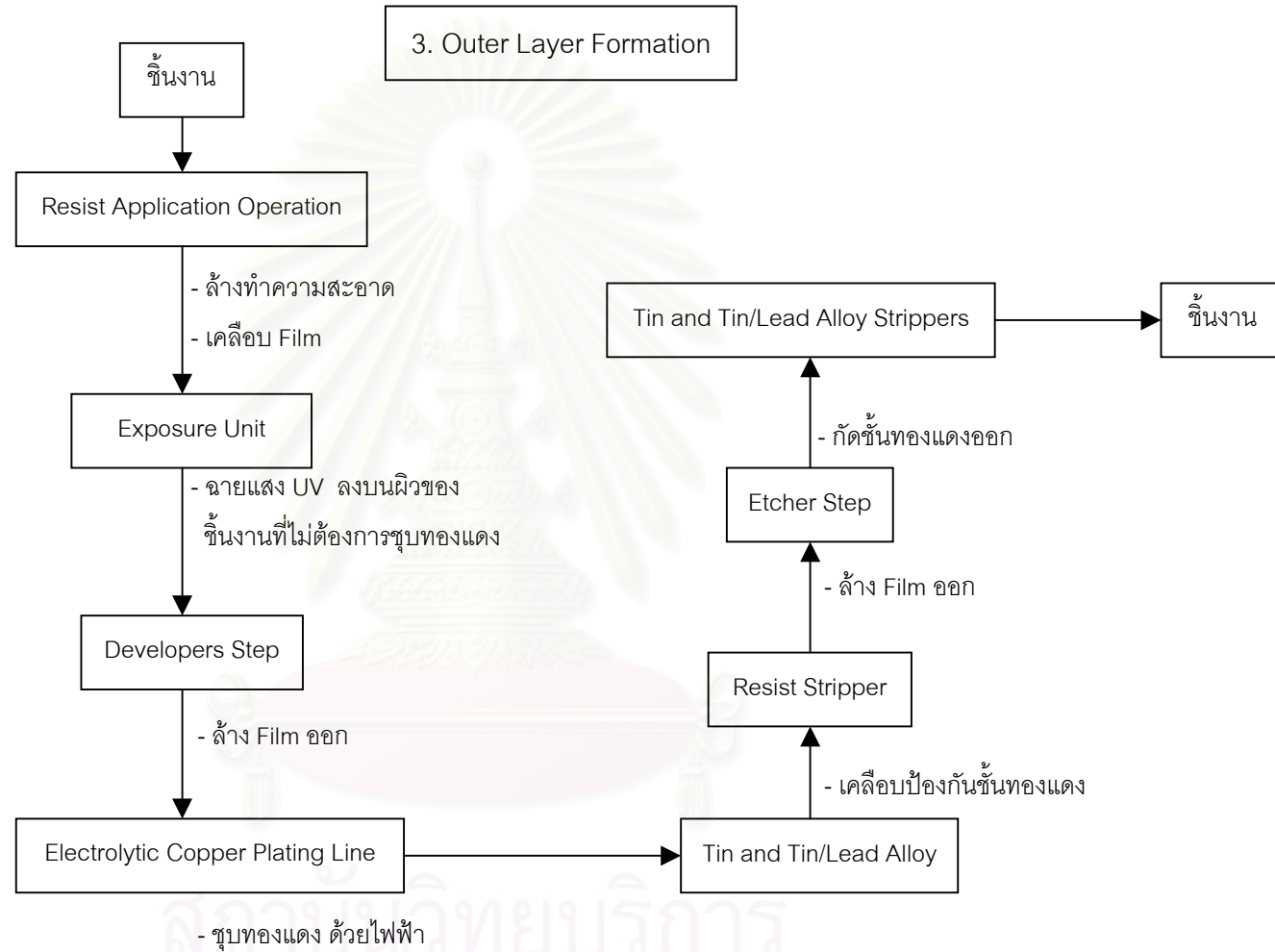
2. Solder Application

ขั้นตอนนี้จะเป็นการเชื่อมบัดกรีอุปกรณ์ที่จะประกอบลงบนแผงวงจรพิมพ์ในบริเวณรูที่เจาะไว้กับแผงวงจรพิมพ์ โดยใช้ตะกั่วบัดกรีเป็นตัวเชื่อม(Solder) ซึ่งมีขั้นตอนย่อยๆหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การชุบด้วย Tin/lead alloy ที่บริเวณรูที่เจาะไว้ ต่อด้วยการใช้ตัวช่วยเชื่อมประสาน(Flux) เพื่อช่วยให้ตัวเชื่อมประสาน(solder) จับตัวกับอุปกรณ์และผิวของ Tin/Lead alloy ที่ชุบไว้ได้ดี แล้วใช้ตัวเชื่อมประสาน(Solder)เชื่อมอุปกรณ์เข้ากับชิ้นงานแผงวงจรพิมพ์

การผลิตแผงวงจรพิมพ์



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ (Coombs,1990)



รูปที่ 2.1(ต่อ) กระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ (Coombs,1990)

3. Legend Stenciling

ขั้นตอนนี้เป็นกาใส่สัญลักษณ์ คำอธิบายต่างๆลงไปบนชิ้นงานแผงวงจรพิมพ์ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

4. Miscellaneous Coating Operation

ในบางกรณี จะมีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการพิเศษอื่นๆในระหว่างการเชื่อมประสาน(Soldering) หรือก่อนการขนส่ง

5. Solder Mask Stripping

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนกำจัดตัวป้องกันผิวชิ้นงานออกจากชิ้นงาน ซึ่งในบางกระบวนการผลิตจะมีขั้นตอนพิเศษอีก เช่น การชุบด้วยทอง(Gold Plating) การทำความสะอาดขั้นสุดท้ายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์(Solvent Cleaning Operation) การทดสอบชิ้นงานแผงวงจรพิมพ์(Test Equipment)

2.2 ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ (Coombs,1990)

ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ น้ำเสียจากการล้างชิ้นงาน (Rinse water) และน้ำเสียที่เกิดจากสารเคมีในกระบวนการผลิตที่หมดอายุ(bath dumped) โดยน้ำเสียทั้งสองส่วนมีความเข้มข้นของโลหะในน้ำแตกต่างกัน

ซึ่งในแต่ละกระบวนการผลิตมีดังนี้

1) กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

- น้ำเสียจากการล้างชิ้นงาน ซึ่งจะได้น้ำเสียที่เจือจาง

2) กระบวนการทำลวดลายทองแดง(exposure + developer step)

- น้ำเสียจากการล้างชั้น Film ออกจากชิ้นงาน ซึ่งล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
- น้ำเสียจากการล้างชิ้นงานหลังจากล้างชั้น Film ออก

3) กระบวนการกัดเนื้อทองแดงที่ไม่ต้องการ(etching step)

- น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติตามสารเคมีที่ใช้กัดเนื้อทองแดง(etching) ซึ่งมีทั้งสารเคมีที่เป็นด่าง(Ammonical/Alkaline solution) หรือมีคุณสมบัติเป็นกรด(H_2SO_4/H_2O_2), หรือ $CuCl_2/HCl$ โดยน้ำเสียที่ได้มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก
- น้ำเสียจากการล้างชิ้นงานที่ผ่านการกัดทองแดง

4) กระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า(Electro Plating และ Electroless Plating)

- ในกระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้าอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยสารละลาย $\text{CuSO}_4 / \text{H}_2\text{SO}_4$ ซึ่งเมื่อหมดอายุการใช้งานน้ำเสียที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นกรด และมีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำเสีย
- ในกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า อาศัยกระบวนการทางเคมีซึ่งประกอบด้วย $\text{CuSO}_4 / \text{CH}_2\text{O} / \text{NaOH}$ ซึ่งจะได้น้ำเสียที่มีคุณสมบัติเป็นด่างและมีทองแดงที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับ ฟอรัลดีไฮด์ (CH_2O)

ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวกระบวนการข้างต้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1. น้ำเสียจากการล้าง (Rinse) ชิ้นงานหลังจากกระบวนการต่างๆ เช่นกระบวนการชุบกระบวนการกัด จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า แต่จะมีปริมาณที่มากกว่า ก็จะใช้กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นหลัก โดยอาศัยเทคนิคหลายๆเทคนิคประกอบกัน เพื่อยืดอายุน้ำล้างชิ้นงาน หรือการใช้เทคนิคที่ซับซ้อนแล้วนำทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่นการใช้ ion-exchange resin เป็นต้น
2. น้ำเสียอันเกิดจากสารเคมีในกระบวนการกัด (Etching) และการชุบ (Plating) ที่หมดอายุ ซึ่งมีความเข้มข้นของสารเคมีมากกว่าแบบแรกและมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยน้ำเสียที่มี chelating agent ปะปนอยู่ก็จะแยกไปบำบัดก่อน ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ต่อไป

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

น้ำเสียทั้งหมดที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะมีขั้นตอนการบำบัดดังนี้

1. น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกรวบรวมและส่งไปยังบ่อรวมน้ำเสียซึ่งทำหน้าที่รวบรวมและปรับสภาพให้น้ำเสียมีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ น้ำเสียที่อยู่ในถังนี้โดยส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย สารอินทรีย์จำพวก Photosensitive organic monomer โลหะต่างๆ และ chelating agent ในถังปรับสภาพนี้ จะมีความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียมากที่สุด
2. น้ำในถังปรับสภาพแล้วจะผ่านไปสู่อ่างปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยกรด H_2SO_4 ให้มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ ระหว่าง 2 - 4
3. น้ำเสียที่ผ่านการปรับค่าความเป็นกรดต่างจนได้แล้วจะส่งไปยังถังเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ เพื่อตกตะกอน Chelating agent ต่างๆที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย และมีการเติมอากาศ ซึ่งจะเกิดตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ หลังจากการเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ แล้วน้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ออกไปโดยปล่อยให้ไหลล้นออกจากถังไปเข้าสู่ถังเติมต่าง

4. ถังเติมต่างจะเป็นถังสำหรับตกตะกอนโลหะหนักที่ปะปนอยู่กับน้ำเสีย โดยในถังนี้จะมีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียระหว่าง 9 - 10.5 ด้วยการเติมปูนขาว หลังจากทีค่าความเป็นกรดต่างคงที่แล้ว โลหะที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียจะเกิดการตกตะกอน(precipitation)เป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย(metal hydroxide)

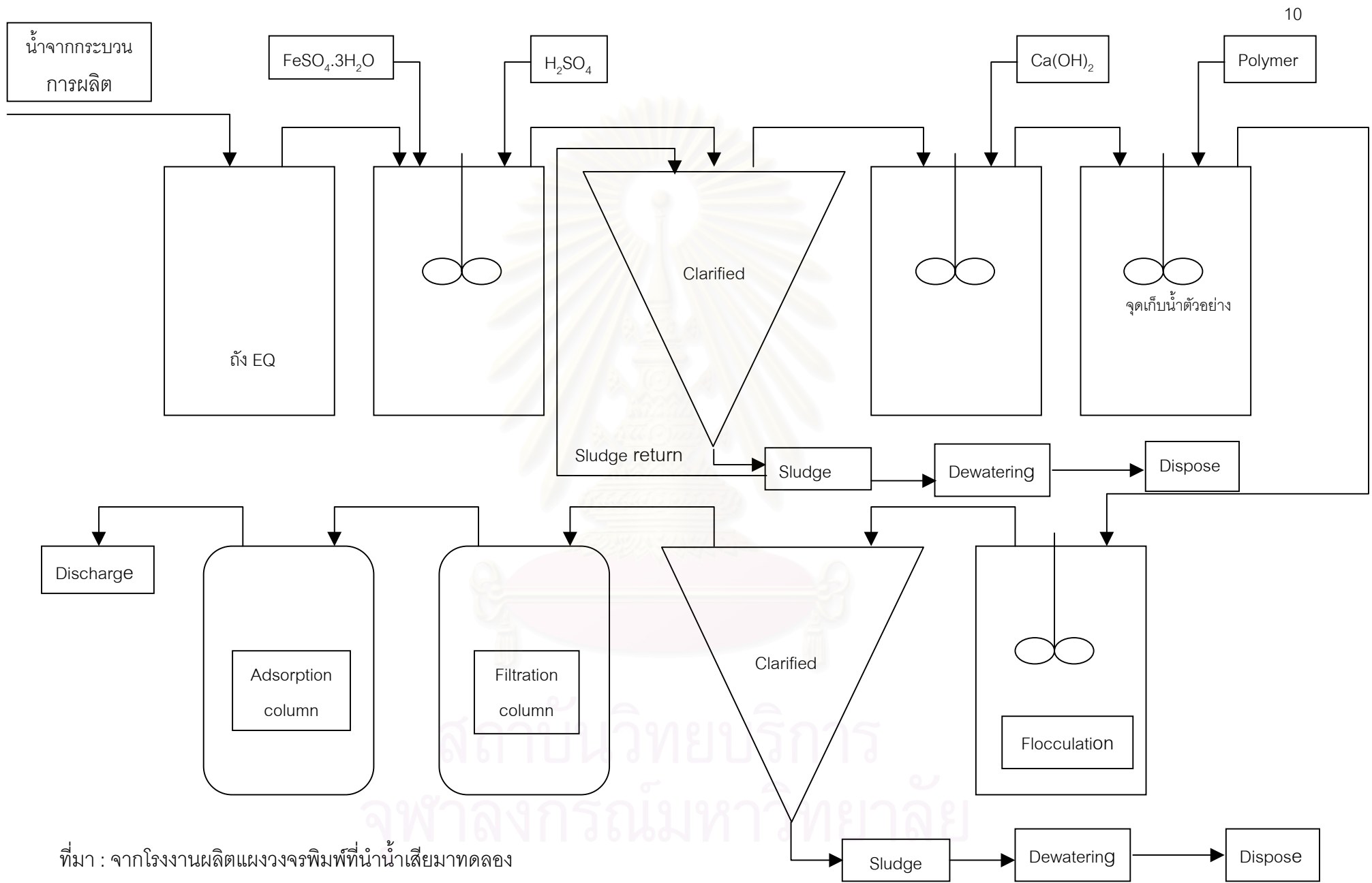
5. น้ำเสียที่มีตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์แขวนลอยอยู่จะถูกส่งไปยังถังเติมโพลิเมอร์สำหรับจับตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านั้นโดยกระบวนการ Flocculation ซึ่งมีทั้งการกวนเร็วกวนช้า และทิ้งไว้ให้ตะกอนจมตัวลง

6. หลังจากทีตะกอนจมตัวลงไปแล้วเกิดการแยกชั้นของน้ำที่ใสและตะกอนที่นอนอยู่ที่ก้นถัง น้ำส่วนใสที่อยู่ด้านบนจะไหลล้นออกไปสู่ถังกรอง

7. ถังกรองทำหน้าที่ในการกรองของแข็งที่ยังอาจแขวนลอยปะปนอยู่กับน้ำเสีย ก่อนที่น้ำที่ผ่านถังกรองจะไหลเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์(Activated Carbon) เพื่อกำจัดโลหะที่ยังหลงเหลืออยู่ในสภาพไอออน ต่อไป

8. ถังถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ในการกำจัดโลหะที่ยังอาจปะปนอยู่ในน้ำเสียอยู่ด้วยกระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) เมื่อน้ำเสียที่ผ่านออกจากถังถ่านกัมมันต์นี้จะถูกตรวจสอบก่อนทีจะปล่อยออกไปสู่ภายนอก(Effluent)ต่อไป

จากกระบวนการบำบัดข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังการบำบัดน้ำเสียจากระบบการผลิตแอมวงจรพิมพ์

2.4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่มีโลหะหนักปะปนอยู่ในน้ำเสียนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้(Patterson,1985)

1.การตกผลึก (Precipitation) เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (Solids)ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

- การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น การเติม ซัลไฟด์ เป็นต้น
- การเปลี่ยนสมดุลย์ของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะมีค่าลดลง ได้แก่ การปรับค่าความเป็นกรดต่าง

2.การรวมตะกอน (Flocculation) เป็นกระบวนการรวบรวมตะกอนที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เร็ว

3.การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบของโลหะที่มีความหนาแน่นกว่า จะตกตะกอนได้เร็ว กระบวนการนี้มักเป็นกระบวนการต่อจากกระบวนการตกผลึกและการรวมตะกอน

4.การกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยทั่วไปกระบวนการกรองมักจะใช้กับตะกอนขนาดเล็กและแขวนลอย ที่ไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขประจุเพื่อให้ความเป็นพิษน้อยลง อยู่ในรูปที่สามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น เช่น การกำจัด ไซยาไนต์ ไครเมียมบวทก

6.กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) เป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะที่มีประจุบวก หรือสารประกอบที่มีประจุลบ เมื่อผ่านชั้นของสารแลกเปลี่ยนก็จะถูกจับไว้ในชั้นนั้นๆ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น

7.รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยการสร้างแรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อ (Semi-permeable Membrane) เยื่อนี้จะยอมให้น้ำและสารบางชนิดผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่สะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานมากและต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียที่เข้าด้วย

8.การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ เป็นสารที่พื้นที่ผิวและความพรุนสูงมากมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่างๆ รวมทั้ง

โลหะที่อยู่ในน้ำเสียถูกจับไว้ในรูปฟลูอิดและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และกระบวนการนี้ต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียที่เข้าด้วย

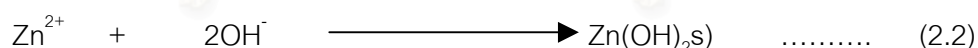
2.5 ทฤษฎีการตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งขึ้นกับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้น ซึ่งมีหลายวิธีโดยอาจเป็นกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งหรือว่าหลายกระบวนการรวมกัน

1. การตกผลึกเนื่องจากการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง ซึ่งในการกำจัดโลหะก็อาจใช้หลักการนี้ได้ เช่น ในการกำจัดสังกะสีที่ละลายในน้ำ (Zn^{+2}) จะเติม โซเดียมซัลไฟด์(Na_2S) ซึ่งละลายน้ำได้ดี จะเกิดปฏิกิริยาได้ซิงค์ซัลไฟด์(ZnS)ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมากดังสมการ



2. การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนสมดุลการละลาย (Solubility Equilibrium) ในการกำจัดโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ ความเข้มข้นของไอออนของโลหะในสารละลายจะต่ำลง เนื่องจากการเลื่อนสมดุลเคมี โลหะส่วนเกินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปตะกอน ดังสมการ



3. การเปลี่ยนคุณสมบัติของสารละลายอิมิตัว หรือเกือบอิมิตัวไปในทางที่ทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะเป็นของแข็ง

อย่างไรก็ตามการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะออกจากน้ำเสีย นิยมใช้สารประกอบหลายชนิด ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอนเนต และซัลไฟด์ ซึ่งแต่ละชนิดแต่ละชนิดจะตกตะกอนโลหะในรูปที่แตกต่างกัน การใช้สารเคมีเหล่านี้สามารถใช้แยกกันหรือร่วมกันในปริมาณที่เพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะที่ละลายในน้ำเสียดกับสารเคมีที่เกิดเป็นตะกอน ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียดด้วยกระบวนการอื่นๆต่อไป

2.5.1 การกำจัดโลหะด้วยการตกตะกอน ไฮดรอกไซด์(Metal Treatment by Hydroxide Precipitation)

โลหะในระบบบำบัดในระบบบำบัดน้ำเสีย จะอยู่ในรูปทั้งที่เป็นของแข็งและสารละลาย หลักในการบำบัดโลหะหนักด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์คือการปรับพีเอชของสารละลาย(ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน)ด้วยการเติมสารเคมีที่มีไฮดรอกไซด์หรือทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน เช่น ปูนขาว โซดาไฟ ในสภาวะอิ่มตัวของโลหะไฮดรอกไซด์ ผลจากความเข้มข้นไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์จะเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$[M^{+n}][OH^-]^n = K_{sp} \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ $[M^{+n}]$ = แทนความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำที่ประจุบวก n

$[OH^-]$ = แทนความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

K_{sp} = แทนค่าคงที่ผลคูณการละลายซึ่งมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง

เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟลงไปใต้น้ำเสียที่มีโลหะละลายอยู่ ทำให้พีเอชของน้ำเสียสูงขึ้น และเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่ามากจนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลคูณการละลาย ซึ่งโดยหลักของ เลอ ชาเตอลิเยร์แล้ว เมื่อระบบที่อยู่ในสภาวะที่สมดุลถูกรบกวน ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่จะทำให้ปัจจัยรบกวนนั้นลดลงเหลือน้อยที่สุด แล้วระบบจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง จากหลักการดังกล่าว ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และตกตะกอนออกมาจากสารละลายจนกระทั่งผลคูณความเข้มข้นของไอออนทั้งสองในน้ำเสียเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย โลหะส่วนที่เหลือก็ยังคงละลายอยู่ในน้ำต่อไป อย่างไรก็ตามหากพีเอชของน้ำเสียลดลง โลหะไฮดรอกไซด์จะสามารถละลายกลับลงมากอยู่ในน้ำเสียได้อีก จึงต้องมีแยกโลหะไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งออกจากน้ำเสียก่อนด้วยกระบวนการอื่นๆอีก (ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะบางชนิดดังแสดงดังในตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์บางชนิดที่ 25 องศาเซลเซียส*

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าคงที่ผลคูณการละลาย(Ksp)
$\text{Al(OH)}_3(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^-$	1.0×10^{-32}
$\text{Ca(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$	5.0×10^{-9}
$\text{Cd(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Cd}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.0×10^{-14}
$\text{Cr(OH)}_3(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Cr}^{3+} + 3\text{OH}^-$	6.0×10^{-31}
$\text{Cu(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.0×10^{-19}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	5.0×10^{-15}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	6.0×10^{-38}
$\text{Mg(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.0×10^{-12}
$\text{Ni(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.0×10^{-16}
$\text{Pb(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.5×10^{-16}
$\text{Zn(OH)}_2(\text{c}) \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^-$	8.0×10^{-18}

* ที่มา : Sawyer,McCarty,and Parkin, 1994

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี

- ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์

โลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่างๆไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก(Amphoterik) เช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว นิกเกิลจะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายต่ำที่สุด เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นต่อไปโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะกลับละลายได้มากขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นการกำจัดโลหะออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าความสามารถในการละลายในน้ำต่ำที่สุดจึงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้จะมีกลไกอื่นร่วมอยู่ด้วย เช่นมีการดูดติดผิวไอออนของโลหะบนตะกอนเคมีเป็นต้น

- พีเอชและปริมาณสารเคมี

เนื่องจากสารเคมีที่ใช้เติมให้เพื่อให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ จะทำหน้าที่ปรับพีเอชของน้ำเสียด้วย ดังนั้นการควบคุมพีเอชและปริมาณของสารเคมีที่เติมที่ใช้ต้องคำนึงถึงพีเอชที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ต่ำที่สุด ในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะหลาย

ชนิดพร้อมกันจำเป็นต้องทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม ในกรณีของโลหะแอมโฟเทอริก การควบคุมพีเอชของน้ำเสียต้องทำอย่างระมัดระวัง มิฉะนั้นจะไม่สามารถกำจัดโลหะออกจากน้ำเสีย

- อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนทางเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จะตกตะกอนทางเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ สังเกตได้จากค่าคงที่ผลคูณการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

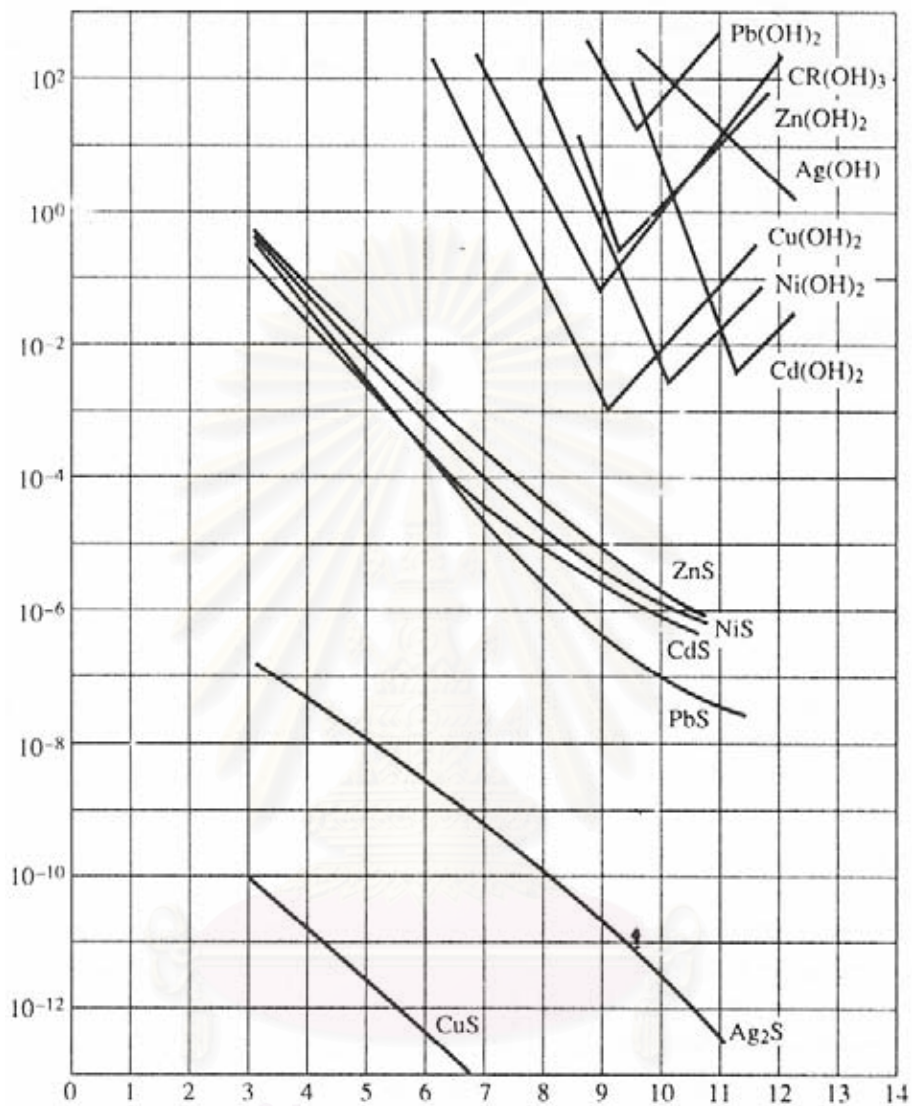
- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การตกตะกอนทางเคมีต้องอาศัยเวลาในการกวนผสมสารเคมีที่เติมให้กระจายอย่างทั่วถึง และมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างไอออนต่างๆในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ สารเคมีบางชนิดเช่นปูนขาวละลายได้น้อยต้องใช้เวลาในการกวนผสมนานกว่าโซดาไฟซึ่งละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้การกวนช้าๆ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดมีโอกาสสัมผัสกันเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรสูงและแยกออกโดยการตกตะกอนได้ง่าย

- ไอออนเชิงซ้อน

ไอออนหลายชนิด เช่น ไซยาไนต์ (CN⁻) แอมโมเนีย และสารจำพวกคีเลนท์ เช่น EDTA สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่เสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมี

Concentration of dissolved metal (mg/L)



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ที่พีเอชต่างๆ

ที่มา : Eckenfelder,2000

2.6 การกรอง(Filtration) (Metcalf & Eddy,1991)

การกรองเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งจะใช้กระบวนการนี้กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นทุติยภูมิ(Secondary Treatment)มาก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำภายนอก นอกจากนี้การกรองยังใช้ในการกำจัดของแข็งที่เกิดขึ้นภายหลังจากการตกตะกอนด้วยด่าง(Lime precipitation) และยังใช้เป็นกระบวนการบำบัดก่อนหน้า(Pretreatment) ก่อนที่จะเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์(Activated Carbon) เป็นต้น

2.6.1 ลักษณะการกรอง(มันสิน,2538)

การกรองเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือการกรองแบบติดชั้นผิวกรอง(Surface Filtration)และการกรองแบบติดในชั้นกรอง(In-Dept Filtration)

1. การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง(Surface Filtration) เป็นการกรองตะกอนที่แขวนลอยหรือความขุ่น จะถูกดักจับและติดค้างอยู่บนผิวของสารกรอง สารกรองอาจเป็นผ้า แผ่นใยสังเคราะห์ หรือแท่งกรอง ก็ได้ การกรองแบบติดผิวชั้นกรองอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- แบบใช้แผ่นกรอง ซึ่งอาจทำด้วยผ้า แผ่นโลหะ หรือแผ่นใยสังเคราะห์
- แบบใช้แท่งกรอง(Porous Media) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งวัสดุที่มีความพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะยอมให้น้ำผ่านเท่านั้น ส่วนตะกอนและความขุ่นที่อยู่ในน้ำจะติดอยู่บนแท่งของชั้นกรอง
- แบบที่ใช้สารกรองที่เตรียมขึ้นจากสารบางอย่าง เช่น Diatomaceous Earth นำมาเคลือบผิวให้มีรูขนาดเล็ก เมื่อกรองน้ำก็จะเกิดกระบวนการกรองเช่นเดียวกับแผ่นกรอง

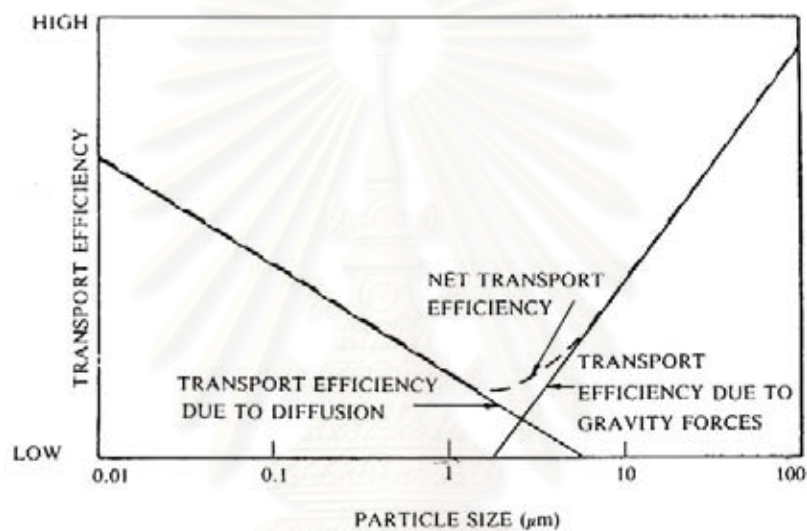
2. การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง(In-Dept Filtration) เป็นการกรองน้ำแบบธรรมดาที่ใช้กันในโรงงานผลิตน้ำประปา สารกรองที่นิยมใช้กันคือทราย แต่เนื่องด้วยขนาดของสารกรองจะมีขนาดใหญ่กว่าการกรองแบบติดผิว ตะกอนความขุ่นจึงมีโอกาสเข้าไปในชั้นของสารกรองได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะการกรอง เช่น แบ่งตามอัตรากรอง แบ่งตามชนิดสารกรอง แบ่งตามทิศทางการไหลของน้ำที่ผ่านสาร แบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของสารกรอง หรือว่าแบ่งตามสภาพการไหลของน้ำที่ไหลผ่านกรอง

2.6.2 กลไกการกรองน้ำ

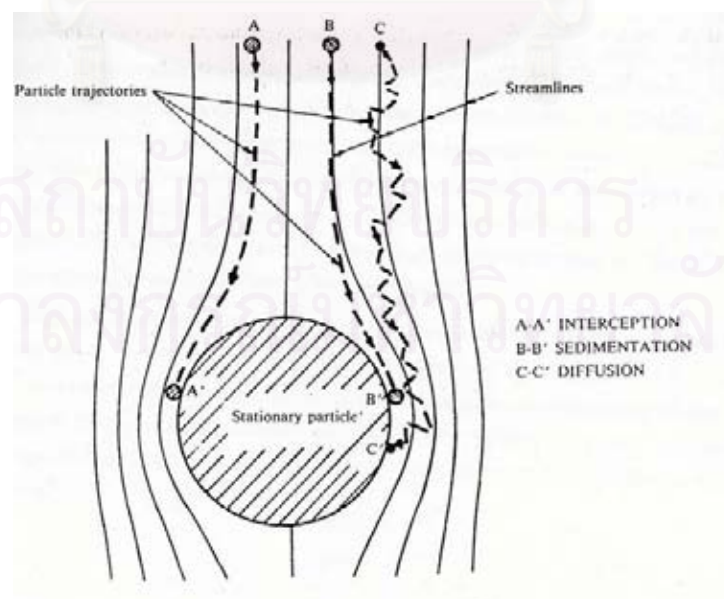
กลไกการกรองน้ำประกอบด้วยกลไก 2 กลไก(มันสิน, 2538)

1.กลไกเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง(Transport Mechanism) สารแขวนลอยสามารถเคลื่อนเข้าหาสารกรองได้สองลักษณะ ลักษณะแรกเป็นของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian Diffusion) ซึ่งอาศัยแรงจากการแพร่(Diffusion Force) ลักษณะที่สองเป็นของสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ แล้ววิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง(Interception)

ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สำหรับสารกรองที่มีขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ กล่าวโดยสรุปคือขนาดและการกระจายขนาด (Size Distribution) มีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยเข้าหาสารกรองอย่างมาก เมื่อขนาดของสารแขวนลอยมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน การแพร่กระจายจะเป็นตัวทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเข้าสารกรองได้มากกว่า แต่เมื่อขนาดของสารแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะมีบทบาทสำคัญใการสร้างกลไกการตกตะกอนและติดค้าง (Intercept)

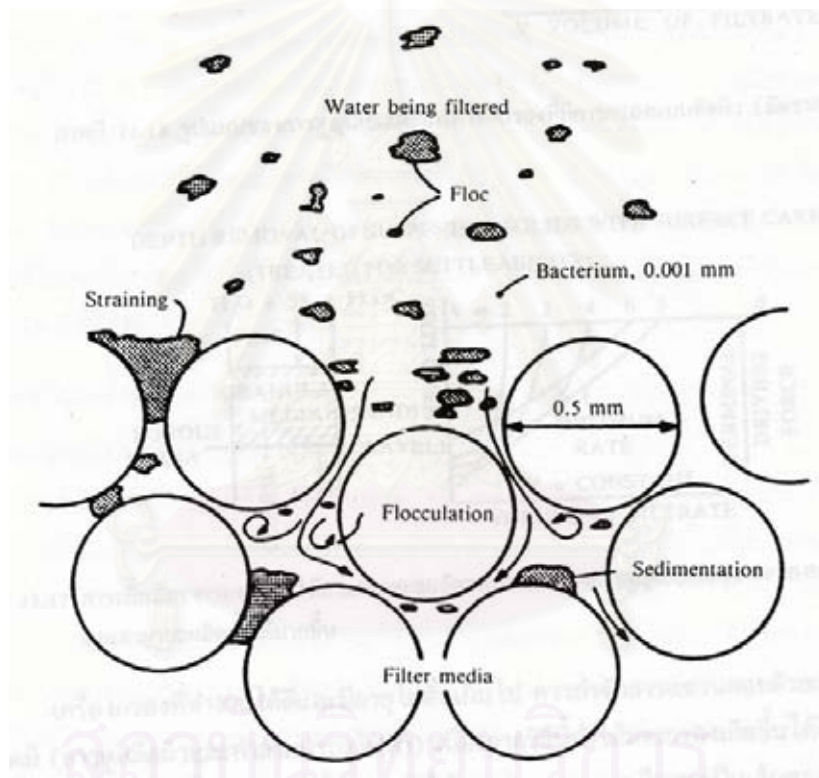


รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด(Yao,1971)



รูปที่ 2.5 แสดงกลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง(Yao,1971)

2.กลไกการจับสารแขวนลอย(Attachment Mechanism) สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรือตกค้างในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากน้ำได้ นอกจากนี้ยังปรากฏว่าสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากน้ำได้ด้วย ซึ่งพบว่าอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในขบวนการโคแอกกูแลนต์ด้วยนั่นคือการดูดติดผิว(Adsorption) และการทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ให้เป็นกลาง(Charge neutralization)การดูดติดผิวเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์สามารถเกาะจับบนสารกรอง หรือสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อน (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 กลไกการกรองน้ำในเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว(Yao ,1971)

การกรองน้ำโดยอาศัยกลไกทั้งสองแบบมีผลต่อการกรองน้ำต่างกัน การตกตะกอนและการติดค้าง ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพจะเกิดที่ผิวหน้าของชั้นกรองหรือว่าที่ความลึกไม่เกิน 2-3 นิ้วจากผิวหน้า ทำให้เกิดการสูญเสียเสียด เครื่องกรองน้ำที่ทำงานได้ดีจะมีกลไกการกรองทั้งสองแบบเพื่อให้เกิดการกรองอย่างทั่วถึงชั้นกรอง และเกิดการกรองอย่างสม่ำเสมอ

การกรองน้ำโดยอาศัยกลไกทั้งสองแบบมีผลต่อการกรองน้ำต่างกัน การตกตะกอนและการติดค้าง ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพจะเกิดที่ผิวหน้าของชั้นกรองหรือว่าที่ความลึกไม่เกิน 2-3 นิ้วจากผิวหน้า ทำให้เกิดการสูญเสียเสด เครื่องกรองน้ำที่ทำงานได้ดีจะมีกลไกการกรองทั้งสองแบบเพื่อให้เกิดการกรองอย่างทั่วถึงชั้นกรอง และเกิดการกรองอย่างสม่ำเสมอ

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองน้ำ

1. การเตรียมน้ำก่อนกรอง(Pretreatment)

การกรองน้ำดิบที่มีความขุ่นโดยตรง มักจะไม่ได้น้ำใสเท่าที่ควรทั้งที่ใช้อัตราการกรองที่ต่ำมาก เนื่องจากการที่คอลลอยด์และสารแขวนลอยในน้ำมักมีประจุลบเหมือนสารกรองดังนั้น โอกาสในการสัมผัสและเกาะติดกันจึงมีไม่มาก การเตรียมน้ำก่อนการกรอง จึงมีความสำคัญต่อการกรองน้ำเป็นอย่างยิ่ง

2. ขนาดของสารกรอง

ขนาดของสารกรองเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องกรอง หากใช้สารกรองขนาดเล็ก เช่น ทราย จะผลิตน้ำคุณภาพสูง แต่ อายุการกรองสั้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้สารต่างๆ(Filter Aid) เช่น สารส้ม หรือโพลีเมอร์ ซึ่งช่วยให้การใช้สารกรองขนาดใหญ่ได้ และสูญเสียเสดต่ำ

3. คุณภาพน้ำดิบ

น้ำดิบที่เข้าเครื่องกรองเป็นปัจจัยชี้ว่าจะต้องเตรียมน้ำดิบก่อนการกรองหรือไม่ โดยปกติ น้ำดิบที่มีความขุ่นไม่เกิน 20-25 หน่วยความขุ่น สามารถกรองได้โดยตรง แต่หากความขุ่นมากกว่า ควรจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน

4. ความหนาของชั้นกรอง

ความหนาของชั้นกรองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดโอกาสการสัมผัสระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการกรอง ดังนั้นการเตรียมน้ำดิบสำหรับกรองก็จะเป็นการใช้ประโยชน์ชั้นกรองได้ตลอดทั้งความลึก

2.6.4 ประสิทธิภาพการกรอง

เครื่องกรองนั้น มีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดของแข็งและสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ สารสกปรกหลายประเภท เช่น ความขุ่น แบคทีเรีย สาหร่าย ไวรัส เหล็กและสังกะสีที่ถูกออกซิไดซ์แล้ว หรือว่าสารเคมีที่เติมก่อนหน้าการกรอง การที่การกรองน้ำเป็นกรรมวิธีในการบำบัดประเภทกายภาพและทางเคมี เป็นผลให้อยู่ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรหลายตัว ตัวแปรเหล่านี้ส่วนหนึ่งเป็นของน้ำที่เข้าเครื่องกรอง อีกส่วนหนึ่งของตัวเครื่องกรองเอง

ความสามารถในการกรอง(Filtrability) ถือ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากกว่าปัจจัยอื่นๆ และเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต่างของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ ความสามารถในการกรองอาจปรับปรุงโดยการเติมสารเคมีต่างๆลงไป เช่น โคแอกกูแลนต์ หรือโพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำก่อนที่จะนำไปกรอง

คุณสมบัติของสารกรองในเครื่องกรองน้ำที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกรองได้แก่ ขนาดและรูปร่างของสารกรอง ความพรุนของชั้นกรอง การเรียงตัวของสารกรอง ความลึกและการสูญเสียความดันในชั้นกรอง โดยทั่วไปประสิทธิภาพของถังกรองจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของสารกรองที่เล็กลง ความพรุนที่ลดลงหรือความลึกที่เพิ่มขึ้น

2.7 การดูดติดผิว(Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของของแข็ง โดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหล(ก๊าซ ของเหลว)ระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็งและตัวของไหลเอง การดูดติดผิวจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นกับบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ โดยที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับ จะเรียกว่าตัวถูกดูดติดผิว (Adsorbent) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะของตัวถูกดูดติดผิว เรียกว่าสารดูดติดผิว(Adsorbate) โดยทั่วไป ทฤษฎีการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ Physical adsorption ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อน และ chemical adsorption ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดและพื้นที่ผิวของของแข็งที่เป็นวัสดุดูดติดผิว

ความแตกต่างระหว่าง Physical adsorption และ chemical adsorption พอจะกล่าวสรุปได้ดังนี้ (Faus และ Aly.1987)

1. Physical adsorption เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือว่าถ่ายอิเล็กตรอนระหว่าง ตัวดูดและตัวถูกดูด กระบวนการนี้ เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่าย และเกิดขึ้นซ้ำเนื่องจากอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูดไปบนพื้นผิวของตัวดูด แต่ chemical adsorption จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมี เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วจะผันกลับได้ยากกว่า

- 2 physical adsorption เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใด บริเวณหนึ่งบนพื้นผิวของตัวดูดติดผิว แต่เกิดไปทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดติดผิว โดยที่โมเลกุลของตัว

ถูกดูดสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดติดผิวได้ ในขณะที่ Chemical adsorption เป็นกระบวนการที่เกิดเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่หรือบริเวณเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

2.7.1 สมดุลการดูดติดผิว(Adsorption Equilibrium)

กระบวนการดูดติดผิวในสารละลายจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารนั้นๆในตัวทำละลายและบนพื้นผิวของของแข็ง ในกระบวนการดูดติดผิวที่ดำเนินไปนั้นตัวถูกดูดติดผิวในสารละลายจะค่อยๆถูกดูดติดผิวไว้บนพื้นที่ผิวของของแข็งไปเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันตัวถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดผิวแล้วก็จะพยายามย้อนกลับออกมาสู่สารละลาย และตัวถูกดูดติดผิวที่ยังไม่ถูกดูดติดผิวก็จะถูกดูดติดผิวตลอดเวลาเช่นกัน กระบวนการดังกล่าวมาข้างต้นนั้นเกิดขึ้นตลอดเวลา(Faust และ Aly,1987)

เมื่อเรานำเอาของแข็งที่เป็นตัวดูดติดผิวใส่ลงไปในสารละลายเพื่อให้เกิดกระบวนการดูดติดผิว หรือในทางกลับกันที่เราเทสารละลายลงในภาชนะที่มีของแข็งที่เป็นตัวดูดติดผิวอยู่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็คือโมเลกุลในสารละลายก็จะถูกดูดติดผิวโดยตัวดูดติดผิวไปเรื่อยๆ และขณะเดียวกันโมเลกุลในสารละลายที่ถูกดูดติดผิวบนตัวดูดติดผิวแล้วก็จะย้อนกลับออกมาเช่นกัน ที่อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดติดผิวจากสารละลายสู่ตัวดูดติดผิวเท่ากับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดติดผิวกลับออกมาในระบบสารละลายเท่ากันจะเกิดสภาวะที่เรียกว่าสมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้เราจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวทั้งที่ในสารละลายหรือว่าที่พื้นผิวของของแข็ง ลักษณะของสมดุลการดูดติดผิวนั้น มีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น โดยทั่วไปอัตราการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1). ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวที่ผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว โดยกลไกการดูดติดผิวที่ผิวภายนอกของสารที่ไม่มีโพรงจะมีอัตราการดูดติดผิวที่เป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว สำหรับสารดูดติดผิวที่มีโพรง อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Diffusion ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดติดผิว

2). ลักษณะของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการละลายน้ำของสารละลายและของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิว ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือน้ำ ดังนั้นเมื่อตัวถูกละลายมีคุณสมบัติในการละลายในน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีและมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงก็ยากที่จะดูดติดผิวได้ดี ดังนั้นสารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายจะสามารถถูกดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิวหากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นกลไกการควบคุมการดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลตัวถูกละลาย

3). พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน สามารถถูกดูดติดผิวได้ค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดผิวไอออนอื่น ๆ จึงมีผลกระทบเนื่องจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆด้วย

4). อุณหภูมิ

การดูดติดผิวโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังสมการ



เมื่อ A = สารถูกดูดติดผิว

S = พื้นที่ผิว

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายของสารบางชนิดด้วย

5). ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นกับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดติดผิวจะมีความหนากว่าและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดติดผิวดังนั้นการแพร่ภายนอกก็จะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดติดผิว ในกรณีของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ความปั่นป่วนภายในถังก็คือความเร็ว

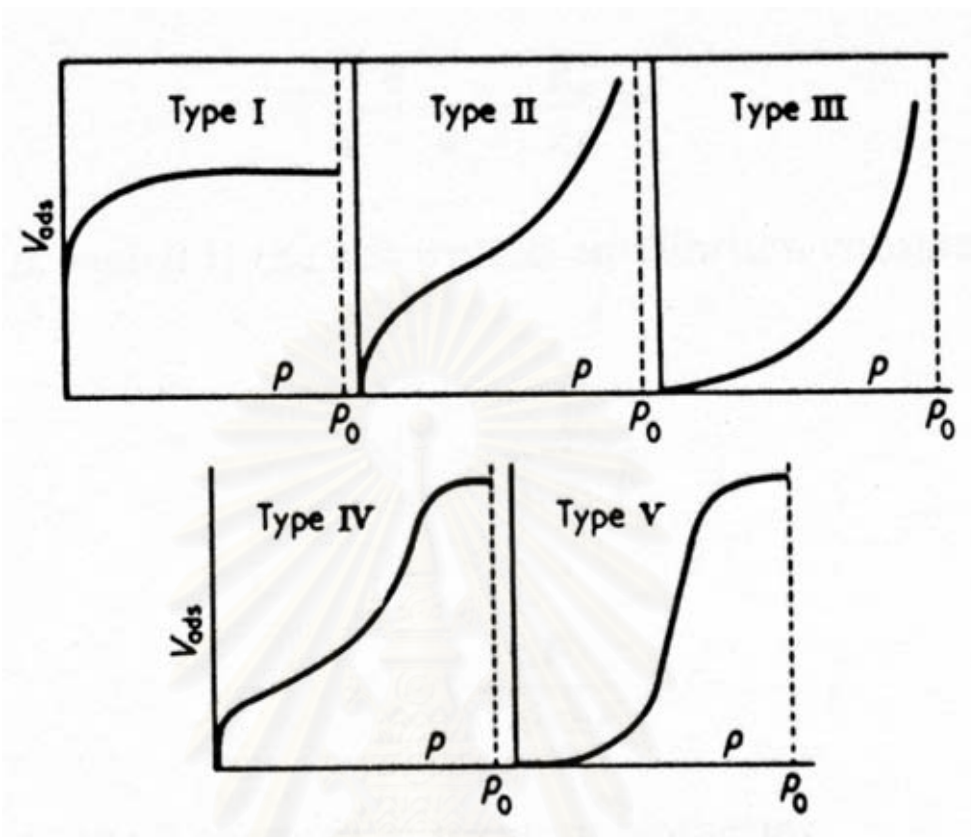
ของสารละลายที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของถัง ซึ่งจะทำให้อัตราการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

6). เวลาสัมผัส

ในกรณีของถังดูดซับแบบคอลัมน์ เวลาสัมผัสจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งานของถัง โดยถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวถูกลดลงแล้วอายุการใช้งานของถังดูดซับแบบคอลัมน์จะนานขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้ว แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

2.7.3 ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm)

โดยทั่วไปปริมาณของตัวถูกลดที่จุดสมดุลจะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกลดในสารละลายมากขึ้น ในการกระบวนการดูดซับ ปริมาณของตัวถูกลดต่อ 1 หน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ ที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น ณ จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการแสดงปริมาณของตัวถูกลดที่ถูกลดต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการการดูดซับ ลักษณะการดูดซับของพื้นที่ตัวดูดซับในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับ รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้ไอโซเทอมการดูดซับแบบที่ 1 เป็นการดูดซับซึ่งมีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนผิวของสารดูดซับ แบบที่เหลือเป็นการดูดซับโดยที่มีโมเลกุลหลายชั้นบนผิวของสารดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการดูดซับที่เกิดระหว่างสารละลายซึ่งเป็นตัวถูกลดดูดซับกับตัวดูดซับที่เป็นของแข็งนั้น ไอโซเทอมการดูดซับมักจะอยู่ในสองรูปแบบคือ แบบที่ 1 L-shape และแบบที่ 3 หรือ 5 ซึ่งมีลักษณะเป็น s-shape โดยการดูดซับแบบ L-shape จะเป็นการดูดซับที่มีโมเลกุลตัวถูกลดเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และมีการรบกวนจากตัวทำละลายน้อย ส่วนแบบ s-shape เป็นการดูดซับที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างตัวถูกลดดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับ เกิดกลไกการดูดซับร่วม (Co-operative adsorption) โดยที่เงื่อนไขที่จะเกิดไอโซเทอมการดูดซับแบบ L หรือ S มักจะเกิดกับสารละลายที่ตัวถูกลดมีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น (Rouquerol, 1999)



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะรูปร่างของ Isotherm ของการดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) 5 แบบ

ไอโซเทอมการดูดติดผิวมีหลายรูปแบบ เป็นผลมาจากการพัฒนาความรู้และสังเกตจากการทดลอง โดยมีหลายสมการ ดังนี้

2.7.3.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คือ

1. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว
2. มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดติด
3. พื้นที่ของบริเวณดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดติดผิวมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดติดผิวจากสารละลายโดยสารดูดติดผิว แสดงได้ดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \dots\dots\dots (2.5)$$

โดย X = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลาง(มิลลิกรัมหรือโมล)

X_m = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว(Monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

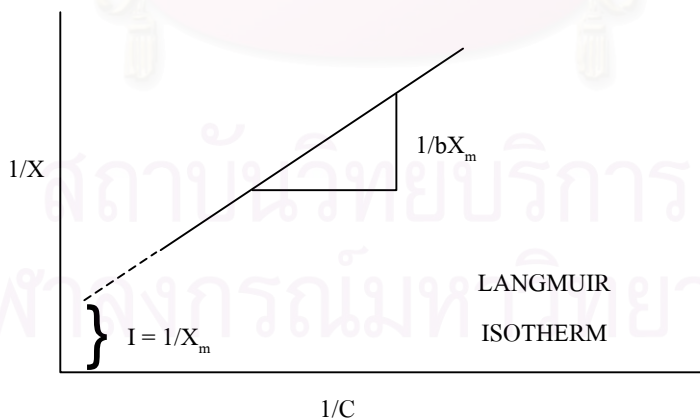
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ ∞ จะเขียนสมการได้เป็น

$$C_e / X = (1 / bX_m) + (C_e / X_m) \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1 / X = (1 / X_m) + (1 / C_e)(1 / bX_m) \dots\dots\dots (2.7)$$

เขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ จากสมการ 2.6 และ 2.7 แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

2.7.3.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที (BET: Brunauer–Emmett–Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีทีที่พัฒนามาจากไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ โดยจากการดูดติดแบบชั้นเดียว (monolayer) เป็นการดูดติดแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดติดผิวชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดติด เช่นเดียวกันกับชั้นอื่นๆ ต่อไป โดยแสดงได้ดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e)(1 + (b - 1)C_e / C_s) \quad \dots\dots (2.8)$$

โดย X = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลาง (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

X_m = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

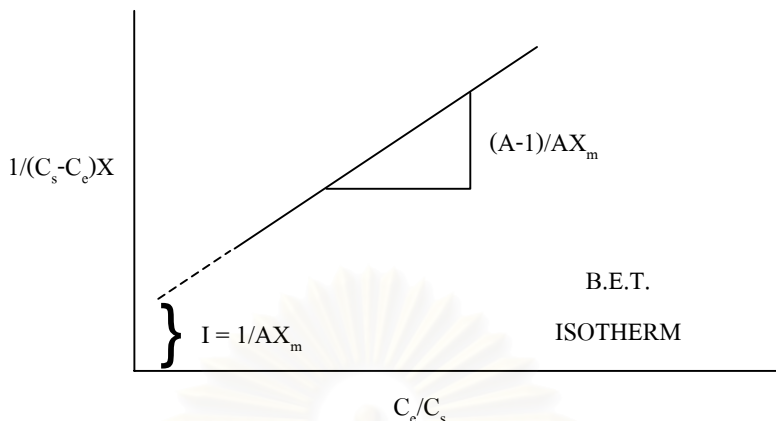
C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.8 สามารถเปลี่ยนได้เป็น

$$C_e / X(C_s - C_e) = (1 / X_m b) + ((b - 1) / X_m b)(C_e / C_s) \quad \dots\dots (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e / X(C_s - C_e)$ กับ C_e / C_s ซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน $(b-1)/X_m b$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m b$ จากสมการ 2.8 และ 2.9 แสดงได้ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีที

2.7.3.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้ คือ

$$X / m = KC_e^{1/n} \dots\dots\dots (2.10)$$

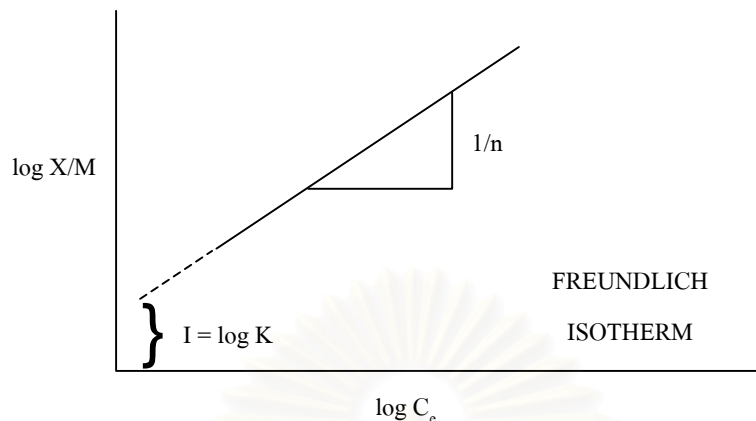
โดย

- X = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติด(mgหรือMole)
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล(โมล/ลิตร)
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของตัวกลาง
- 1/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว
- m = น้ำหนักของสารดูดติดผิว (กรัม)

จากสมการที่ 2.10 สามารถเขียนสมการในรูป logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log(X / m) = \log K + 1 / n \log C_e \dots\dots (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log (X/m) กับ logC_e จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 1/n และ log K จุดตัดแกน y ของ log (X/m) ที่ logC_e = 0 (C_e = 1) จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

2.8 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์(The Adsorption column)

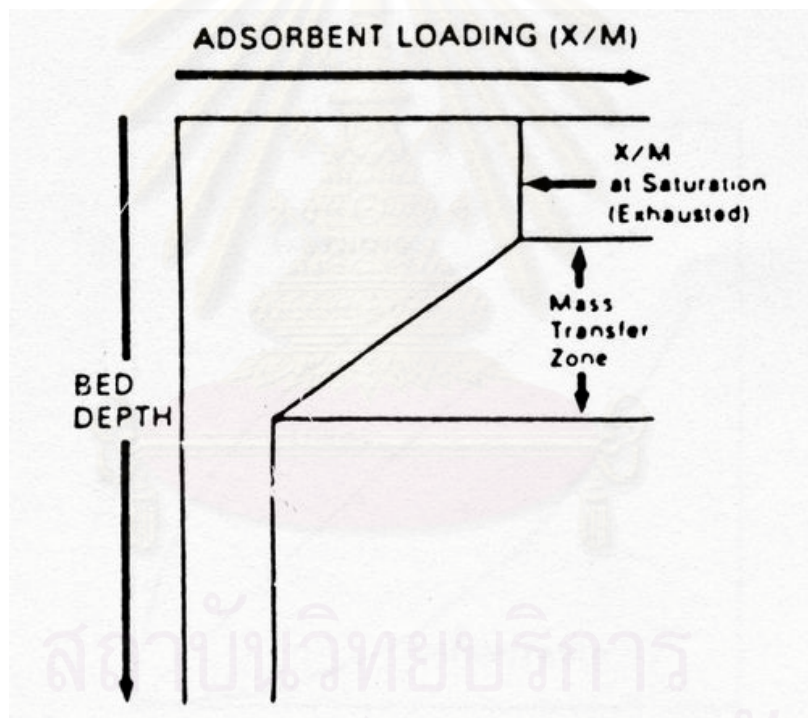
ในกระบวนการทดลองแบบ Batch ปริมาณของตัวดูดติดผิวที่รู้แน่นอนและเพียงพอจะถูกผสมลงไปในการละลายที่มีตัวถูกดูดติดผิว เมื่อให้เวลาการสัมผัสที่เหมาะสมจนกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นสมบูรณ์ ตัวดูดติดผิวและตัวถูกดูดติดผิวก็จะถูกแยกจากสารละลายก็เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดสารที่ไม่ต้องการในสารละลาย

ในการประยุกต์ใช้งานกระบวนการดูดติดผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีของเหลวหรือของไหลไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง มักจะการใช้กระบวนการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ซึ่งจะมีตัวดูดติดผิวบรรจุอยู่ภายในถังและให้ของเหลวหรือของไหลไหลผ่านและเกิดกระบวนการดูดติดผิวเอาสารที่ไม่ต้องการออกจากของไหล กระบวนการดูดติดผิวโดยอาศัยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการแบบ Batch (Faust และ Aly ,1987)จุดเริ่มต้นกระบวนการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ สารดูดติดผิวจะสัมผัสกับละลายที่มีตัวถูกดูดติดผิวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวดูดติดผิวจะทำตัวเหมือนเป็นชุดของชั้นดูดติดผิว ซึ่งแต่ละชั้นจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่ไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นการใช้ตัวกลางให้สามารถดูดติดผิวได้เต็มความสามารถของตัวกลางโดยพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายที่คงที่(ตัวกลางสัมผัสกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดที่ตลอดเวลา) ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการแบบ Batch ที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดในสารละลายจะลดลงเรื่อยๆ(เนื่องจากถูกดูดติดผิวออกจากสารละลายอยู่เรื่อยๆ)

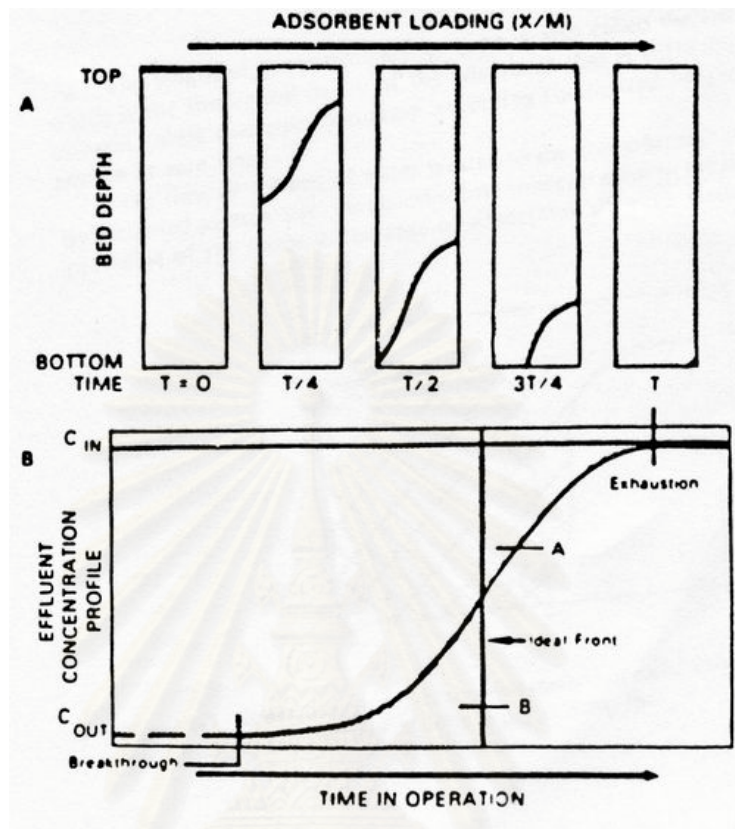
2.8.1 The Breakthrough Curve และ เขตการถ่ายเทมวลสาร(Mass Transfer Zone)

เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ หน้าคลื่น(Wave Front)หรือเขตถ่ายเทมวลสาร(Mass Transfer Zone)จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดติดผิวสารละลายในชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวที่ผิวของ

ตัวดูดติดผิวตามความลึกของชั้นตัวดูดติดผิว เมื่อสารละลายไหลผ่านเข้าไปในชั้นตัวดูดติดผิว ตัวดูดติดผิวจะถูกดูดติดผิวที่ชั้นบนของชั้นตัวกลางจนกระทั่งถึงจุดสมดุลของตัวดูดติด ณ ขณะนี้ตัวดูดติดผิวได้ดูดติดผิวไว้จนเต็มความสามารถในการดูดติดผิวแล้ว ที่ชั้นถัดลงไปเป็นชั้นที่กระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นและตัวดูดติดผิวกำลังถูกดูดด้วยตัวดูดติดผิว บริเวณที่เกิดการดูดติดผิวอยู่นี้เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล(Mass Transfer Zone) ความหนาของเขตถ่ายเทมวลนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัวดูดติดผิวที่อยู่ในสารละลาย ลักษณะของตัวดูดติดผิวและ hydraulic Factor ของถังดูดติดผิวเอง และเมื่อเขตถ่ายเทมวลเคลื่อนที่ลงไปจนกระทั่งจุดล่างสุดของถังดูดติดผิว ที่จุดนี้เรียกว่า จุด breakthrough ซึ่งหมายถึงจุดที่ตัวดูดติดผิวในสารละลายหลุดออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 เขตการถ่ายเทมวล(Mass Transfer Zone) ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์



รูปที่ 2.12 ลักษณะโดยทั่วไปในการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Faust และ Aly, 1987) เวลาหรือปริมาตรของน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough ซึ่งเป็นจุดที่บอกว่าถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์หมดความสามารถในการบำบัดจะมากหรือน้อย ขึ้นกับ

- ขนาดของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดติดผิว เมื่อขนาดของตัวกลางเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง
- ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ไหลผ่านถังดูดติดผิว เมื่อเพิ่มความเข้มข้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง
- พีเอชของสารละลายที่ไหลผ่าน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง เมื่อตัวถูกละลายเป็นสารที่มีการแตกตัวในน้ำได้น้อย

- อัตราการไหลของสารในถังดูดติดผิว(hydraulic load, volume/area/time) เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดซับแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง

ปัจจัยดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเงื่อนไขในกรณีที่ Breakthrough curve เป็นรูปตัว S แต่ในสารละลายที่มีไอออน หรือตัวถูกดูดติดผิวมากกว่าหนึ่งตัว หรือกรณีของการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง จะมีปัจจัยอื่นเป็นตัวร่วมกำหนดลักษณะของ Breakthrough curve เช่น การแข่งขันการดูดติดผิว การแทนที่ตัวถูกดูดติดผิวได้ไม่ดีด้วยตัวถูกดูดติดผิวได้ดี เป็นต้น ซึ่งทำให้ breakthrough curve ไม่เป็นรูปตัว S

2.9 คอนกรีต(Concrete)

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างเปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเป็นโครงสร้าง เป็นของผสมที่เกิดจากการผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุผสมคละ อันได้แก่ ทราย หิน ปูน กรวดและน้ำเข้ากันด้วยสัดส่วนที่กำหนด โครงสร้างคอนกรีตที่เห็นกันอยู่ทั่วไปได้แก่ พื้น คาน เสาของอาคาร พื้นถนน เป็นต้น องค์ประกอบของคอนกรีตที่ใช้งานโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ ซีเมนต์เพสต์(Cement Paste)และวัสดุผสม(Aggregate)

1. ซีเมนต์เพสต์(Cement Paste) เป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ไฮเดรชัน(Hydration) ระหว่างกันจะทำให้กลายเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติจับเกาะแน่นกับวัสดุผสม

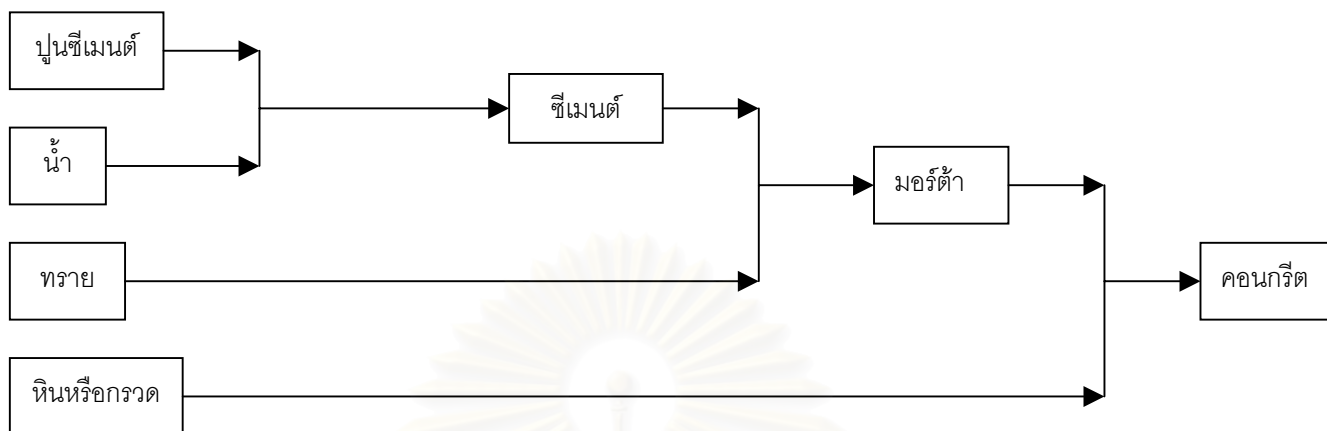
2. วัสดุผสม(Aggregate) หรือบางที่เรียกว่ามวลรวม โดยทั่วไปได้แก่หินย่อย กรวด และทรายหยาบ

วัสดุผสมแบ่งตามขนาดได้เป็นสองประเภท

- วัสดุผสมละเอียด(Fine Aggregate)หมายถึงวัสดุผสมที่มีขนาดเล็ก สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ ทราย
- วัสดุผสมหยาบ(Coarse Aggregate)หมายถึงวัสดุผสมที่มีก้อนโตไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ หินย่อยหรือกรวด

นอกจากนี้ในเนื้อคอนกรีตอาจมีสารผสมเพิ่ม(Admixture) เช่นสารเคมีผสมเพิ่ม(Chemical Admixture)หรือสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ(Mineral Admixture) ที่ใช้เติมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ

เมื่อนำส่วนต่างๆเหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต(ชัชวาล,2537)

2.9.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการบดเม็ดปูน ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ อันได้แก่ หินปูน(Limestone)หรือดินปูนขาว(Marl) กับดินเหนียว(Clay)หรือหินดาน(Shale)ในสัดส่วนที่ถูกต้อง นอกจากนี้ยังอาจมีการเติมแร่เหล็ก(Iron Ore) หรือยิปซัม(Gypsum)ตามความจำเป็น เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามต้องการ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับวัสดุละเอียดจำพวกหินย้อยหรือกรวดกับทรายหยาบ ก็จะกลายเป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วก็จะมี ความแข็งแรงและทนทานคล้ายหินปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นใช้งานมากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(Portland Cement)

2.9.1.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบจำพวกแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอลูมิเนตเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งได้จากการเผาวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์(CaO)ซิลิกอนไดออกไซด์(SiO₂)อลูมิเนียมออกไซด์(Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์(Fe₂O₃) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเกิดเป็นเม็ดปูน(Clinker)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่(Calcareous Material) ซึ่งอยู่ในรูปของ CaCO₃ ได้แก่ หินปูน(Limestone) ดินสอพอง หรือ ชอล์ก(Chalk) ดินปูนขาว(Marl)
2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของซิลิกอน(SiO₂) และอลูมิเนียม(Al₂O₃) เป็นส่วนใหญ่ (Algrillaceous Material) ได้แก่หินดานหรือหินเชล(Shale) ดินดำหรือดินเหนียว(Clay) หินชนวน(Slate) ซึ่งสารเหล่านี้มักประกอบด้วยแร่ดินต่างๆ เช่น คาโอลิไนต์(Kaolinite)

อิลไลต์(Illite) และมอนต์มอริลโลไนต์(Montmorillonite) ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวก
อลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำผลึก(Hydrous Aluminum Silicate) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่
สำคัญคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3

ซึ่งเมื่อเผาวัตถุดิบเหล่านี้ ก็จะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบใน
รูปเม็ดปูนที่ละเอียดมาก ที่มีองค์ประกอบต่างๆดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต(Dicalcium Silicate, C_2S) มีสูตรทางเคมีคือ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต(Tricalcium Aluminate, C_3A) มีสูตรทางเคมีคือ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
4. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์(Tetracalcium Aluminoferrite), C_4AF มีสูตรทางเคมีคือ
 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

สารประกอบเหล่านี้มีส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

	Oxide Formula	Amount(% by wt)
Portland cement		
Tricalcium Silicate	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	46
Dicalcium Silicate	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	28
Tricalcium Aluminate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	11
Tetracalcium Aluminoferrite	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	8
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3
Magnesia	MgO	3
Calcium Oxide	CaO	0.5
Sodium, Potassium Oxide	$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$	0.5

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO TiO_2 Mn_2O_3 K_2O และ
 Na_2O ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขณะที่สารประกอบไตรแคลเซียม
ซิลิเกต(C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต(C_2S)รวมกันเป็นปริมาณถึง 70-80 % ของปริมาณทั้งหมด

2.9.1.2 ปฏิกิริยาระหว่างปูนกับน้ำ(Hydration of cement)(วินิต ก่อวิเชียร,2538)

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ขององค์ประกอบของซีเมนต์
โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสองลักษณะคือ

- อากาศละลาย โดยที่ซีเมนต์จะละลายน้ำก่อนให้เกิดไฮดรอกไซด์ในสารละลาย ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะผสมกันก่อนให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นมา
- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอากาศละลายและช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

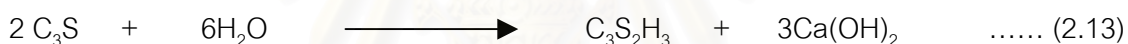
ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลายชนิดซึ่งมีปฏิกิริยาไฮเดรชันแตกต่างกันดังนี้

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (ทั้ง C_3S และ C_2S)

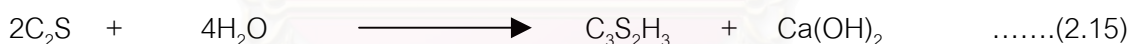
แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในสมการที่ 2.12



หรือเขียนได้ ว่า



หรือเขียนได้



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น จะเกิด Gel ของ Calcium Silicate Hydrate, CSH ที่เมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญสองประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน และได้ $Ca(OH)_2$ เป็นผลพลอยได้ ซึ่งทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก (12.5) (รูปที่ 2.14)



ที่มา : ชัชวาล ,2537



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต(Tricalcium Aluminate, C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต จะเกิดขึ้นทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัว

อย่างรวดเร็วของซีเมนต์เฟสต์ ดังสมการที่ 2.16



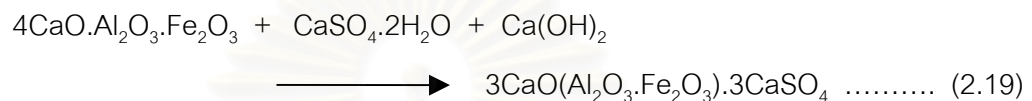
เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีการเติมยิบซั่ม($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ลงไปในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ยิบซั่มที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ



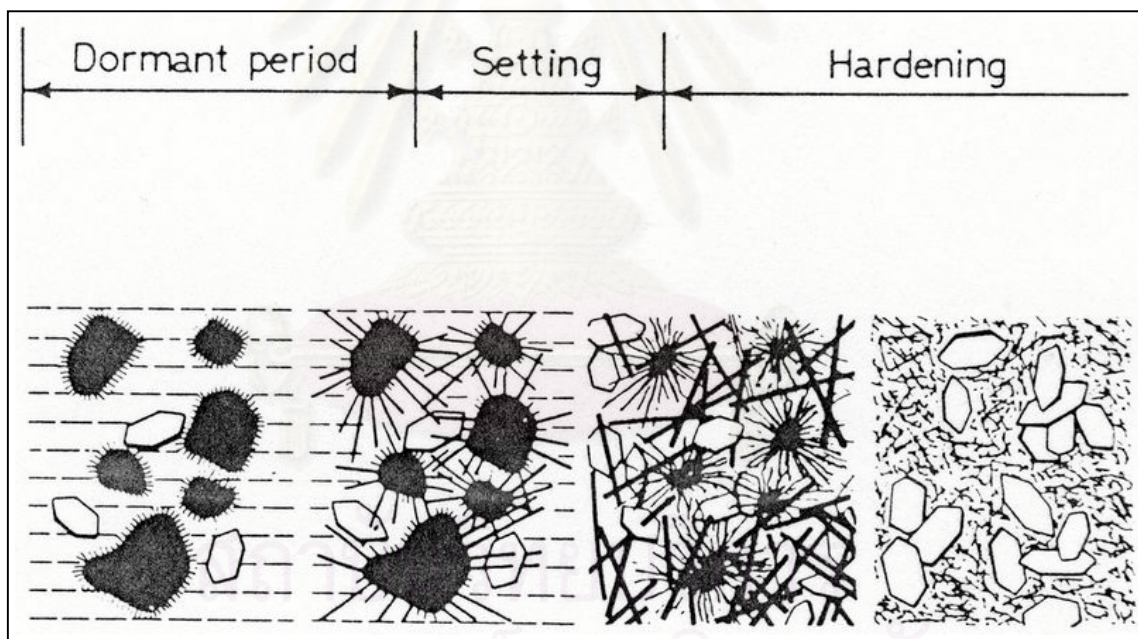
เมื่อ Sulfate ที่มาจากยิบซั่มเหลือไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็น Ettringite ก็เกิดไฮเดรชันของ C_3A ต่อจนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา โดย Ettringite ที่เกิดจะเปลี่ยนไปเป็น Monosulfate

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF จะเกิดในช่วงต้น โดยที่ C_4AF จะทำปฏิกิริยากับ ยิบซั่มและ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoferrite ดังสมการที่ 2.19



ผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบหลักทั้งสี่ จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จนเมื่อ Ettringite หมดไปก็จะเกิดไฮเดรชันเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย



ที่มา : ชัชวาล ,2537

รูปที่ 2.15 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

จากรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงขบวนการเกิดไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยที่ซีเมนต์จะแสดงด้วยเส้นสีดำ $Ca(OH)_2$ แสดง ด้วยรูปเหลี่ยม และผลึก Ettringite แสดงด้วยเส้นสีเขียว ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในช่วงชั่วโมงแรก ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Ettringite หลังจากนั้น CSH gel จะเริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว และหลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไป C_3S และ C_2S

จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นเส้นใย CSH กลายเป็นวัสดุเชื่อมประสานวัสดุผสมเกิดเป็นคอนกรีต ใช้งานต่อไป

2.10 ทบวนเอกสาร

Aziz, H.A., et al, 2001 ทำการทดลองกำจัด ทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 2-60 mg/L โดยทำการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองแบบ Batch และ การทดลองด้วยกระบวนการกรอง การทดลองแบบ Batch มีการศึกษาตัวกลาง 3 แบบ คือ หินปูน(Limestone) ถ่านกัมมันต์(Activated Carbon) และหินปูนผสมถ่านกัมมันต์ ส่วนการทดลองกระบวนการกรอง เป็นกระบวนการกรองแบบไหลขึ้น ซึ่งจากการทดลองแบบBatch พบว่า ที่ความเข้มข้นของทองแดงต่ำ (0- 20 mg/L) และใช้ตัวกลางคือ หินปูนน้อย (ปริมาณระหว่าง 0-20 กรัม) % การกำจัดมีค่าไม่มากนัก(น้อยกว่า 80%) แต่ที่ความเข้มข้นของทองแดงสูง(30-60 mg/L) และใช้หินปูนน้อย(0-40 กรัม) % การกำจัดจะดีกว่า(80 % ขึ้นไป) และในการทดลองเกี่ยวกับค่าพีเอช พบว่าเมื่อกำหนดค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 7 พีเอชท้ายจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อใช้ หินปูนมากขึ้น ค่าพีเอชของสารละลายท้ายจะมีค่ามากขึ้น และเมื่อน้ำหนักหินปูนมากขึ้นถึงระดับหนึ่งค่าพีเอชของสารละลายท้ายจะไม่แตกต่างกันและพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีค่ามากกว่า 90 % เมื่อใช้หินปูนตั้งแต่ 20 กรัมขึ้นไป

ในการทดลองการกรอง ซึ่งมีการไหลแบบไหลขึ้น พบว่าสารละลายที่ออกจากถังกรองมีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ประมาณ 7 เป็น 8 และ ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 % ในช่วง 10 วันแรก ที่ Retention time 2.31 ชม. Surface Loading 4.07 m³/m² per day และในการทดลองเพื่อศึกษาการปรับค่าความเป็นกรดต่างว่ามีผลต่อการกำจัดทองแดงหรือไม่ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงในสารละลายไม่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างอย่างเดียว

Aziz, H.A. and Smith, P, 1996 ทดลองกำจัด Mn ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 1 mg/L ด้วยเทคนิคการกรอง โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของตัวกลาง ความหนาของชั้นกรอง ขนาดของตัวกรอง และอัตราการกรอง ในการทดลองแบบ Batch กับตัวกลาง 3 ชนิด พบว่า หินปูนมี % การกำจัด Mn มากที่สุด รองลงมาคืออิฐหุบ และทรายตามลำดับ ในการศึกษาปัจจัยทางด้านความหนาของชั้นกรอง พบว่า % การกำจัด Mn ที่ความหนาชั้นกรอง 500 mm. มากกว่า ที่ 250 mm. ในการศึกษาปัจจัยเรื่องขนาดของตัวกรอง จำนวน 2 ขนาด พบว่าตัวกลางขนาด 2 mm. การกำจัด Mn ได้ 85% ส่วนตัวกลางขนาด 4 mm. สามารถกำจัด Mn ได้ 82 % ส่วนในการศึกษา

ปัจจัยทางด้านอัตราการกรอง ที่ 10 ,20,40 และ80 ml/min โดยใช้หินปูนเป็นตัวกลางในการกรอง พบว่า ที่อัตราการกรองต่ำให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่า

Weng,C.H., et al 1996. ศึกษาปฏิสัมพันธ์ทางเคมีระหว่าง Cr (VI) และอนุภาคของคอนกรีต(Hydrous Concrete Particle)ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์(Synthetic Ground water)พบว่า กลไกหลักที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคคอนกรีตมี 3 กลไกด้วยกัน คือ redox reaction, Adsorption และ Precipitation โดยที่พีเอชเป็นตัวกำหนดกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Cr (VI) กับอนุภาคคอนกรีต โดยเมื่อพีเอช 4 Cr(VI) ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์จะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} ที่มาจากองค์ประกอบคอนกรีต เกิดกระบวนการ reduction กลายเป็น Cr(III) อยู่ในน้ำใต้ดินสังเคราะห์และถูกควบคุมด้วยค่าคงที่การละลายของ $Cr(OH)_3$ และจะตกตะกอนเมื่อพีเอชสูงขึ้น ส่วนในช่วงพีเอชของน้ำใต้ดินสังเคราะห์ระหว่าง 4-9 กลไกการดูดติดผิวจะเป็นกลไกหลักในการกำจัด Cr(VI) โดยที่มีกลไกสนับสนุนการเกิดกระบวนการดูดติดผิวก็คือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวของคอนกรีตกับ $HCrO_4^-$ ซึ่งพบว่า ที่พีเอช 6 การกำจัด Cr(VI) ได้ 100 % แต่เมื่อพีเอชของน้ำใต้ดินสังเคราะห์เป็นต่าง ผิวของเศษคอนกรีตจะรับโปรตอนได้น้อย(Less Protonated) ซึ่งทำให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวของอนุภาคคอนกรีตหลวมๆ(weak surface complex formation)

Feng Chin Wu 1999. ศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดติดผิว Cu(II) ด้วย ไคโตซาน โดยมี Chelating Agent 4 ชนิดคือ EDTA , Citric acid, Tartaric Acid และ Sodium Gluconate ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ไคโตซานมีความสามารถในการดูดติดผิว Cu(II) ได้ที่ 2.5 mole/Kg แต่เมื่อมี Chelating Agent ค่าความสามารถในการดูดติดผิวลดลง ในการศึกษาช่วงพีเอชต่างๆพบว่า กลไกที่สำคัญคือการรับโปรตอนของไคโตซาน ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการต่อเนื่องคือ การเกิดการ Coordination ระหว่าง Cu(II) กับไคโตซานที่ไม่ได้รับโปรตอน และการเกิดelectrostatic interaction ระหว่าง Cu ที่จับตัวกับ Chelating Agent กับ ไคโตซานที่รับโปรตอน ซึ่งเป็นกลไกการดูดติดผิวที่เกิดที่ผิวไคโตซาน ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิว Cu(II) โดยที่มี Chelating Agent นั้นคือ 3.1-4.2, 5.0-5.8, 5.0-6.0 และ 5.2-5.8 สำหรับ EDTA , Citrate, tartarate และ Gluconate ตามลำดับ ในการศึกษาสมการการดูดติดผิวพบว่าสมการการดูดติดผิวของ Langmuir สามารถอธิบายกระบวนการเกิดได้ดี($r^2 > 0.99$ ในทุกกรณี ทั้งมีและไม่มี Chelating Agent) โดยที่มีค่าความสามารถในการดูดติดผิว เป็น 0.5 mol/kg, 2.6 mol/kg, 4.29 mol/kg และ 2.48 mol/kg สำหรับ EDTA , Citrate, tartarate และ Gluconate ตามลำดับ

Lee .M.Y. et al 1998. ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10,50 และ 100 mg/L ด้วยกะดองปู(Crab Shell) ขนาด 25-100 mesh พบว่ากระบวนการตกตะกอน (Precipitation) ในรูป $PbCO_3$ และ การดูดติดผิวที่ผิวของกะดองปูเป็นกลไกหลักในการกำจัดตะกั่ว

ในน้ำเสียสังเคราะห์ ประสิทธิภาพในการกำจัด Pb ที่ดีนั้นอยู่ในช่วงพีเอชน้อยกว่า 3 และพบว่าเมื่อมีไอออนร่วมอื่นได้แก่ Cd^{2+} Cu^{2+} Fe^{2+} และ Zn^{2+} ที่ทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วทั้งสามความเข้มข้น ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลดลงอย่างมีนัยสำคัญนอกจากว่าความเข้มข้นของไอออนร่วมจะมีค่ามากกว่า 100 mg/L ในการศึกษาถึงช่วงเวลาการเขย่าต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า 99% ของ Pb ในน้ำเสียสังเคราะห์ถูกกำจัดได้ภายในเวลา 2 ชั่วโมงที่ทั้ง 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว โดยที่ใช้น้ำหนักของกะดองปฐมีค่าเท่ากับ 0.5 g/L ของน้ำเสียสังเคราะห์ ในการทดลองถึงความเข้มข้นของ ionic strength พบว่า $NaNO_3$ 1.0 M ไม่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ

Dimitrova, S.V. and Mehandjiev, D.R. 1998. ทำการศึกษาการกำจัด ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษตะกั่วจากโรงงานถลุงเหล็ก(Granulated Blasting Furnace Slag) จำนวน 4 ขนาด (< 0.25, 0.25-0.5, 0.5-0.63 และ 0.63-0.8 มิลลิเมตร) ในการศึกษาสมมูลของค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายกับปริมาณตะกั่วที่ใช้พบว่า เมื่อใช้ปริมาณตะกั่วที่นำมาทดลอง 1, 2, 3, 5 และ 10 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมงครึ่ง พบว่าที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายในช่วง 3.0-6.0 แล้วพีเอชท้ายเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.5-3.0 แต่หากพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย > 6 พีเอชหลังการทดลองเพิ่มขึ้นไม่ถึง 0.5 ในการศึกษาถึงพีเอชต่อ % การกำจัดตะกั่วในสารละลายพบว่าที่พีเอช < 5.5 กระบวนการดูดติดผิวเป็นกระบวนการหลักในการกำจัด แต่ที่พีเอช > 5.5 กระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการหลักในการกำจัดและพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยการดูดติดผิวอยู่ในช่วง 4.0-7.0 โดยขึ้นกับขนาดของกากตะกั่ว ส่วนพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยกระบวนการตกตะกอนอยู่ในช่วง 5.7-9.0 ในการศึกษาถึงปริมาณกากตะกั่วกับการกำจัดตะกั่ว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกั่ว % การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณกากตะกั่วที่เพิ่มขึ้น 1 หน่วยน้ำหนักแล้วค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วในสารละลายจะลดลง ซึ่งสรุปว่ากลไกการกำจัด Pb มีความซับซ้อนและไม่ใช้ด้วยกระบวนการตกตะกอนแต่น่าจะเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง สมดุลของความเป็นกรด-ด่างของไอออนต่างๆที่ละลายออกมาจากกากตะกั่วซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ว่าปริมาณกากตะกั่วที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเท่าใด ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง % การกำจัดตะกั่วกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นโดยที่ใช้ปริมาณกากตะกั่ว 1 กรัม/สารละลาย 1 ลิตร และพีเอช 5 พบว่าการกำจัด Pb ไม่ได้เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวจำเพาะของกากตะกั่ว และในการศึกษาถึงสมการการดูดติดผิวพบว่า สมการการดูดติดผิวของ Freundlich สามารถอธิบายการเกิดการดูดติดผิวได้

Dimitrova, S.V. 1996. ศึกษาการดูดติดผิว(Sorption)โลหะ 3 ชนิด คือ Cu Zn และ Ni ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-3} M ด้วยเศษกากตะกั่วจากเตาหลอมโลหะ ใน

การทดลองเรื่องผลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดโลหะ พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่ำ (5×10^{-4} M) ที่เวลาสัมผัส 150 นาที ทองแดงและสังกะสี ถูกกำจัด 100 % ส่วน นิกเกิลถูกกำจัดได้ 72% แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่า ในเวลาสัมผัสเท่ากัน พบว่า ทองแดงถูกกำจัด 60 % สังกะสีถูกกำจัด 46 % และนิกเกิลถูกกำจัด 32 % และพบว่าสัดส่วนของการกำจัดโลหะประมาณ 75% เกิดขึ้นในช่วงเวลาสัมผัส 75 นาทีแรก ในการศึกษาถึงสมการการดูดติดผิวของโลหะทั้งสามชนิดในสารละลายความเข้มข้นเดิมพบว่าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการดูดติดผิวของ Freundlich และมีค่าความสามารถในการดูดติดผิวสำหรับโลหะแต่ละชนิดคือ 2.1×10^{-3} mol/g สำหรับทองแดง , 0.95×10^{-3} mol/g สำหรับ นิกเกิล และ 1.58×10^{-3} mol/g สำหรับ สังกะสีตามลำดับ

นันทนา 2543. ศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู(ในรูป Anion, HAsO_4^{2-})ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 mg/L ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต 4 ขนาด(0.50-1.00,1.00-1.75,1.72-2.00 และ2.00 - 2.36 มิลลิเมตร)โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ การทดลองแบบ Batch และการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ในส่วนของการทดลองแบบ Batch พบว่าสมดุลการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อเวลาการสัมผัส 5 ชั่วโมง ในการทดลองถึงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการดูดติดผิว พบว่า เศษคอนกรีตแต่ละชนิดมีความสามารถในการกำจัดสารหนูได้ใกล้เคียงทุกระดับพีเอชเริ่มต้น และพบว่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ในการศึกษา ในการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวพบว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich เหมาะสมในการใช้ในการทดสอบการกำจัดสารหนู และพบว่าเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กกว่า มีความจุการดูดติดผิวมากกว่า และในการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์พบว่า ขนาดของเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการบำบัดน้ำที่สารหนูได้ในปริมาตรน้ำที่มากกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย(Solid Waste Laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการทดลอง

ในการทำการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบของเศษคอนกรีตที่ใช้ในการทำวิจัย

ทางกายภาพ

1. surface area
2. density & porosity
 - bulk density
 - skeleton density
3. SEM of surface
4. size distribution (effective size)
5. องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโดยเทคนิค X-ray Diffraction Spectroscopy ทางเคมี

1. CEC(Cation Exchange Capacity) ทำทดลองด้วยวิธี Direct Method

ส่วนที่ 2 ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ด้วยเศษคอนกรีต

1. ช่วงเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุล(Contact time) ของการกำจัดโลหะ
2. ช่วงพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะ
3. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ ฟรุนดิช (Freundlich Isotherm Test)

ส่วนที่ 3 ศึกษาลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์

1. พีเอช
2. ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลาย
3. ค่าของแข็งละลายทั้งหมด(Total Dissolved Solids)
4. ค่าความขุ่นของน้ำเสีย(Turbidity)

ส่วนที่ 4 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ศึกษาถึงสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการการกำจัดโลหะ ด้วยเศษคอนกรีตในสภาวะ batch

1) ช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในสภาวะสมดุล (Contact time)

การทดลองหาช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำโดย

- ชั่งเศษคอนกรีต ให้ได้น้ำหนักใกล้เคียง 1 กรัมมากที่สุด ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. จำนวน 3 ใบ
- นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้จำนวน 50 มล. ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ใบ
- นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า โดยที่เขย่าเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที
- หลังจากเขย่าจนได้ตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้มากรองแยกเศษคอนกรีตออก โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- นำสารละลายที่ได้จากการกรอง มาวัดค่าความเป็นกรดต่าง แล้วนำไปวัดค่าปริมาณโลหะที่เหลือ
- ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นแต่เปลี่ยนช่วงเวลาการเขย่าเป็น 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ แล้วนำไปวัดพีเอช และค่าความเข้มข้นของโลหะที่เหลือ
- ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนข้างต้นโดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะอีก 4 ชนิดที่เหลือ
- plot graph เพื่อดูช่วงเวลาที่มีการดูดติดผิวเข้าสู่สมดุล

2) ช่วงพีเอชที่เหมาะสม

การทดลองหาช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม ทำโดย

- ชั่งเศษคอนกรีต ให้ได้น้ำหนักใกล้เคียง 1 กรัม มากที่สุด ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. จำนวน 3 ใบ
- นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มาปรับค่าความเป็นกรดต่าง โดยปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเป็น 4 ด้วยสารละลาย NaOH 0.1 N แล้วดูน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จำนวน 50 มล. ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ จำนวน 3 ขวด
- นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาในเขย่า เป็นเวลาเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดติดผิว ที่ได้จากการทำการทดลองในขั้นตอนเรื่องช่วงเวลาที่เหมาะสม

- หลังจากเขย่าจนได้ตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้มากรองแยกเศษคอนกรีตออก โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

- นำสารละลายที่ได้จากการกรอง มาวัดค่าความเป็นกรดต่าง แล้วนำไปวัดค่าปริมาณโลหะที่เหลือ

- ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองขั้นต้น แต่ปรับเปลี่ยนพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยสารละลาย HCl 0.1 N และ สารละลาย NaOH 0.1 N โดยปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 5,6,7,8,9 ตามลำดับ

- ทำเช่นเดียวกับการทำการทดลองขั้นต้น แต่เปลี่ยนชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะอีก 4 ชนิดที่เหลือ

3. ทดสอบ Isotherm การดูดติดผิวแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm test)

การทดสอบ ไอโซเทอมการดูดติดผิวทำโดย

- ชั่งเศษคอนกรีต ให้ได้น้ำหนักใกล้เคียง 0.0100 กรัมมากที่สุด ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด

- นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มาปรับพีเอช ให้ได้ค่าตามที่ทำการทดลองหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม แล้วดูมา 50 มล. ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด

- นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาในเขย่า เป็นเวลาเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดติดผิว ที่ได้จากการทำการทดลองในขั้นตอนเรื่องช่วงเวลาที่เหมาะสม

- หลังจากเขย่าจนได้ตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้มากรองแยกเศษคอนกรีตออก โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

- นำสารละลายที่ได้จากการกรอง มาวัดค่าความเป็นกรดต่าง แล้วนำไปวัดค่าปริมาณโลหะที่เหลือ

- ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยน น้ำหนักเศษคอนกรีต โดยเปลี่ยนเป็น 0.0200 , 0.0400 , 0.100 , 0.200 , 0.400 และ 1.0000 กรัม ตามลำดับ

- ทำเช่นเดียวกับการทำการทดลองขั้นต้น แต่เปลี่ยนชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะอีก 4 ชนิดที่เหลือ

3.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดสอบแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

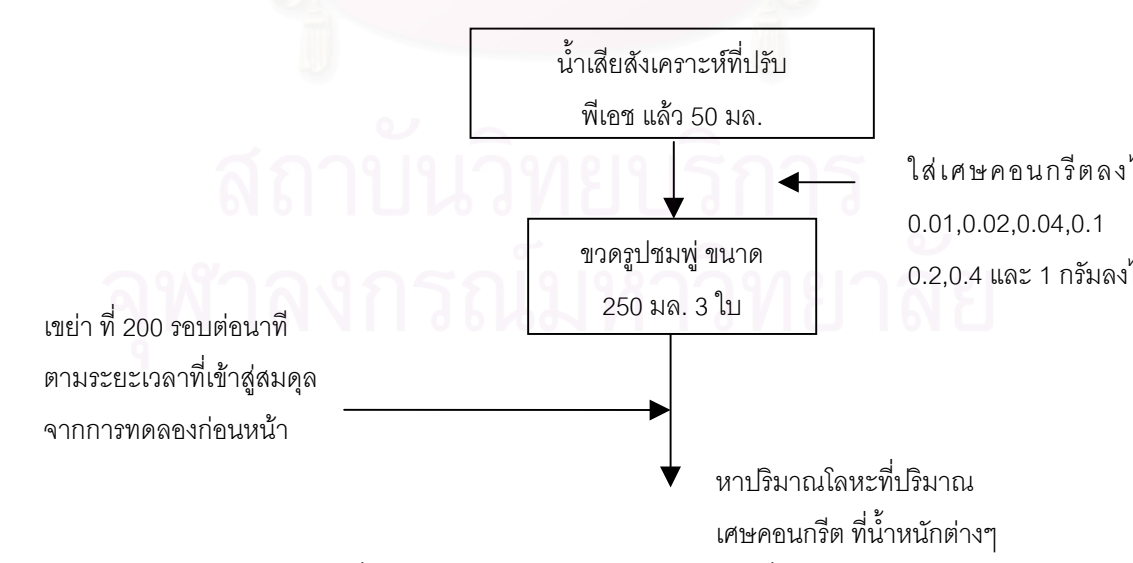
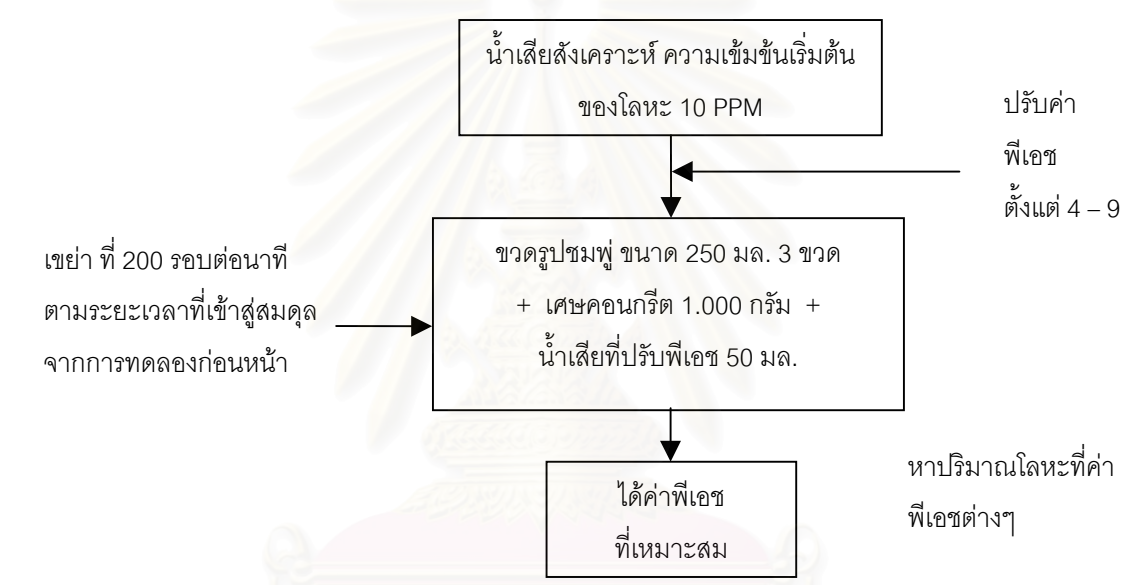
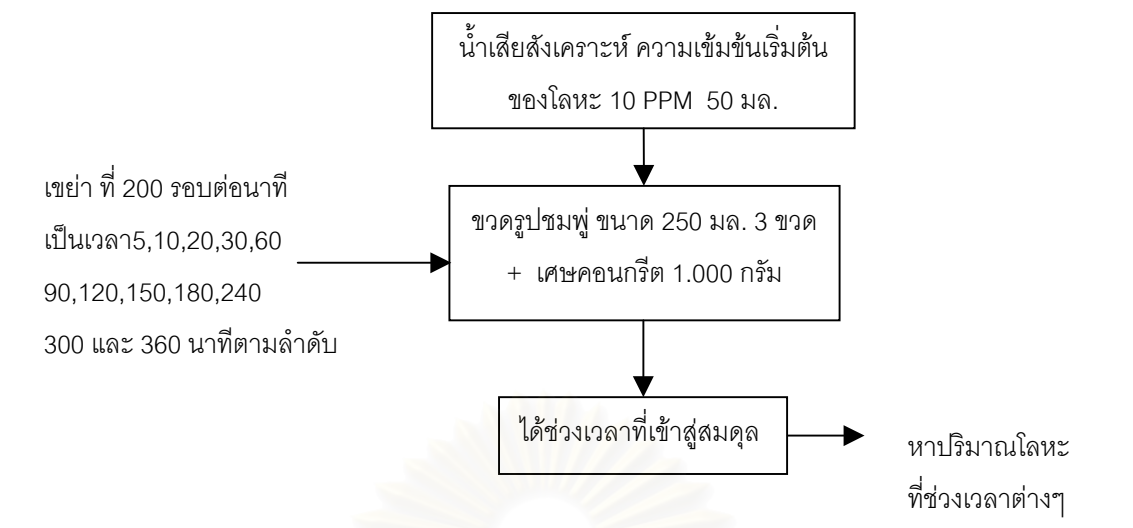
ขั้นตอนการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

- สูบน้ำเสียที่มาจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์ในถังด้านล่างขึ้นไปบนถังเก็บที่อยู่ด้านบนสำหรับเป็นถังน้ำเสียสำหรับปล่อยลง(down flow)สู่ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์
- ปล่อยน้ำเสียที่อยู่ในถังเก็บด้านบนลงมาตามสายยางที่ด้านล่างของถังลงมายังถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ โดยปรับวาล์วที่สายยางให้มีอัตราการไหลเข้าถังดูดติดผิวบนคอลัมน์มากกว่าการไหลออกที่ปลายท่อ(สังเกตได้จากระดับน้ำที่อยู่เหนือชั้นเศษคอนกรีตจะมีระดับสูงขึ้น)
- เปิดปลายท่อให้น้ำในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ไหลออก
- เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความสูงต่างๆของชั้นเศษคอนกรีตในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ คือที่ระดับ 0,30,60,90,120,150 และ 180 เซนติเมตร ทุกหนึ่งชั่วโมง
- นำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้ไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา
- เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของปริมาณโลหะที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับปริมาตรของตัวอย่างน้ำ เพื่อหาจุด Breakthrough ซึ่งเป็นจุดที่ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของเศษคอนกรีตหมด

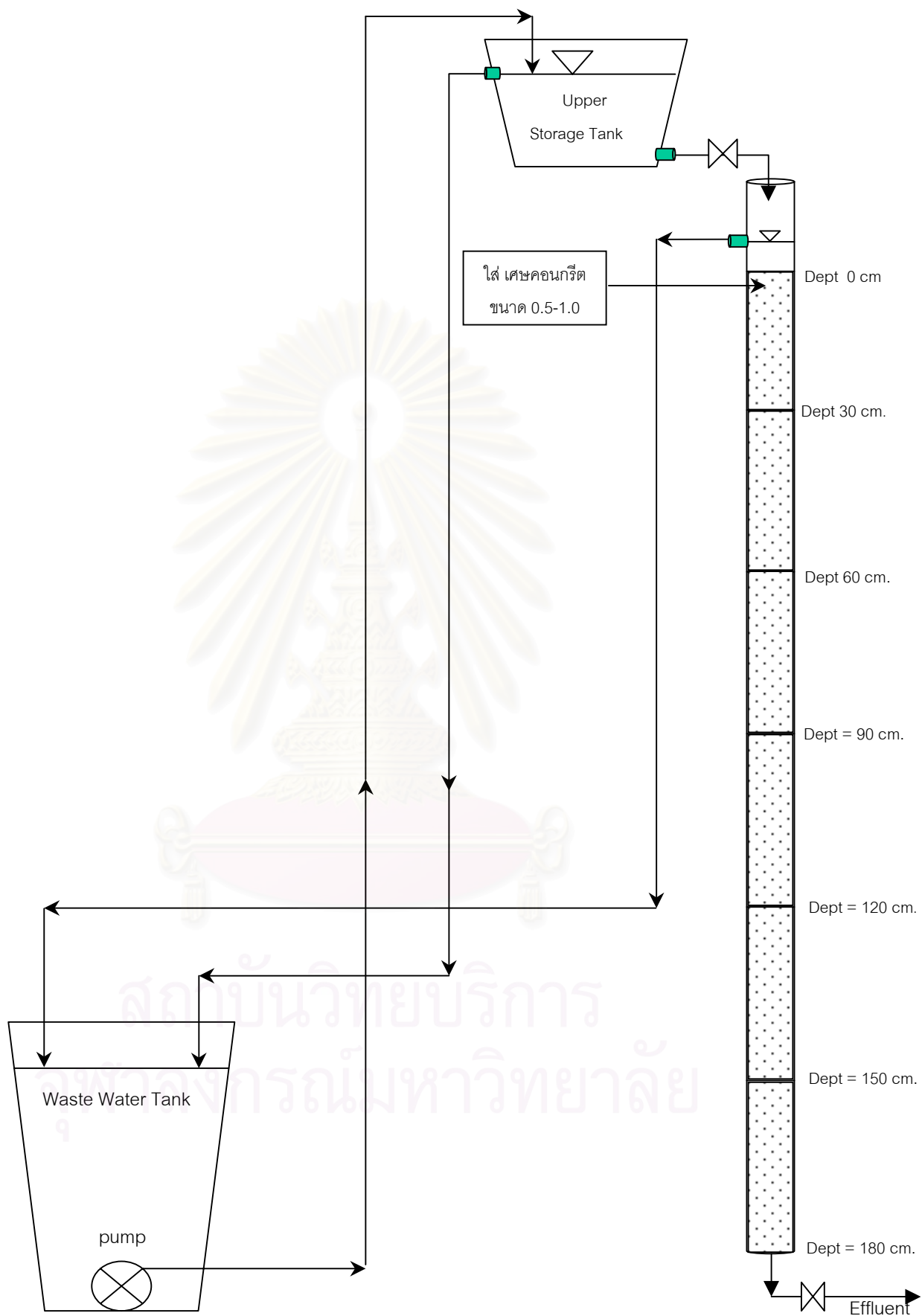
ข้อมูลการทำการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

- น้ำหนักของเศษคอนกรีตในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ 620 กรัม
- อัตราการไหลของน้ำเสีย ณ เวลา เริ่มทำการทดลอง 40 มล./นาที หรือ 2.4 ลิตร/ชม.
- ระดับน้ำที่ท่วมเหนือเศษคอนกรีตในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ 15 เซนติเมตร
- การเก็บตัวอย่างเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยเริ่มเก็บที่ระดับความลึกด้านบนก่อน และระหว่างที่เก็บตัวอย่างจะ ปิดการ ไหลของน้ำเสียในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์มิให้ไหลออก
- ยุติการทดลองเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียที่ออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% ของอัตราการไหลเมื่อเริ่มทำการทดลอง

แบบจำลองการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สรุปการศึกษาถึงสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะด้วยเศษคอนกรีตในสภาวะ batch



รูปที่ 3.2 แสดงผังการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆของชุดการทดลองถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมเศษคอนกรีต

- ตู้อบความร้อน : WTB Binder. Germany
- ชุดเครื่องย่อยหิน
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 18 และ 35 เมช
- ถังพลาสติก

3.3.2 การเตรียมเศษคอนกรีต

การเตรียมเศษคอนกรีตเพื่อนำไปใช้ในการทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมเศษคอนกรีตที่ได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีตของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า เพื่อล้างเศษดินที่ติดอยู่ออก
2. ย่อยเศษคอนกรีตที่เป็นแผ่นให้มีขนาดเล็กลง
3. นำเศษคอนกรีตที่มีขนาดดังกล่าว ไปเข้าเครื่องย่อยขนาด ซึ่งจะย่อยเศษคอนกรีตลงมาเหลือ ขนาดระหว่าง 1x1x1 เซนติเมตร
4. เศษคอนกรีตที่ได้นำมาคัดขนาด โดยใช้ sieve ขนาด เบอร์ 18 และ 35 โดยที่ในการคัดขนาดนั้น เศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 มม.(เล็กกว่า sieve เบอร์ 35) จะถูกคัดออกและเศษคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 มม.(ใหญ่กว่า sieve เบอร์18) จะถูกคัดออกเช่นกัน
5. นำเศษคอนกรีตที่ได้ไปล้างทำความสะอาดอีกครั้งด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปตากให้แห้งก่อนจะเก็บไว้สำหรับการทดลองต่อไป

3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการทดลอง

น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้สำหรับการทดลอง มีวิธีการเตรียมดังนี้

1. สารละลายโครเมียมสังเคราะห์ เตรียมจาก Standard solution สำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer โดยเป็นสารละลาย Chromium (III) Nitrate ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3/\text{HNO}_3$ 3% ละลายในน้ำ deionization ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการที่ 10 mg/L
2. สารละลายทองแดงสังเคราะห์ เตรียมจาก Standard solution สำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer โดยเป็นสารละลาย Copper (II) Nitrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HNO}_3$ 3% ละลายในน้ำ deionization ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการที่ 10 mg/L

3. สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ เตรียมจาก Standard solution สำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer โดยเป็นสารละลาย Nickel (II) Nitrate ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2/\text{HNO}_3$ 3% ละลายในน้ำ deionization ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการที่ 10 mg/L

4. สารละลายตะกั่วสังเคราะห์ เตรียมจาก Standard solution สำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer โดยเป็นสารละลาย Lead Nitrate ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2/\text{HNO}_3$ 3% ละลายในน้ำ deionization ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการที่ 10 mg/L

5. สารละลายสังกะสีสังเคราะห์ เตรียมจาก Standard solution สำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer โดยเป็นสารละลาย Zinc Nitrate ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2/\text{HNO}_3$ 3% ละลายในน้ำ deionization ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการที่ 10 mg/L

3.3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษคอนกรีตทางกายภาพ

- Surface area: Specific Surface Area Analyzer Micromeritics Instrument Corporation ASAP 2000 V3.03 ใช้วิธี N_2 - BET (Brunauer-Emmette-Teller)
- Porosity, Bulk density, and Skeleton density: Micromeritics PORESIZER 9320 V2.08
- SEM of surface: Scanning Electron Microscope (SEM): JEOL, JSM-5800LV Scanning Microscope. Japan.

ทางเคมี

- องค์ประกอบทางเคมี : Wavelength Dispersive X-ray fluorescence Spectrometer Philips Model PW 2400

- Cation Exchange Capacity : ชุดเครื่องแก้วสำหรับกลั่น Ammonia ด้วยวิธี

Direct Method

3.3.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : AND HM-300 Japan.
- เครื่องเขย่า (Shaker) : Orto Alresa model TA 002
- เครื่องวัดพีเอช : Desktop pH meter PHL-20, DKK Corporation. Japan.
- กระดาษกรอง Whatman No. 42
- ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆ

- ชุดกลั่นแอมโมเนีย

3.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ

- เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ : Perkin Elmer Instruments, Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrometer. USA.

- เครื่องมือวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีต ด้วยวิธี X-ray Fluorescence Analysis: Wavelength Dispersive X-ray fluorescence Spectrometer Philips Model PW 2400

3.3.7 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

- คอลัมน์อะคลีริกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร ยาว 200 เซนติเมตร จำนวน 1 คอลัมน์ ปลายที่ติดกับชุดก๊อควบคุมการไหล
- สายยางพลาสติก
- ถังน้ำพลาสติก
- บัมพ์น้ำ
- โครงตั้งสำหรับติดตั้งชุดการทดลองถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ 5 ชนิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแผงวงจรพิมพ์ ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต ทั้ง 4 ส่วนคือ

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบของเศษคอนกรีตที่ใช้ทำการวิจัย

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่

4.1, 4.2 และรูปที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษคอนกรีต

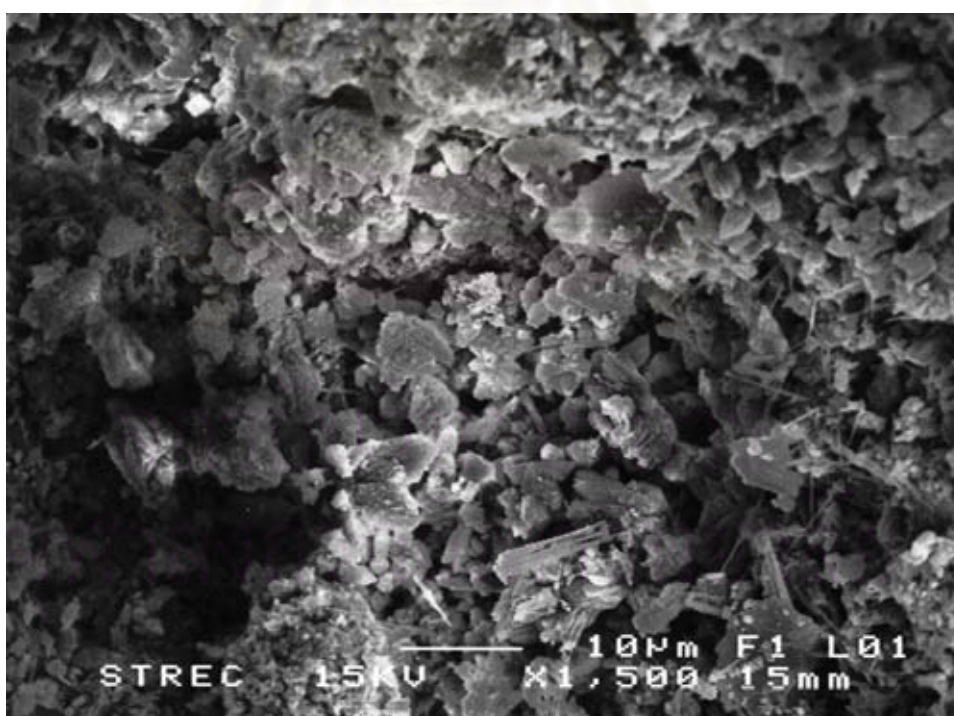
ลักษณะทางกายภาพที่ศึกษา	ผล
Surface Area	10.5057 sq.m./g
Porosity	32.97 %
Total pore area	35.512 sq.m./g
Density	
- Bulk Density	1.5070 g/ml
- Skeleton Density	2.2482 g/ml

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดเศษคอนกรีต

ลักษณะทางกายภาพที่ศึกษา	สัดส่วน(% by weigh)
ขนาด เล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร	10.67 %
ขนาด ระหว่าง 0.5-0.6 มิลลิเมตร	15.00%
ขนาดระหว่าง 0.6-0.8 มิลลิเมตร	46.67 %
ขนาดใหญ่กว่า 0.8 – 1.0 มิลลิเมตร	27.67%



รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.2 ลักษณะของพื้นผิวของเศษคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง(กำลังขยาย 1,500เท่า)

* สังเกตเห็นผลึกของ Ettringite (ลักษณะที่เป็นผลึกรูปเข็ม) อยู่ได้ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต

4.1.2 ลักษณะทางเคมี

1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีตโดยเทคนิค X-ray Diffraction Spectroscopy ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีตก่อนและหลังการทดลองกำจัดโลหะในน้ำเสีย ด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

เศษคอนกรีต	Contents(% by weight)															
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	SrO	L.O.I
ก่อนการทดลอง	0.13	1.83	3.43	37.66	0.05	1.54	0.05	1.20	34.74	0.09	N.D.	0.03	1.43	N.D.	0.02	17.48
หลังการทดลอง	0.26	1.42	3.73	54.12	0.41	1.40	0.13	1.59	12.98	0.10	N.D.	0.04	6.47	1.93	0.01	15.41

หมายเหตุ : L.O.I หมายถึง Lost On Ignition

จากผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีตก่อนและหลังการทดลอง พบว่าเศษคอนกรีตมีองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนไปเมื่อพิจารณาองค์ประกอบต่างๆมีดังนี้

องค์ประกอบที่มีสัดส่วนลดลงเมื่อนำไปทดลอง คือ Mg ในรูป MgO, S ในรูป SO₃ และ Ca ในรูป CaO จากผลการทดลององค์ประกอบที่ลดลงมากที่สุดคือ Ca ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ที่มีอยู่ในคอนกรีต โดยส่วนหนึ่งอยู่ในรูป Ca(OH)₂ ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษคอนกรีตหลังจากการทดลอง Ca(OH)₂ ที่อยู่ในคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับน้ำเสียจึงละลายออกไปทำให้องค์ประกอบของเศษคอนกรีตหลังการทดลองมี Ca ลดลง ซึ่งหากพิจารณาค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้น

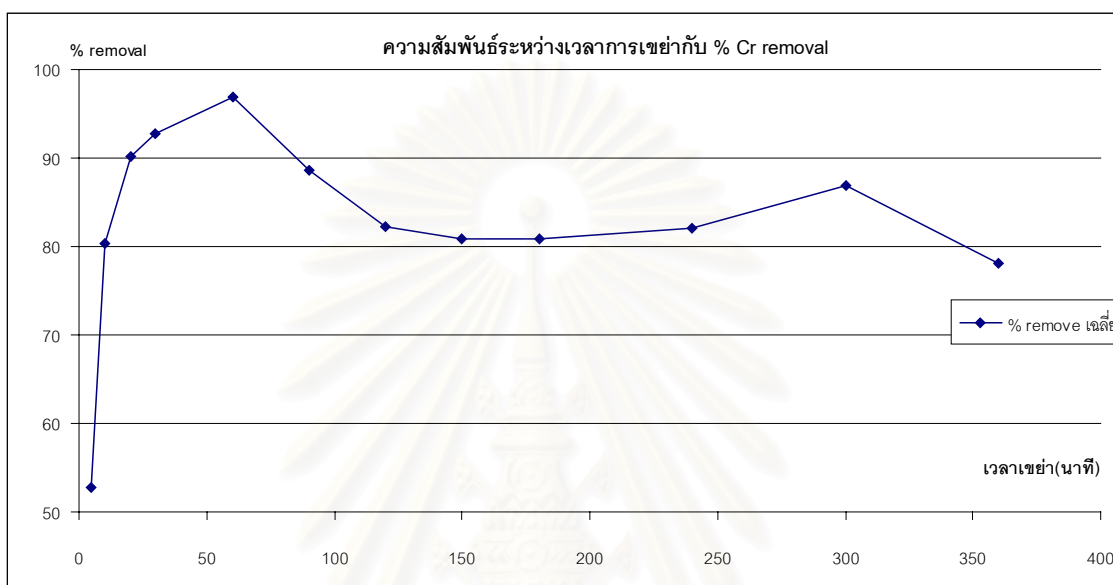
2) CEC (Cation Exchange Capacity) ทำทดลองด้วยวิธี Direct Method ดังแสดงในภาคผนวก ค

ค่า CEC ของเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30.1 cmole/Kg concrete

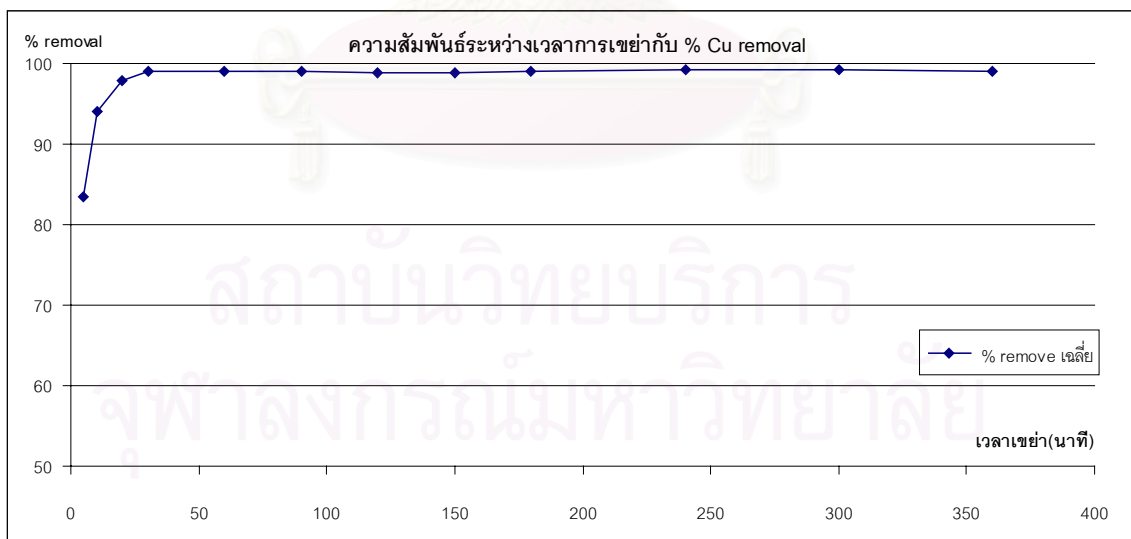
4.2 ผลศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการการกำจัดโลหะ ด้วยเศษคอนกรีต

4.2.1 ผลการทดลองช่วงเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม

ผลการทดลองช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.7



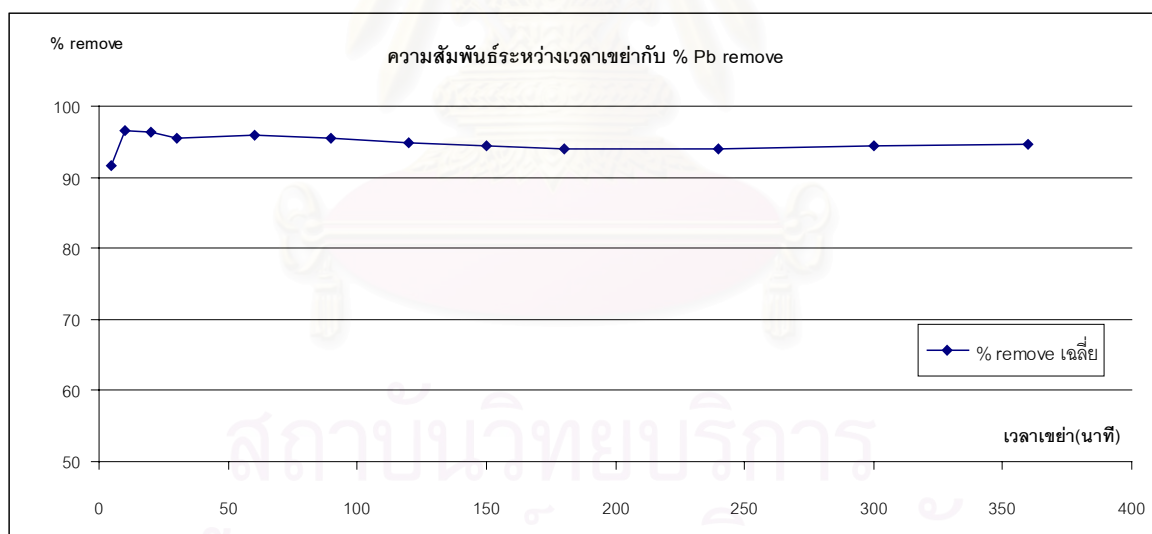
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่า กับประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม



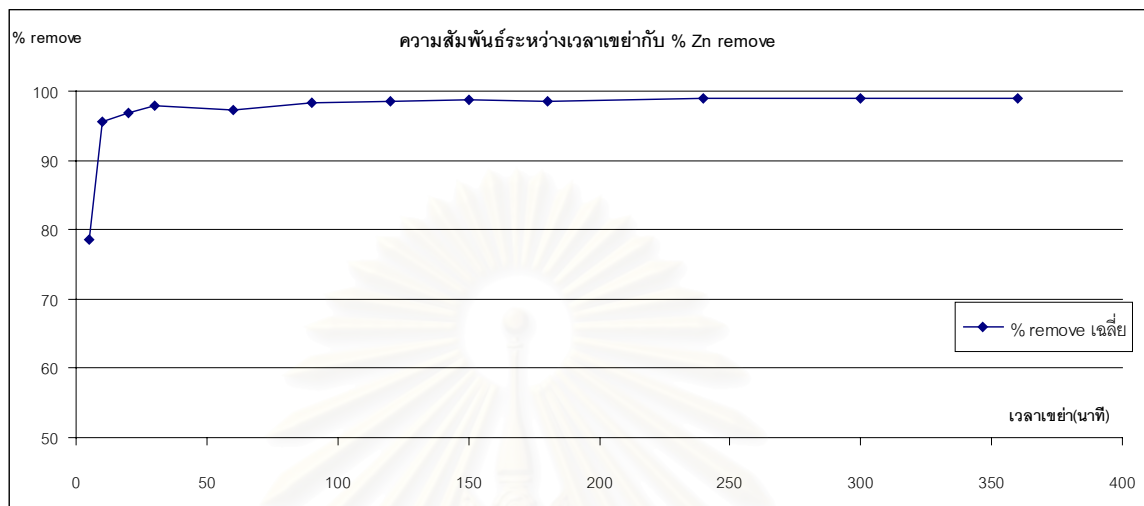
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่า กับประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่า กับประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่า กับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเชย้า กับประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

โครเมียม(ภาพที่ 4.3)

จากผลการทดลอง พบว่า เปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเชย้าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเชย้าที่ 5 นาที จนถึง 60 นาที พบว่าเปอร์เซนต์การกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาการเชย้าเพิ่มขึ้น และเปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดโครเมียมมากที่สุดที่เวลาการเชย้า 60 นาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 96.9 % โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.65 หลังจากนั้นค่าเปอร์เซนต์การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลงโดยที่หลังจากช่วงเวลาการเชย้า 90 นาทีถึง 360 นาที เปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 80 - 90 % และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.90-2.92

ทองแดง(ภาพที่ 4.4)

จากผลการทดลอง พบว่าเปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเชย้าเพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาการเชย้า 5 นาที จนถึงเวลาการเชย้า 30 นาที พบว่า เปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับ 99 %โดยที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.15 และเมื่อเวลาการเชย้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 360 นาที เปอร์เซนต์เหล็กการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 99 % และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.05-0.40

นิกเกิล(ภาพที่ 4.5)

จากผลการทดลอง. พบว่า ระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น โดยในช่วงเวลา 60 นาทีแรก เปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้นจาก 83.5% จนถึง 98.6 % และเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลงตั้งแต่เวลาการเขย่ามากกว่า 60 นาทีเป็นต้นไป โดยมีเปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดนิกเกิลเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 60 นาที ประมาณ 99 % โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง 0.05 ถึง 0.25

ตะกั่ว(ภาพที่ 4.6)

จากผลการทดลอง เมื่อใส่เศษคอนกรีตลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 PPM 50 ลบ.ซม.พบว่า เมื่อเวลาในการเขย่ามากขึ้น เปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาการเขย่า 10 นาทีแรก ค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่อเวลาการเขย่า 10 นาทีโดยมีค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่ว 96.6% และเมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 360 นาที ค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่วมีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 94 - 96% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.15 ถึง 0.50

สังกะสี(ภาพที่ 4.7)

จากผลการทดลองจะเห็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับโลหะชนิดอื่นๆ กล่าวคือเปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยที่ในช่วงเวลาการเขย่า 30 นาทีแรก ค่าเปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดสังกะสีมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 97.9 % และหลังจากนั้น เปอร์เซนต์เฉลี่ยการกำจัดสังกะสีมีค่าระหว่าง 97.3 – 99% และมีส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.00 ถึง 0.51

- โครเมียม หลังจากเขย่าไป 5 นาที ความเข้มข้นลดลงเฉลี่ย 54.4 % และลดลงเรื่อยๆ จนลดลงมากที่สุดที่ 60 นาที โดยความเข้มข้นลดลงเฉลี่ยมากที่สุด 96.9% หลังจากนั้นเมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเฉลี่ยลดลงระหว่าง 78 – 88% และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโครเมียมที่ลดลงพบว่า ที่เวลาการเขย่า 20 นาทีแรก ความเข้มข้นของโครเมียมลดลงถึง 90%

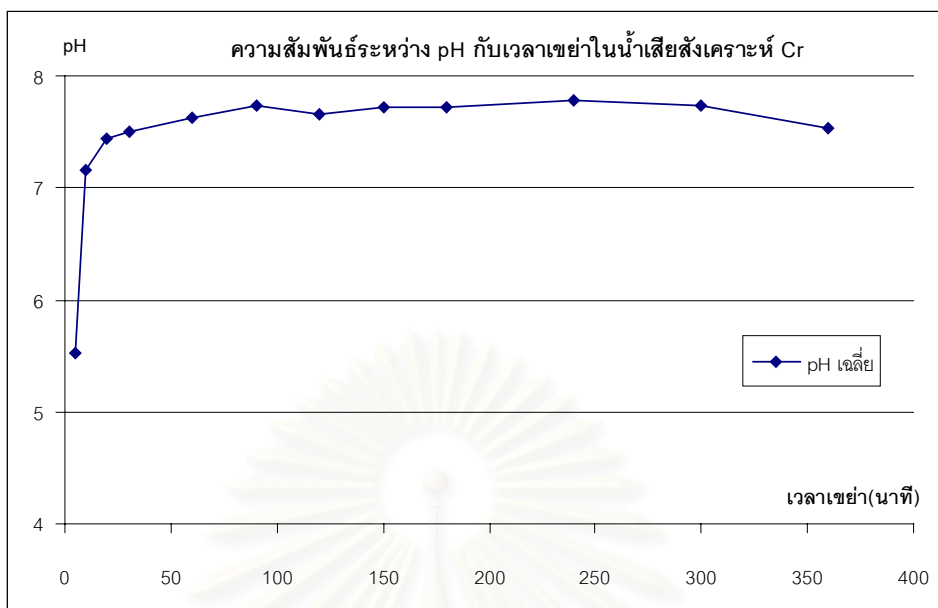
- ทองแดง หลังจากเขย่าเป็นเวลา 5 นาที ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง 83.5 % และลดลงจนถึงค่าค่อนข้างคงที่ที่ 99 % ที่เวลาการเขย่า 30 นาทีหลังจากนั้นความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักลดลงเฉลี่ย 99 % เมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 360 นาที เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของทองแดงที่ลดลงพบว่า ที่เวลาการเขย่า 10 นาทีแรก ความเข้มข้นของทองแดงลดลงมากกว่า 90%

- นิกเกิล หลังจากการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง 83.47 % และมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้น และค่อนข้างคงที่เมื่อระยะเวลาการเขย่าตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงระหว่าง 98 - 99% เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของนิกเกิลที่ลดลงพบว่า ที่เวลาการเขย่า 20 นาทีแรก ความเข้มข้นของนิกเกิลลดลงมากกว่า 90 %

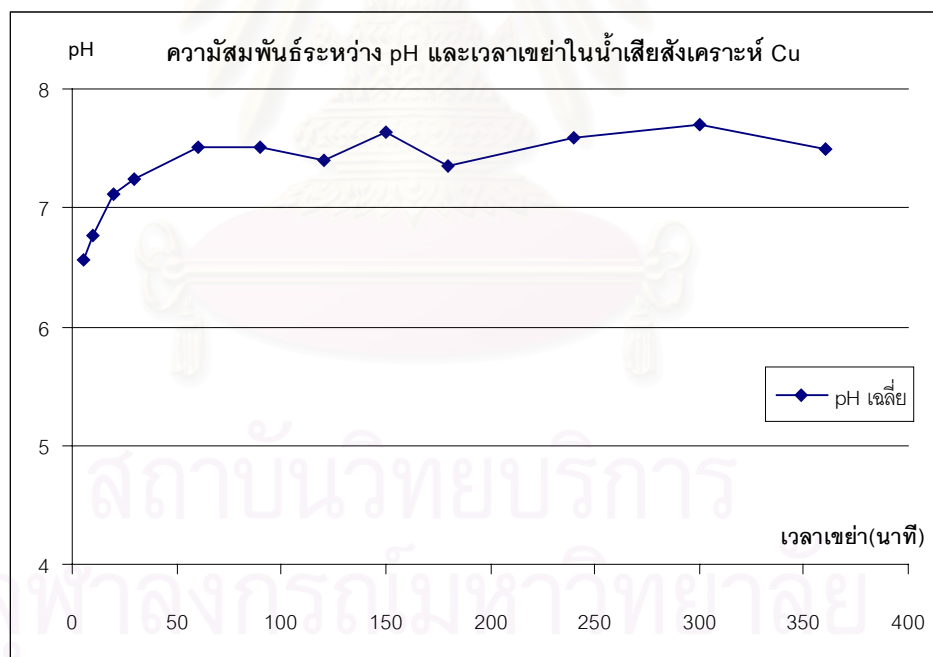
- ตะกั่ว หลังจากการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง 91.70 % และลดลงมากที่สุดที่ระยะเวลาการเขย่า 10 นาที โดยความเข้มข้นของตะกั่วลดลง 96.6 % หลังจากนั้นเมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ 30 นาที ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในน้ำเสียลดลงค่อนข้างคงที่ระหว่าง 94 - 96 % เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของตะกั่วที่ลดลงพบว่า ที่เวลาการเขย่า 5 นาทีแรก ความเข้มข้นของตะกั่วลดลงมากกว่า 90%

- สังกะสี หลังจากการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที ความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง 78.6 % และลดลงเรื่อยๆจนค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาการเขย่าตั้งแต่ 30 นาที โดยมีค่าเฉลี่ยลดลงระหว่าง 97 - 99 % เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสังกะสีที่ลดลงพบว่า ที่เวลาการเขย่า 10 นาทีแรก ความเข้มข้นของสังกะสีลดลงมากกว่า 90%

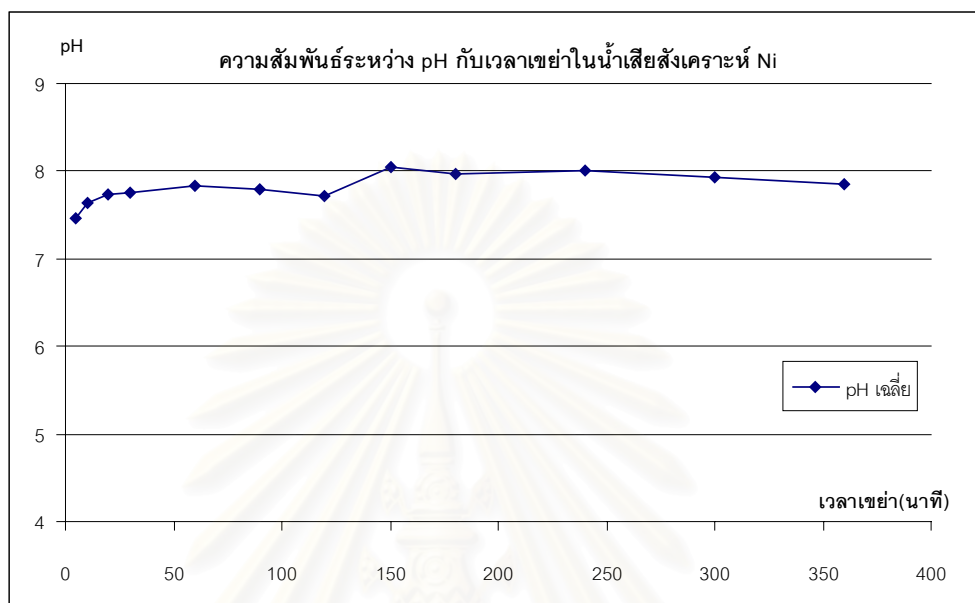
จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากใส่เศษคอนกรีตลงไปในกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่โลหะแต่ละชนิดละลายอยู่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการสัมผัสกับเศษคอนกรีตและ ค่อยๆช้าลงเมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในที่สุด เห็นได้จากการที่กราฟ % การกำจัดโลหะที่มีความเข้มข้นมากในช่วงแรก และมีค่าความเข้มข้นลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอในที่สุด



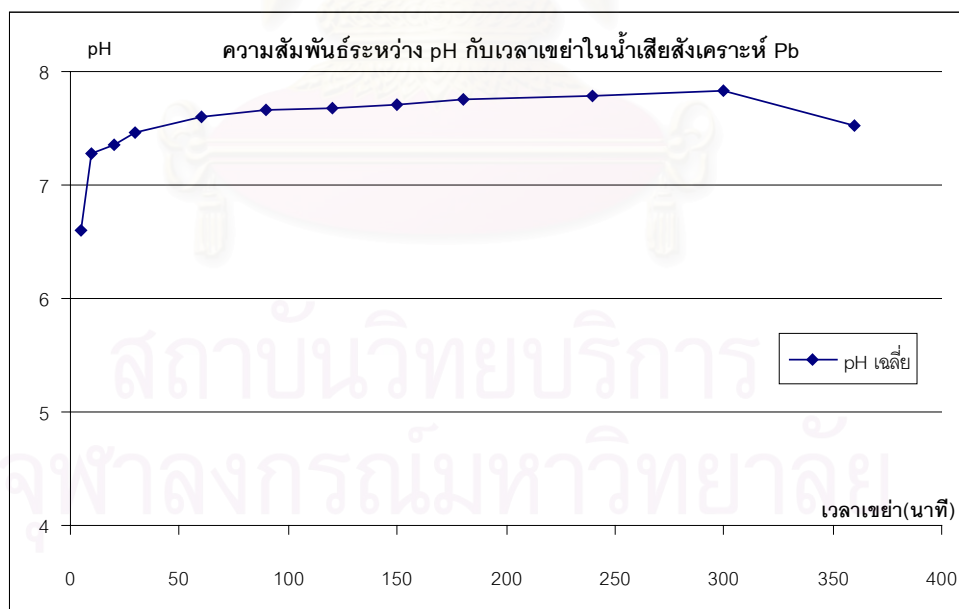
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเขย่า กับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Cr



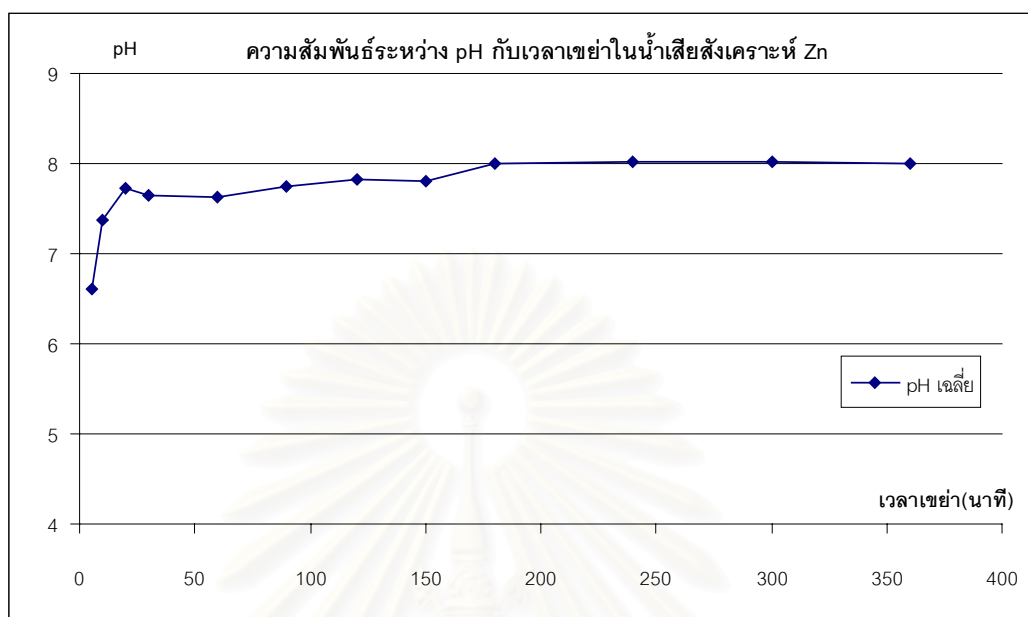
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเขย่า กับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเขย่า กับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเขย่า กับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Pb



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการแช่ กับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Zn

หากพิจารณาค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาการแช่ต่างๆ จะพบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับความเข้มข้นของโลหะในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ กล่าวคือเมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้นพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าค่อนข้างคงที่ในที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆของการแช่และช้าลงเมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น มาจาก ไฮดรอกไซด์ไอออนที่อยู่ในเศษคอนกรีต ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เป็นองค์ประกอบของคอนกรีตนั่นเอง ดังสมการ



และสมการ

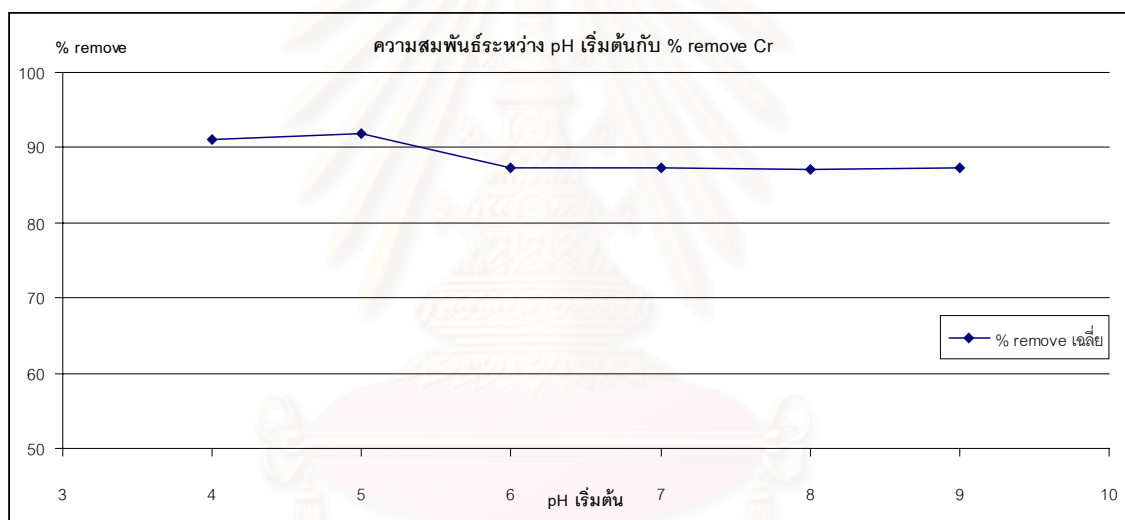


จากสองสมการข้างต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ จะได้ผลพลอยได้ก็คือ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปะปนอยู่ในเนื้อคอนกรีต เมื่อนำเอาเศษคอนกรีตมาละลายน้ำ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก็จะละลายออกมา เป็นเหตุให้พีเอชของน้ำสูงขึ้นดังในผลการทดลอง และนอกจากนี้ยังพบว่า พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่สัมผัสกับเศษคอนกรีตยังมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากเศษคอนกรีตสัมผัสกับน้ำเสีย

สังเคราะห์เป็นเวลาระยะหนึ่ง ก็หมายถึงเกิดความสัมพันธ์ระหว่าง ไฮดรอกไซด์ไอออนที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์กับ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่จะละลายออกมาจากเศษคอนกรีต

4.3.2 ผลการทดลองช่วงพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะ

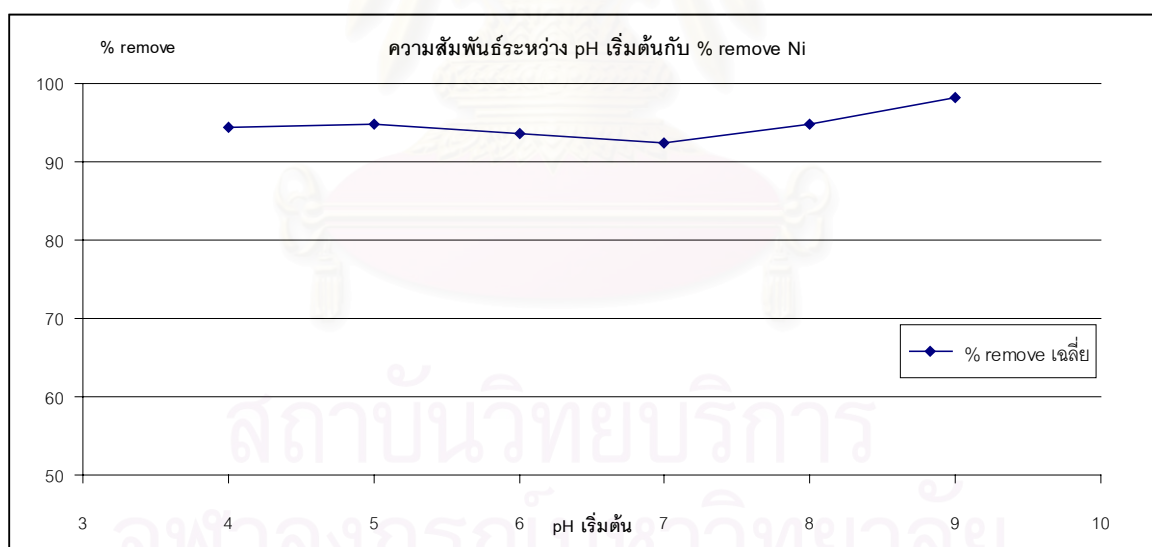
ในการทดลองหาช่วงพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักความเข้มข้น 10 mg/L มาปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 4 จนถึง 9 ด้วยสารละลาย NaOH และ HCl แล้วนำไปเขย่าช่วงเวลาที่ต่างกัน โดยทองแดงเขย่าที่ 30 นาที นิกเกิลเขย่าเป็นเวลา 90 นาที โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเขย่าเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปหาค่าความเข้มข้นของโลหะที่เหลืออยู่ ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.13 ถึง 4.17



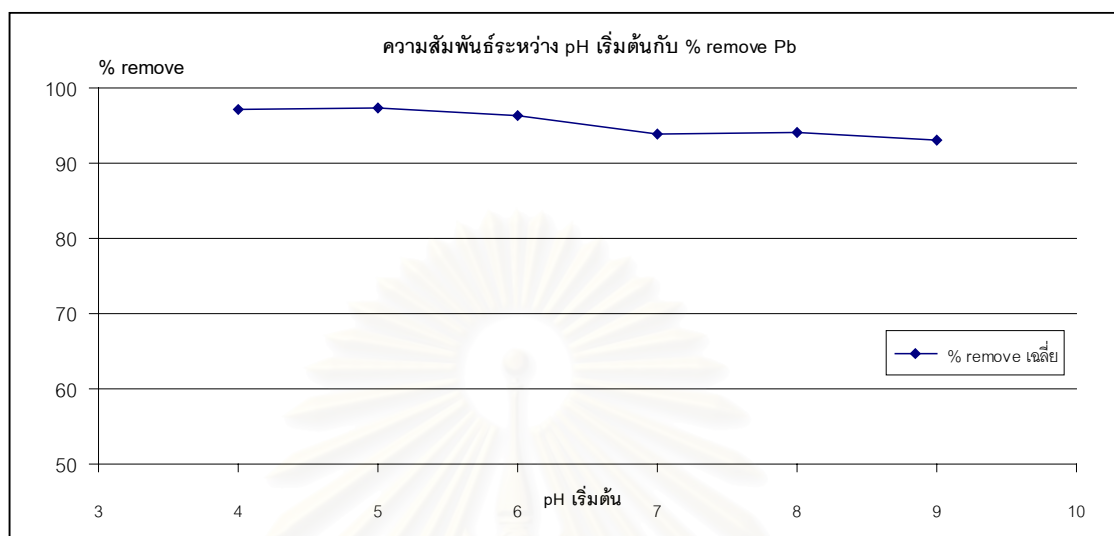
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับ % การกำจัดโครเมียม



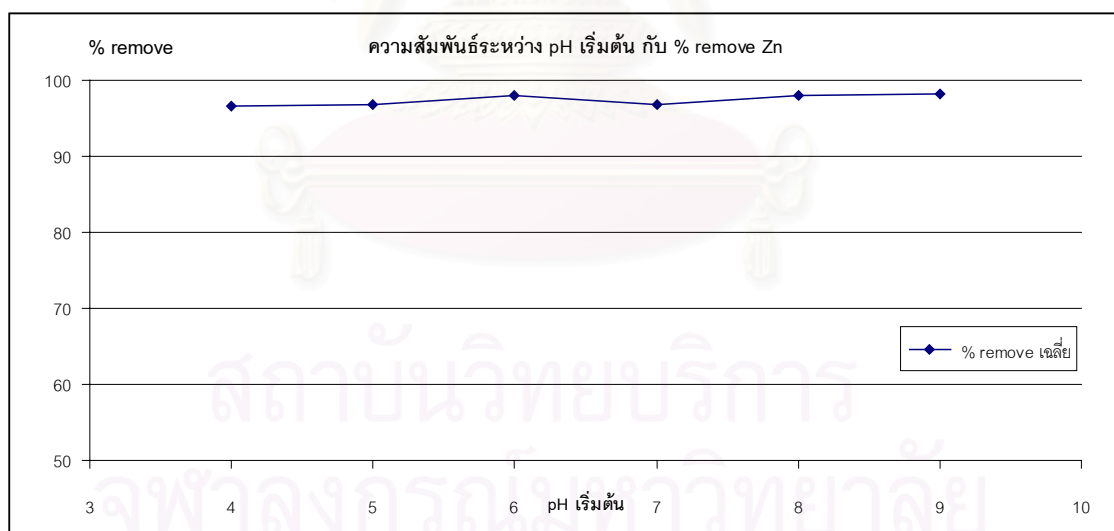
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับ % การกำจัดทองแดง



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับ % การกำจัดนิกเกิล



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับ % การกำจัดตะกั่ว



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับ % การกำจัดสังกะสี

จากผลการทดลองเศษคอนกรีตสามารถกำจัดโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทุกพีเอชเริ่มต้น เมื่อพิจารณาโลหะแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

- โครเมียม จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นที่ 4 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดโครเมียมในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 91.1% ที่พีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดโครเมียม 91.8% และที่พีเอชเริ่มต้นที่ 6-9 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดโครเมียมระหว่าง 87.2 - 87.4% โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.12 - 1.71

- ทองแดง จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นที่ 4 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดทองแดงในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 99.1% ที่พีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดโครเมียม 99.4% และที่พีเอชเริ่มต้นที่ 6-9 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดทองแดงระหว่าง 99.2 - 99.7% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง 0.06 - 0.15

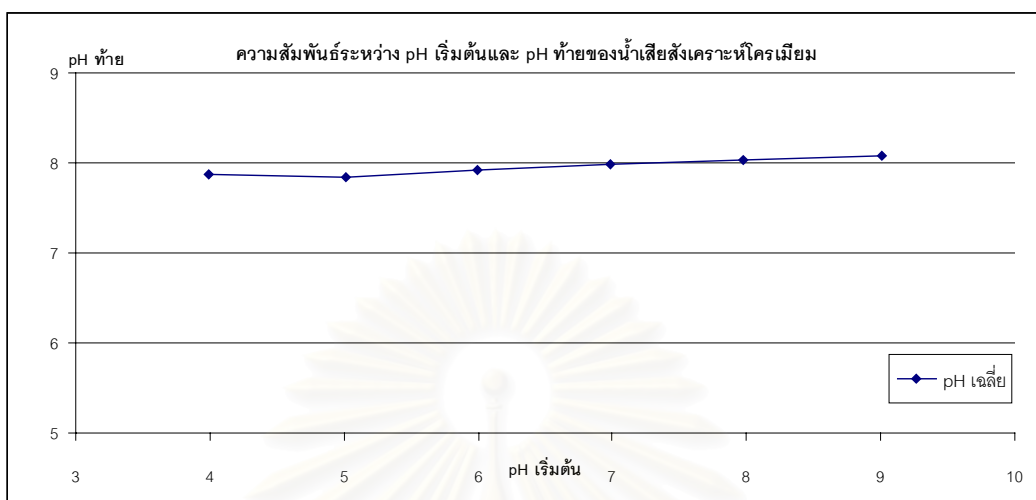
- นิกเกิล จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นที่ 4 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดนิกเกิลในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 94.3% ที่พีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดนิกเกิล 94.8% และที่พีเอชเริ่มต้นที่ 6-9 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดนิกเกิลระหว่าง 92.5 - 98.1% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง 0.25 - 1.19

- ตะกั่ว จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นที่ 4 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่วในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 97.1% ที่พีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่ว 97.3% และที่พีเอชเริ่มต้นที่ 6-9 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดตะกั่วระหว่าง 93.1-96.3% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง 0.06 - 0.91

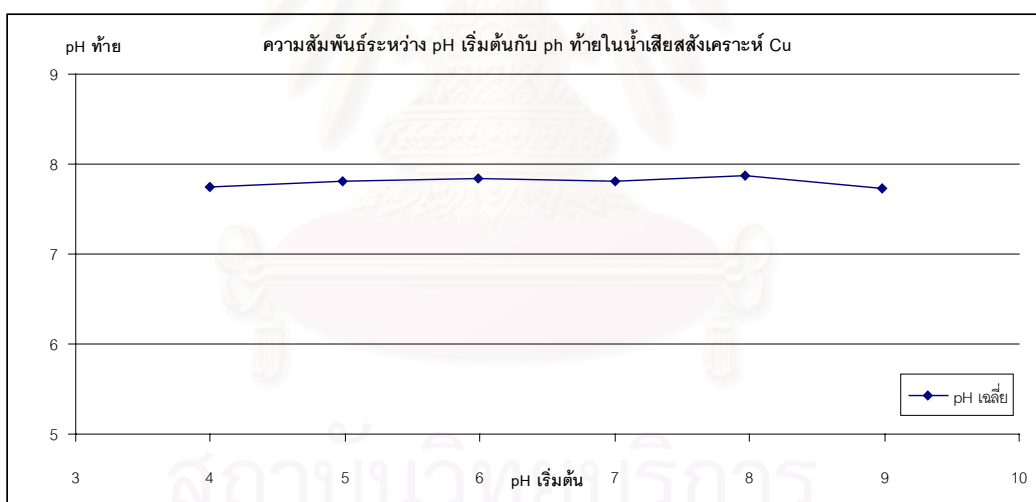
- สังกะสี จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นที่ 4 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดสังกะสีในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 96.5% ที่พีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดสังกะสี 96.9% และที่พีเอชเริ่มต้นที่ 6-9 มีค่าเฉลี่ยการกำจัดโครเมียมระหว่าง 96.9 - 98.1% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระหว่าง 0.12 - 1.03

จากผลการทดลองของโลหะทั้งหมด 5 ชนิด พบว่ามีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ ที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ มีค่าเฉลี่ยการกำจัดใกล้เคียงกันในโลหะแต่ละชนิด

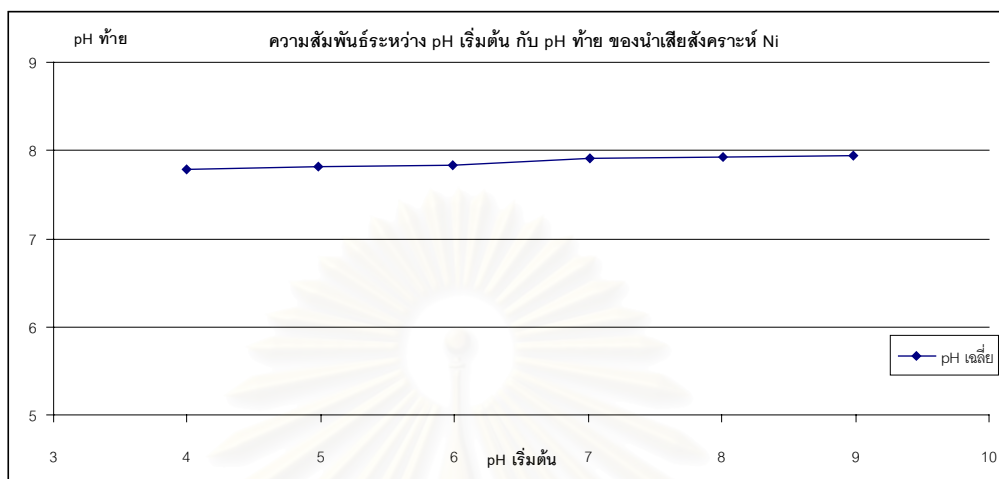
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและภายหลังการทดลอง ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.18 - 4.22 จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ต่างกัน พีเอชภายหลังการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน



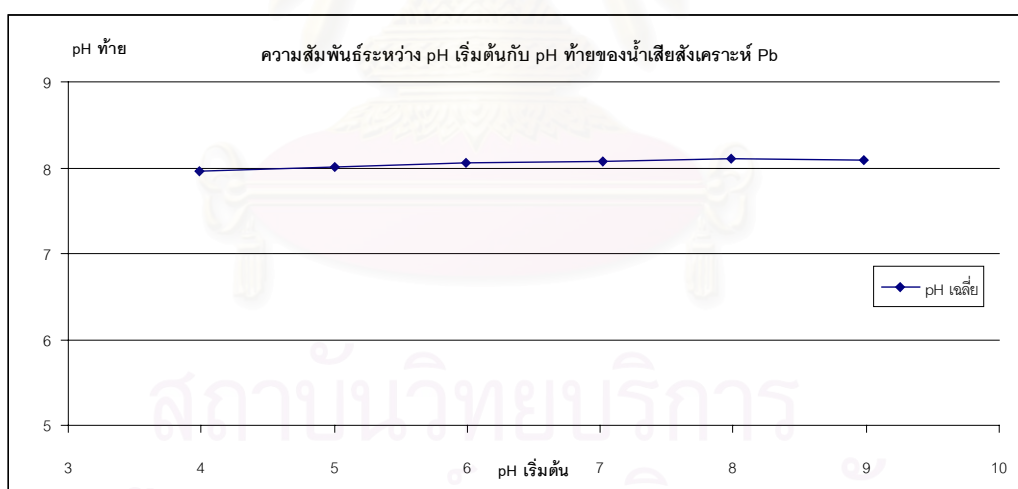
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้น กับ พีเอช ท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ Cr



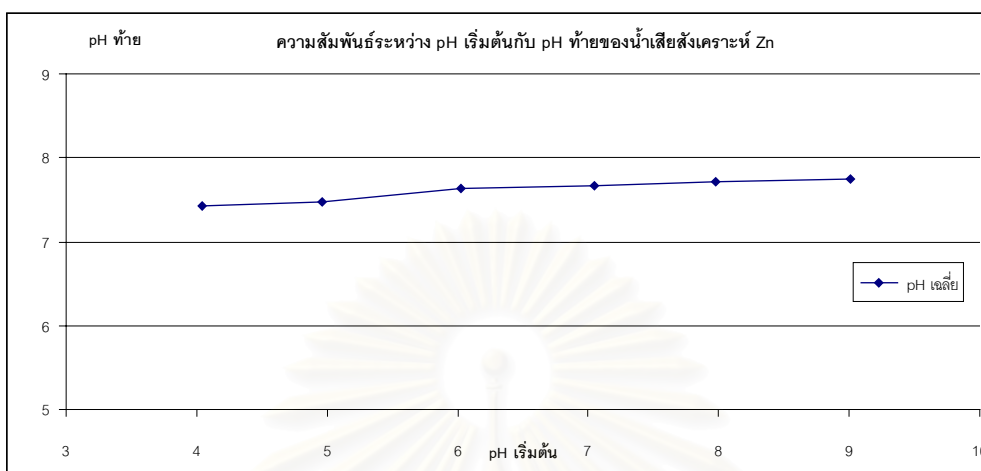
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้น กับ พีเอช ท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้น กับ พีเอช ท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้น กับ พีเอช ท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์ Pb

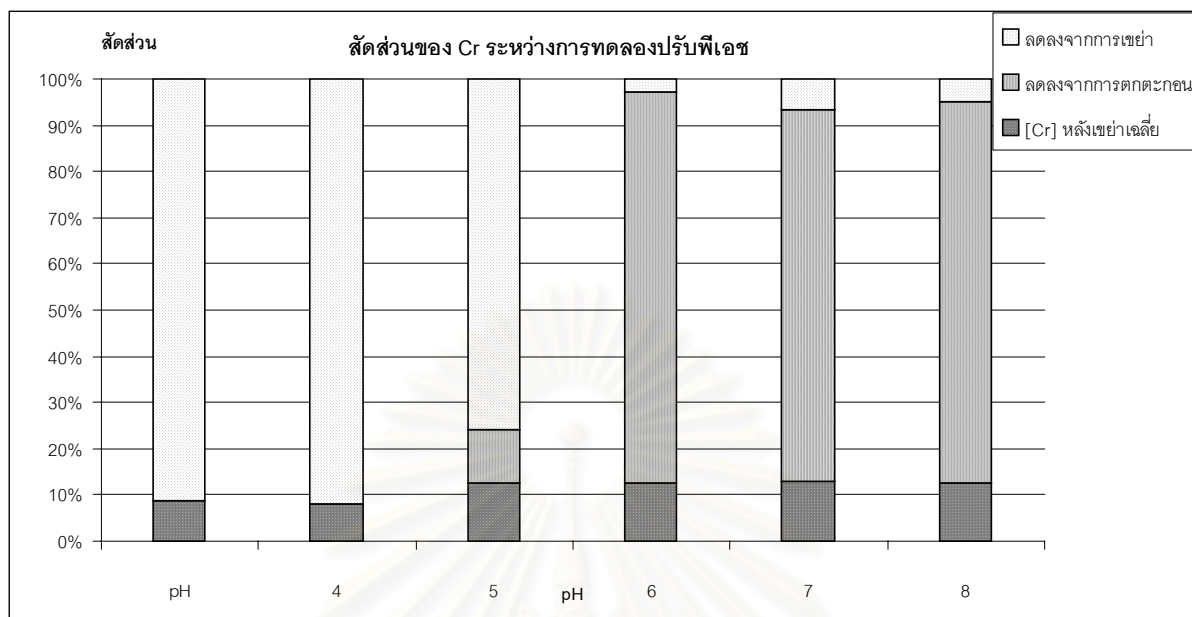


ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช เริ่มต้น กับ พีเอช ท้ายของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ Zn

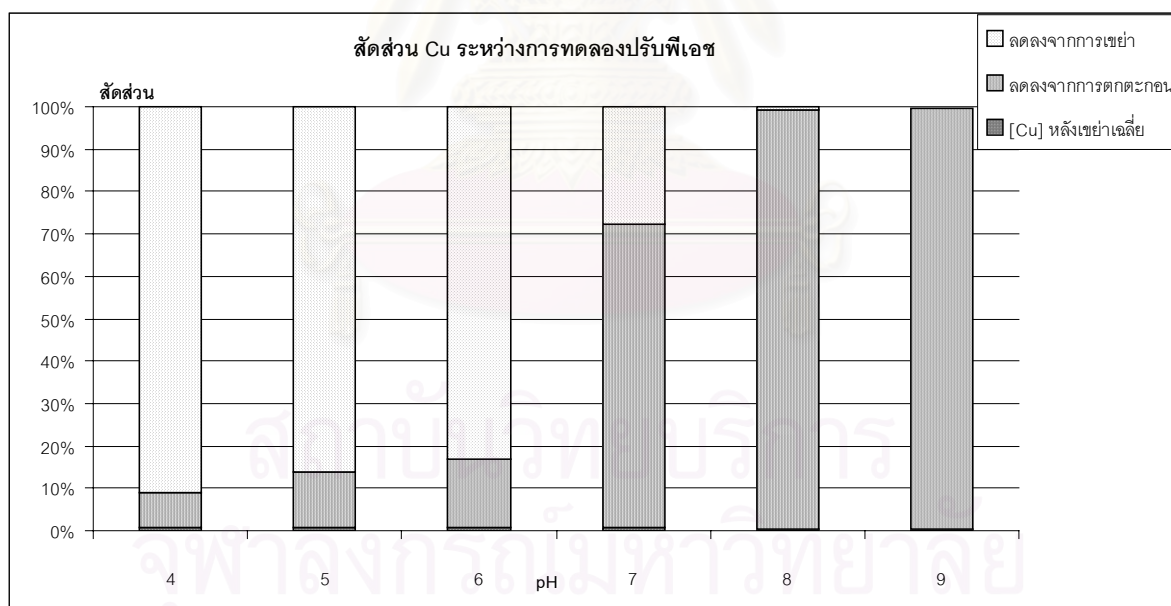
จากผลการทดลองในการศึกษาถึงพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยการกำจัดโลหะในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ ซึ่งพบว่า สารละลายน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่มีพีเอชเริ่มต้นต่างกัน มีความสามารถในการกำจัดโลหะไม่ต่างกัน ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปคือการทดลองหาสมการการดูดติดผิว จึงจะไม่ปรับพีเอชของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ได้แต่จะใช้พีเอชของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่เตรียมได้ไปทำการทดลองเลย

นอกจากนี้ ยังได้เก็บข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ภายหลังจากการปรับพีเอช ดังแสดงในภาพที่ 4.23 ถึง 4.27

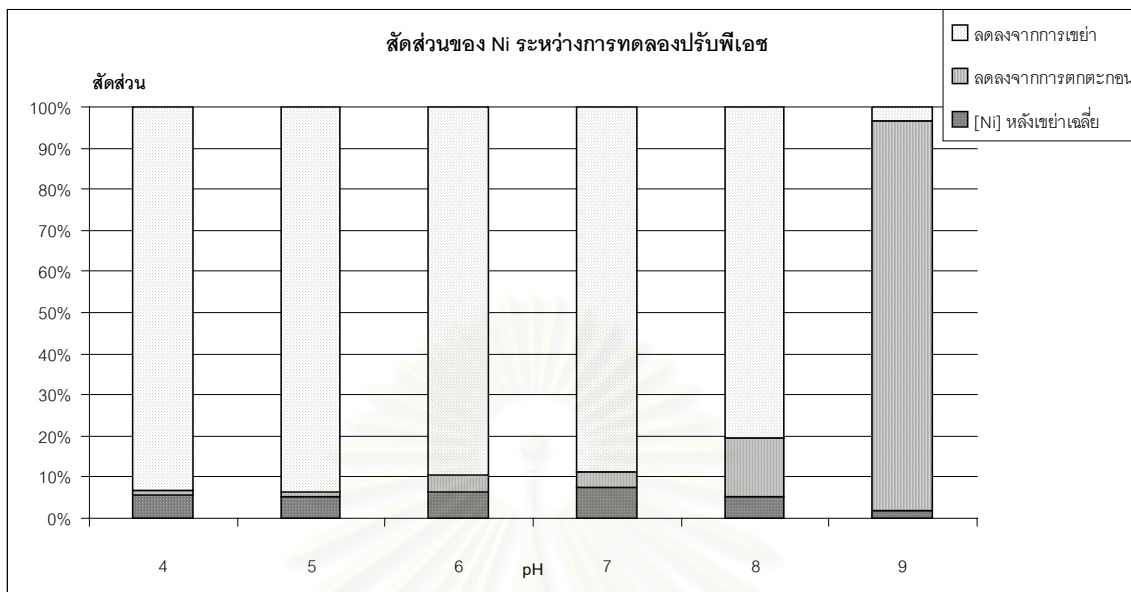
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



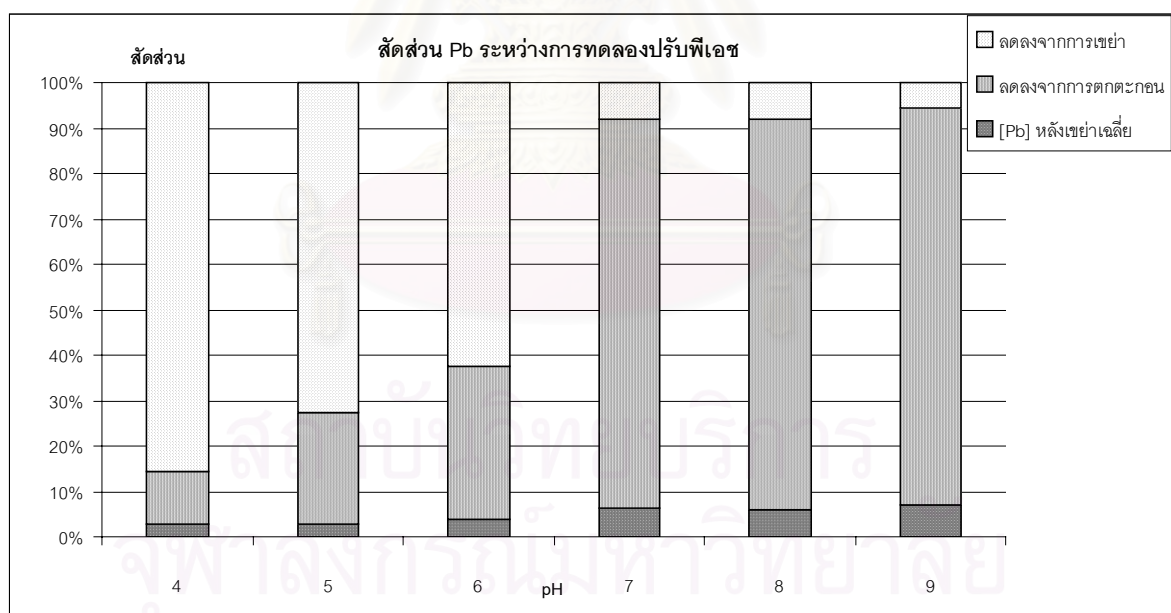
ภาพที่ 4.23 แสดงปริมาณของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4-9



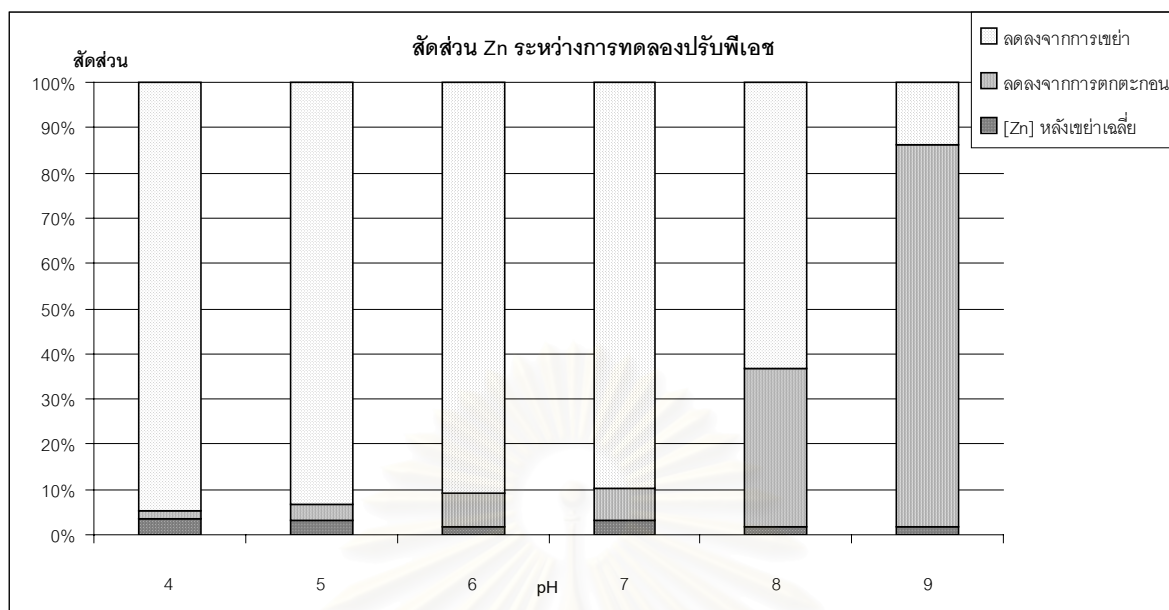
ภาพที่ 4.24 แสดงปริมาณของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4-9



ภาพที่ 4.25 แสดงปริมาณของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4-9



ภาพที่ 4.26 แสดงความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4-9

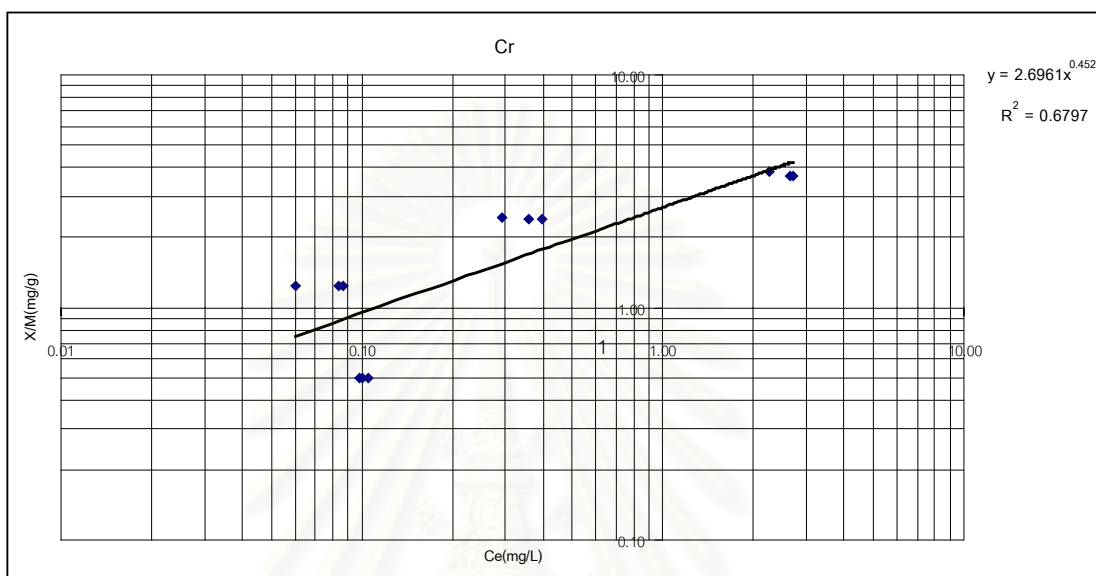


ภาพที่ 4.27 แสดงความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับพีเอชระหว่าง 4-9

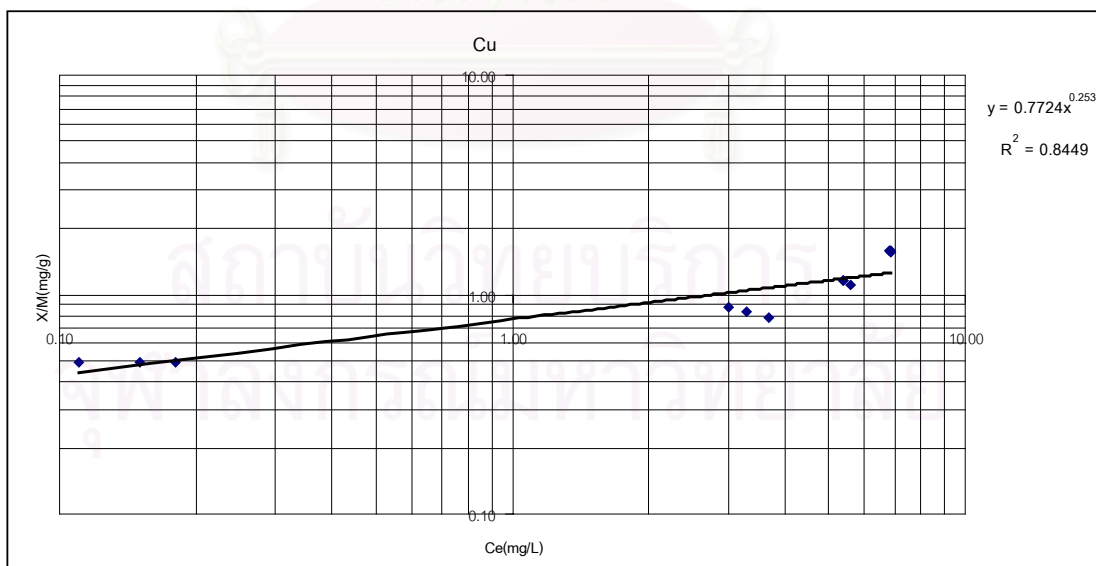
จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อปรับพีเอช ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดมีค่าลดลง แตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะหนัก ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 2.3 กล่าวคือ เมื่อพีเอช มากขึ้นความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณา สัดส่วนของโลหะหนักในส่วนต่างๆ จะพบว่า หากเราปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีความเป็นด่างมากขึ้นจนถึงพีเอช 9 ก็จะทำให้เห็นว่าสัดส่วนของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เกิดการตกตะกอนมีมากขึ้นด้วย

4.3.3 ผลการทดสอบ Isotherm การดูดติดผิวแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm test)

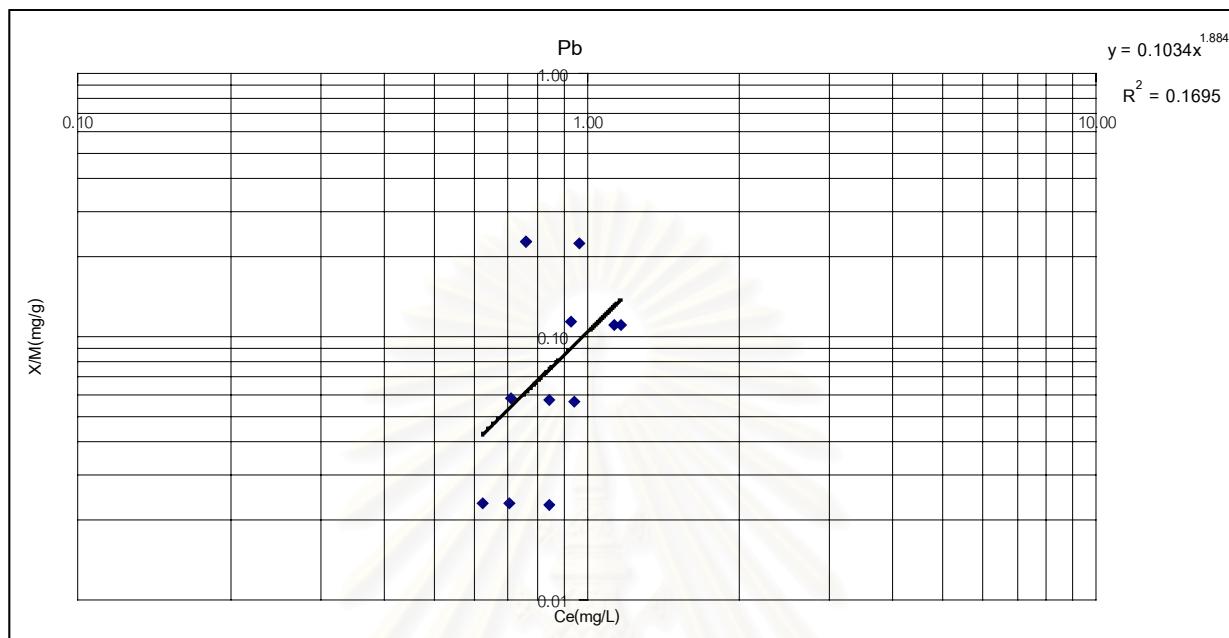
ในการทดลองทดสอบ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ ฟรุนดิช ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.28 ถึง 4.32 ตามลำดับ



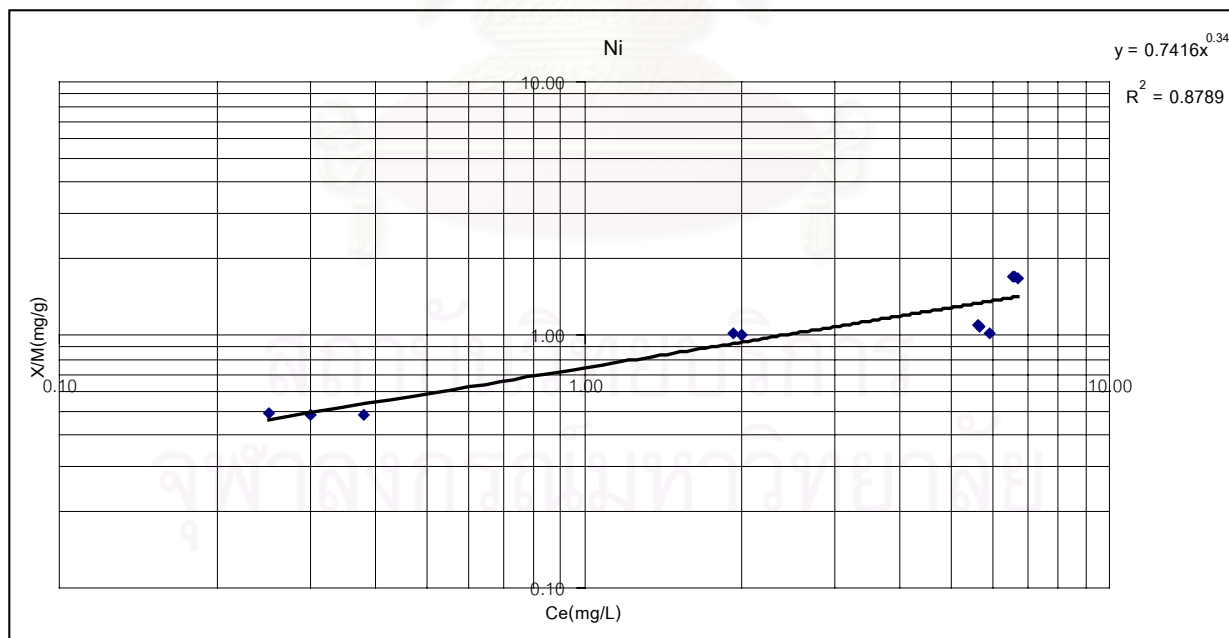
ภาพที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (น้ำหนักคอนกรีตระหว่าง 0.10 –1.00 กรัม)



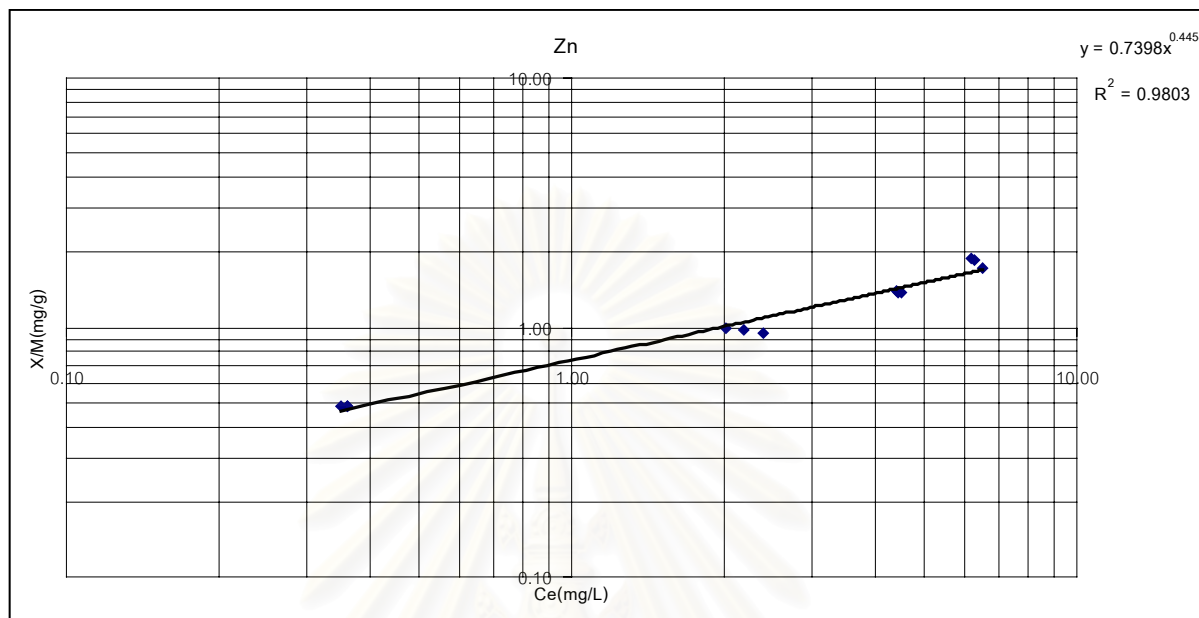
ภาพที่ 4.29 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง (น้ำหนักคอนกรีตระหว่าง 0.10 –1.00 กรัม)



ภาพที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (น้ำหนักคอนกรีตระหว่าง 0.10 – 1.00 กรัม)



ภาพที่ 4.31 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล (น้ำหนักคอนกรีตระหว่าง 0.10 – 1.00 กรัม)



ภาพที่ 4.32 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี (น้ำหนักคอนกรีตระหว่าง 0.10 – 1.00 กรัม)

จากผลการทดสอบ Isotherm การดูดติดผิวแบบฟรุนดิช ระหว่างโลหะแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์และเศษคอนกรีตขนาด 0.5 - 1.0 มิลลิเมตร พบว่า เศษคอนกรีตที่นำมาทดลองมีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยมีสมการการดูดติดผิวดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการการดูดติดผิวของเศษคอนกรีตในน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ

โลหะหนัก	สมการการดูดติดผิว	R^2
โครเมียม	$y = 0.1348X^{0.4525}$	0.6796
ทองแดง	$y = 0.7724X^{0.2531}$	0.8449
นิกเกิล	$y = 0.7416X^{0.3410}$	0.8789
ตะกั่ว	$y = 0.1034X^{1.8844}$	0.1695
สังกะสี	$y = 0.7398X^{0.4458}$	0.9803

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 5 ชนิดของเศษคอนกรีต ต่อหน่วยน้ำหนักของเศษคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากสมการของโลหะแต่ละชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่ ความเข้มข้นของโลหะหนัก 10mg/L

โลหะหนัก	ความสามารถในการกำจัดโลหะ(mg/gเศษคอนกรีต)
โครเมียม	0.382
ทองแดง	1.383
นิกเกิล	1.626
ตะกั่ว	7.923
สังกะสี	2.065

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์

ผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	ผล
พีเอช เฉลี่ย	7.1
ปริมาณโลหะในรูปสารละลาย	
- ทองแดงเฉลี่ย(mg/L)	0.75
- นิกเกิลเฉลี่ย(mg/L)	0.17
- ตะกั่ว(mg/L)	0.61
- สังกะสี(mg/L)	0.15
- โครเมียม(mg/L)	N.D
ค่าของแข็งละลายทั้งหมดเฉลี่ย (Total dissolved Solids,mg/L)	4.17
ค่าความขุ่นเฉลี่ย(turbidity, NTU)	2.6

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ โดยการใช้ น้ำเสียจริงจากโรงงานแผงวงจรพิมพ์ซึ่งมีโลหะ 4 ชนิดปะปนอยู่ในน้ำเสีย คือ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล (จากน้ำตัวอย่างที่นำมาทดลองตรวจไม่พบโครเมียม) ในส่วนโลหะชนิดต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียความเข้มข้นดังนี้ ทองแดงเฉลี่ย 0.75 mg/L นิกเกิลเฉลี่ย 0.17 mg/L ตะกั่ว 0.61 mg/L และสังกะสี 0.15 mg/L ในการทดลองจะปล่อยน้ำเสียไหลผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ทำจากอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร ความหนาของชั้นเศษคอนกรีต 180 เซนติเมตร โดยที่มีน้ำเสียท่วมเหนือชั้นเศษคอนกรีตสูง 15 เซนติเมตรตลอดเวลาการทดลอง มีการเก็บน้ำตัวอย่างจากที่ชั้นความลึกของเศษคอนกรีตทุก 30 เซนติเมตรตั้งแต่ที่ระดับ 0 เซนติเมตร(ที่ผิวหน้าหรือก่อนที่จะไหลผ่านถังดูดติดผิว) 30,60,90,120,150,180 เซนติเมตร(ที่ปลายถังดูดติดผิว) การเก็บน้ำตัวอย่างจะเก็บทุกๆ 1 ชั่วโมงและจะยุติเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียที่นำมาทำการทดลองลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของอัตราการไหลสูงสุด ในการทดลองอัตราการไหลเริ่มต้นของน้ำเสียในถังดูดติดผิว ที่ 38 มิลลิลิตร/นาที และหยุดการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเสียในถังดูดติดผิวที่ 25 มิลลิลิตร/นาที โดยวัดอัตราการไหลที่ปลายถังดูดติดผิวออกที่ 180 เซนติเมตร โดยที่อัตราการไหลของน้ำเสียจริงในถัง ม

ในการทดลองมีค่าต่างๆสำหรับการทำงานของถังดูดติดผิวดังนี้

$$\text{อัตราการไหลประมาณ} = 38 \text{ ml/min}$$

หมายเหตุ :

อัตราการไหลใช้ Hydraulic Surface Loading ระหว่าง 40 to 200 l/min/m²(ASTM D 9322)

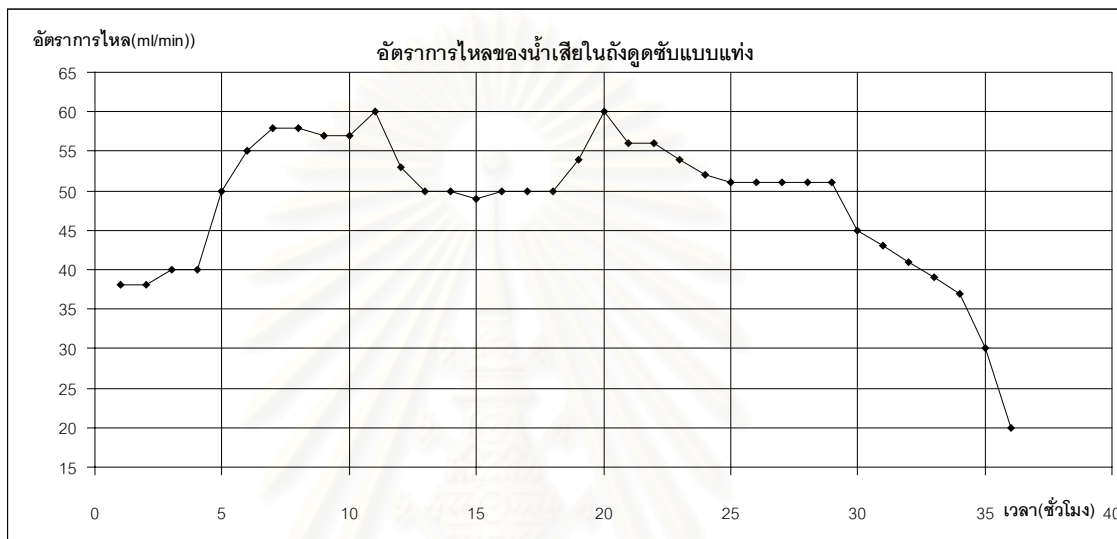
$$\begin{aligned} \text{Empty Bed Contact Time} &= [\text{Bed Depth (ft)} \times 7.48] / \text{Hydraulic Surface Loading} \\ (\text{Faust and Aly1987}) &= 6 \text{ (ft)} \times 7.48 \times 3.1051 \text{ (gal/min/ft}^2\text{)} \\ &= 14.45 \text{ นาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Bed Volume (BV) ของเศษคอนกรีต} &= \text{weigh of adsorbent} / \text{adsorbent bulk density} \\ &= 621 \text{ (g)} / 1.5070 \text{ (g/ml)} \\ &= 412 \text{ ml} = 0.01455 \text{ f}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัด(A)ของคอลัมน์ดูดติดผิว} &= \pi r^2 \\ &= 3.1416 \times 0.03282 \text{ ft}^2 \\ &= 3.3815 \times 10^{-3} \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

ความลึกของชั้นเศษคอนกรีต = 6 ft

ผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดติดผิวของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้ดังแสดงในภาพที่ 4.33 ถึง ภาพที่ 4.39



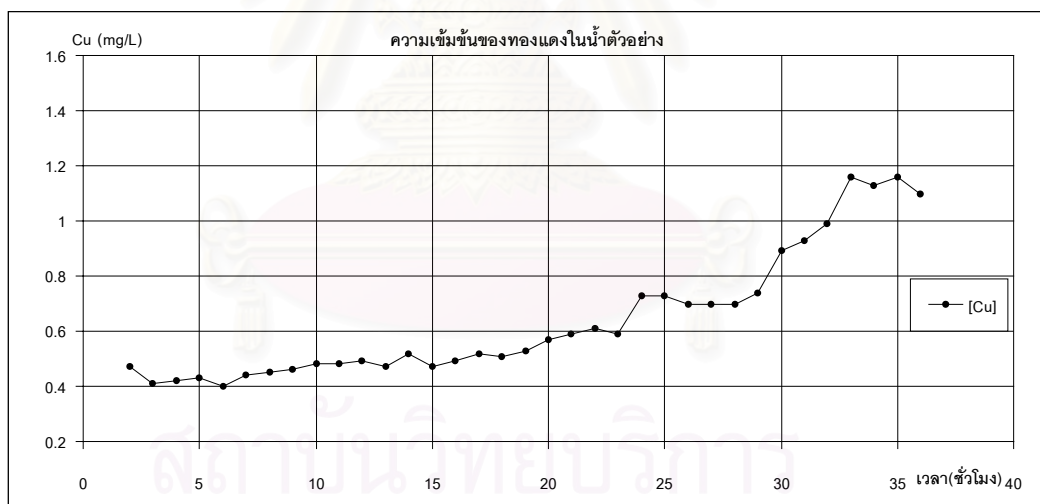
ภาพที่ 4.33 อัตราการไหลของน้ำออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้ที่ช่วงเวลาต่างๆ



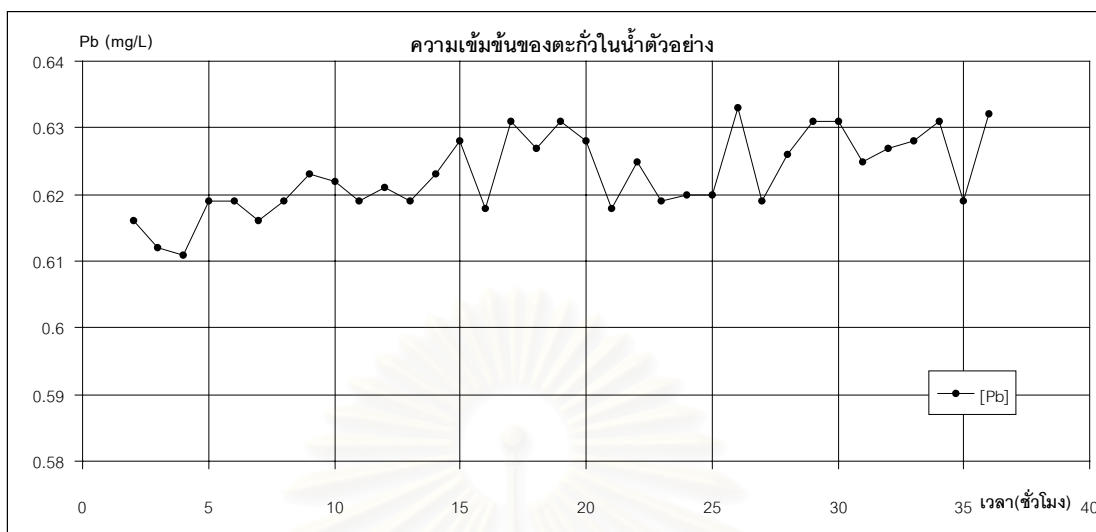
ภาพที่ 4.34 พีเอช ของน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ



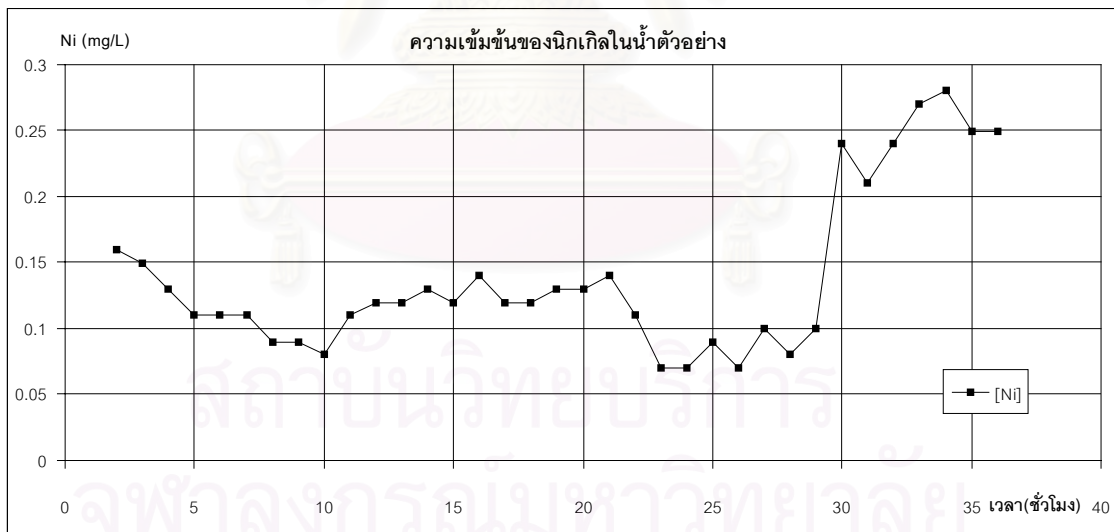
ภาพที่ 4.35 ค่าของแข็งละลายทั้งหมดของน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดตีดผิวแบบคอลัมน์ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ



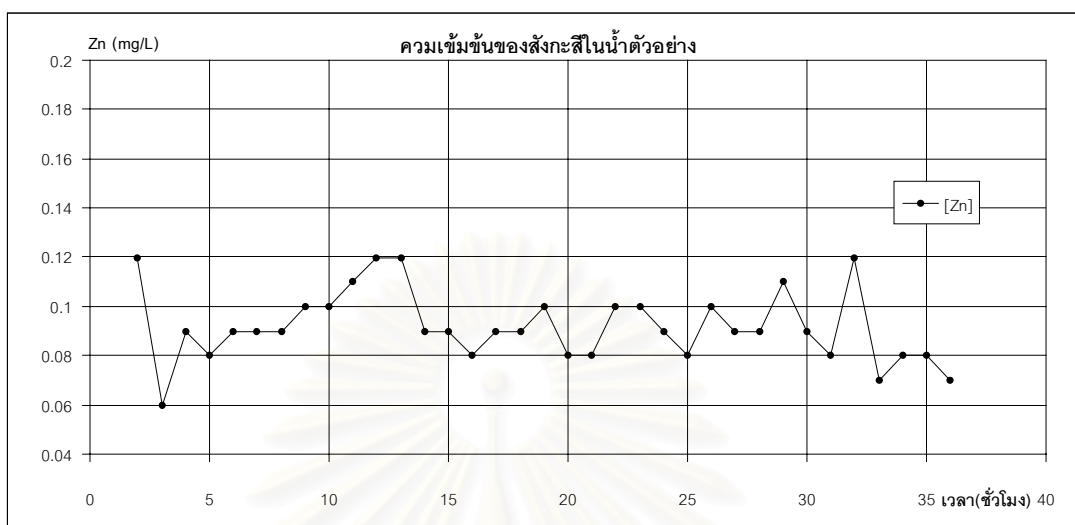
ภาพที่ 4.36 ค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดตีดผิวแบบคอลัมน์ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.37 ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.38 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.39 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากถังดูดติตผิวแบบคอลัมน์ที่ระดับความลึก 180 เซนติเมตร ในช่วงเวลาต่างๆ

จากผลการทดลองถังดูดติตผิวแบบคอลัมน์ ในด้านอัตราการไหลของน้ำเสีย เมื่อเริ่มทำการทดลองมีอัตราการไหลเริ่มต้น 38 ml/min เมื่อทำการทดลองอัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 60 ml/min เมื่อเวลา 11 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัตราการไหลค่อนข้างคงที่และค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งหยุดการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 36 ชั่วโมงโดยที่มีอัตราการไหลของน้ำ 25 ml/min

- ทองแดง จากผลการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ชั่วโมงที่ 30 ค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำออกจากถังมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเข้าถังดูดติตผิว

- นิกเกิล จากผลการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของนิกเกิลทองแดงในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลง จนถึงค่าที่ต่ำที่สุดที่ช่วงเวลาหนึ่งและค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นความเข้มข้นจนกระทั่งความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำออกมีค่ามากกว่าน้ำเข้า ที่ชั่วโมงที่ 30

- ตะกั่ว จากผลการทดลอง ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเวลาการทดลองชั่วโมงที่ 8 ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำออกมีค่ามากกว่าน้ำเข้า

- สังกะสี จากผลการทดลอง ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำออกมีค่าต่ำกว่าน้ำเข้าถังดูดติตผิวตลอดการทดลองจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

4.5 วิจารณ์ผลการทดลอง

- การศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบของเศษคอนกรีตที่ใช้ทำการวิจัย

จากข้อมูลทางกายภาพของเศษคอนกรีตพบว่าเศษคอนกรีตมีพื้นที่ผิวโดยประมาณ 10 ตร.ม./ก. ซึ่งเมื่อเทียบกับตัวดูดติดผิวที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเช่น ถ่านกัมมันต์ ชนิด Granular Activated Carbon Nuchar WV-G(มันดิน,2538) ซึ่งมีพื้นที่ผิว ประมาณ 1100 ตร.ม./ก. และมีความหนาแน่นปรากฏ 0.448 ก./มล. ซึ่งจะเห็นว่าเศษคอนกรีตมีพื้นที่ผิวน้อยกว่ามาก (ประมาณ 110 เท่า) และมีความหนาแน่นมากกว่า (3 เท่า) ซึ่งหากใช้เศษคอนกรีตกำจัดโลหะหนัก โดยกระบวนการดูดติดผิวอย่างเดียวแล้ว ประสิทธิภาพที่ได้น่าจะต่ำกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัด

จากองค์ประกอบทางเคมีของเศษคอนกรีตก่อนและหลังการทดลองถึงดูดติดผิวแบบ คอลัมน์ พบว่าปริมาณ Ca ลดลง ในขณะที่ Si มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่า Ca ที่อยู่ในเศษคอนกรีต ละลายออกมาจากตัวเศษคอนกรีตเอง ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเมื่อเกิดไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์แล้วจะเกิด Ca(OH)_2 ปะปนอยู่ในเนื้อคอนกรีตและเมื่อเอาเศษคอนกรีตมาทำการทดลอง Ca(OH)_2 ที่ปะปนอยู่จะละลายออกมาอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งทำให้พีเอชของน้ำเสียที่ผ่านถึงดูดติดผิวในช่วงแรกมีพีเอชประมาณ 10

- การกำจัดโลหะทั้ง 5 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่เศษคอนกรีตลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์พบว่า พีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจาก OH^- ไอออนที่มาจาก Ca(OH)_2 ในเศษคอนกรีต และในขณะเดียวกัน ความเข้มข้นของโลหะในน้ำก็ลดลง เมื่อพิจารณาค่าคงที่ผลคูณการละลาย

จากสมการ

$$[\text{M}^{+n}][\text{OH}^-]^n = K_{sp} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

เมื่อ $[\text{M}^{+n}] =$ แทนความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำที่ประจุบวก n

$[\text{OH}^-] =$ แทนความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

$K_{sp} =$ แทนค่าคงที่ผลคูณการละลาย ซึ่งมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง

จากผลการทดลองซึ่งพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป พีเอชของน้ำเพิ่ม ซึ่งก็คือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหมือนกับกระบวนการกำจัดโลหะที่อยู่ในน้ำเสียทั่วไป คือการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ จากกสมการของค่าคงที่ผลคูณการละลาย(สมการ 4.3) เมื่อผลคูณของความเข้มข้นของไอออนของโลหะ $[\text{M}^{+n}]$ และไฮดรอกไซด์ไอออน

$[\text{OH}^-]$ ในน้ำมีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลคูณการละลาย จะเกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์แยกออกมาจากสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจากการทดลองก็คือไฮดรอกไซด์ของโลหะทั้ง 5 ชนิดที่นำมาทำลองนั่นเอง

โครเมียม

เมื่อแทนค่าความเข้มข้นของไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ในสมการค่าคงที่ผลคูณการละลาย ดังสมการ

$$\begin{aligned} [\text{M}^{n+}][\text{OH}^-]^n &= K_{sp} \\ \text{ให้} [\text{M}^{n+}] &= \text{ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียในหน่วย mole/L} \\ [\text{OH}^-] &= \text{ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งได้จากค่าพีเอช} \\ \text{pH} &= -\log[\text{H}_3\text{O}^+] \\ 14 &= \text{pH} + \text{pOH} \\ \text{pOH} &= -\log[\text{OH}^-] \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำ 10 mg/L คิดเป็นความเข้มข้น

$$\text{โครเมียม} = 10 \text{ mg/L} = 0.01/51.996 = 1.9232 \times 10^{-4} \text{ mole/L}$$

$$\text{ไฮดรอกไซด์ไอออนโดยประมาณ} = 14 - \text{pH} = 14 - 8 = 6 = 1 \times 10^{-6} \text{ mole/L}$$

ผลคูณความเข้มข้นของไอออนทั้งสองเท่ากับ

$$= 1.9232 \times 10^{-4} \times (1 \times 10^{-6})^3 = 1.9232 \times 10^{-22}$$

เมื่อเทียบกับค่าคงที่ผลคูณการละลายของ $\text{Cr}(\text{OH})_2$ จากตารางที่ 2.1 ซึ่งมีค่า 6×10^{-31}

จะเห็นได้ว่าผลคูณความเข้มข้นของ Cr^{3+} และ OH^- ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลองมีค่ามากกว่า และค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลง จากทฤษฎีการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อผลคูณการละลายของไอออนในน้ำเสียมีค่ามากกว่า จะเกิดการตกตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งจากการคำนวณข้างต้นจะเห็นว่า ผลคูณของความเข้มข้นของไอออนทั้งสองมีค่ามากกว่าค่า K_{sp} และความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

ทองแดง

เมื่อแทนค่าความเข้มข้นของไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ในสมการค่าคงที่ผลคูณการละลาย ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 [M^{n+}][OH^-]^n &= K_{sp} \\
 \text{ให้ } [M^{n+}] &= \text{ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียในหน่วย mole/L} \\
 [OH^-] &= \text{ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งได้จากค่าพีเอช} \\
 \text{pH} &= -\log[H_3O^+] \\
 14 &= \text{pH} + \text{pOH} \\
 \text{pOH} &= -\log[OH^-]
 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำ 10 mg/L คิดเป็นความเข้มข้น

$$\text{ทองแดง} = 10 \text{ mg/L} = 0.01/63.55 = 1.5736 \times 10^{-4} \text{ mole/L}$$

$$\text{ไฮดรอกไซด์ไอออนโดยประมาณ} = 14 - \text{pH} = 14 - 8 = 6 = 1 \times 10^{-6}$$

ผลคูณความเข้มข้นของไอออนทั้งสองเท่ากับ

$$= 1.5736 \times 10^{-4} \times (1 \times 10^{-6})^2 = 1.5736 \times 10^{-16}$$

เมื่อเทียบกับค่าคงที่ผลคูณการละลายของ Cu(OH)_2 จากตารางที่ 2.1 ซึ่งมีค่า 2×10^{-19} จะเห็นได้ว่าผลคูณความเข้มข้นของ Cu^{2+} และ OH^- มีค่ามากกว่า และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า มีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

ในการทำงานเดียวกันสำหรับโลหะอีก 3 ชนิดที่เหลือเมื่อคำนวณแบบเดียวกัน

$$\text{นิกเกิล } 10 \text{ mg/L} = 0.01/58.71 = 1.703 \times 10^{-4}$$

พีเอชของน้ำ 8 ผลคูณความเข้มข้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและไอออนของนิกเกิล

$$\begin{aligned}
 &= 1.703 \times 10^{-4} \times (1 \times 10^{-6})^2 \\
 &= 1.703 \times 10^{-16} < K_{sp} = 2.0 \times 10^{-16}
 \end{aligned}$$

$$\text{ตะกั่ว } 10 \text{ mg/L} = 0.01/207.2 = 4.826 \times 10^{-5}$$

พีเอชของน้ำ 8 ผลคูณความเข้มข้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและไอออนของนิกเกิล

$$\begin{aligned}
 &= 4.826 \times 10^{-5} \times (1 \times 10^{-6})^2 \\
 &= 4.826 \times 10^{-17} < K_{sp} = 2.5 \times 10^{-16}
 \end{aligned}$$

$$\text{สังกะสี } 10 \text{ mg/L} = 0.01/56.38 = 1.529 \times 10^{-4}$$

พีเอชของน้ำ 8 ผลคูณความเข้มข้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและไอออนของนิกเกิล

$$\begin{aligned}
 &= 1.529 \times 10^{-4} \times (1 \times 10^{-6})^2 \\
 &= 1.529 \times 10^{-16} > K_{sp} = 8.0 \times 10^{-18}
 \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า K_{sp} กับค่าผลคูณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์กับไฮดรอกไซด์ไอออน จะพบว่า โครเมียม ทองแดง และสังกะสีจะเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ตามทฤษฎีการตกตะกอน ในขณะที่ตะกั่วและนิกเกิล น่าจะไม่เกิดการตกตะกอน

เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดติดผิวจากสมการการดูดติดผิวของ ฟรุนดิช ซึ่งโลหะทั้ง 5 ชนิดสมการการดูดติดผิวดังนี้

โครเมียม	$y = 51.227X^{0.4787}$	ทองแดง	$y = 15.448X^{0.2531}$
นิกเกิล	$y = 14.833X^{0.341}$	ตะกั่ว	$y = 41.35X^{1.8844}$
สังกะสี	$y = 14.796X^{0.4458}$		

จะพบว่า สมการการดูดติดผิวของฟรุนดิชน่าจะสามารถใช้อธิบายกระบวนการกำจัดโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

ดังนั้นกระบวนการกำจัดโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดในน้ำเสียจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไป โดยโครเมียม ทองแดง และสังกะสี อาศัยกระบวนการตกตะกอนเป็นหลัก ส่วนตะกั่วและนิกเกิลน่าจะอาศัยกระบวนการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน

และจากสมการทั้งหมดเมื่อเทียบกับสมการการดูดติดผิวของ Freundlich คือ $X/M = KC_e^{1/n}$ Faust และ Aly 1987 กล่าวว่า หากเราพิจารณาค่า $1/n$ จากสมการที่ได้จากการพล็อตกราฟ หากค่า $1/n$ มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิวที่ดี ที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดสูง แต่ความสามารถจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดมีค่าน้อยลง หากค่า $1/n$ น้อยกว่าหนึ่งมากๆ กราฟที่ได้จะมีความชันน้อย ความเข้มข้นของตัวถูกดูดที่มีค่าน้อยจะมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด จะเห็นว่าค่า $1/n$ จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง และจากผลการทดลองพบว่าเศษคอนกรีตมีความสามารถในการดูดติดผิวได้ดี (% Removal สูง) ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวมาข้างต้น

ในการทดลองการกำจัดโลหะในน้ำเสียเสียดังกล่าวด้วยดูดติดผิวแบบคอลัมน์พบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านถึงมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วง 10 ชั่วโมงแรก และค่อยๆลดลง และกลับมาเพิ่มขึ้นในช่วงชั่วโมงที่ 18 จนถึง ชั่วโมงที่ 20 และค่อยๆลดลงจนต่ำสุดที่ชั่วโมงที่ 36 จนหยุดการทดลอง ผลของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าเวลาการสัมผัสระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์และเศษคอนกรีต ซึ่งจากความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวน่าจะแสดงให้เห็นความเข้มข้นของโลหะในน้ำที่มีค่าเพิ่มขึ้น

- ทองแดง จากผลการทดลองพบความเข้มข้นของทองแดงมีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้น ตามเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถังค่อยๆลดลง และหมดประสิทธิภาพเมื่อเวลาการทดลองผ่านไปถึงชั่วโมงที่ 29 และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่เวลาเริ่มต้นซึ่งคาดว่าจะมีประสิทธิผลการกำจัดมากที่สุด พบว่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลงจาก ประมาณ 0.7 mg/L หรือประมาณ 0.3 - 0.4 mg/L หรือกำจัดได้ประมาณ 50 % และประสิทธิภาพการกำจัดของถังค่อยๆลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

- นิกเกิล จากผลการทดลองพบความเข้มข้นของนิกเกิลมีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้น ตามเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลของถังค่อยๆลดลง และหมดประสิทธิภาพเมื่อเวลาการทดลองผ่านไปถึงชั่วโมงที่ 29 เช่นเดียวกับทองแดง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดจะพบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นซึ่งเป็นช่วงที่น่าจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเศษคอนกรีตในถังดูดติดผิวสามารถกำจัดได้ ประมาณ 6% แต่หากพิจารณาช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากที่สุดคือในช่วงชั่วโมงที่ 10 ประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็น 50 %

- ตะกั่ว จากผลการทดลองพบว่าเวลาต่างๆและระดับความลึกต่างๆ ความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าไม่แตกต่างกัน หรืออาจกล่าวได้ว่า ถังไม่สามารถกำจัดน้ำเสียจริงที่มีตะกั่วความเข้มข้นในช่วงประมาณ 0.6 mg/L ได้

- สังกะสี จากผลการทดลองพบว่าถังดูดติดผิว มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ถังมีประสิทธิภาพมีการกำจัดสังกะสีได้สูงสุด 50 % (ความเข้มข้นของสังกะสีลดลงครึ่งหนึ่ง) อย่างไรก็ตามการทดลองถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ต้องยุติลงเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านถังมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน แต่ความลึกของชั้นคอนกรีตต่างกัน พบว่าที่ความลึกมากกว่า %การกำจัดไม่ได้มีค่ามากกว่าเสมอไป ทั้งนี้อาจเนื่องจากคุณสมบัติของตัวน้ำเสียเองที่มีความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดต่ำกว่าและเป็นน้ำเสียจริง ซึ่งมีองค์ประกอบอื่นๆปะปนอยู่มาก(ค่า TDS ของน้ำเสียมีค่ามากกว่า 4 mg/L)

สมดุลมวลสาร

รายการคำนวณ สมดุลมวลสาร

การคำนวณสมดุลมวลสารสามารถหาได้จากสมการ

ปริมาณ ของโลหะหนักที่เข้าถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์

= ปริมาณ ของโลหะหนักที่สะสมในถัง + ปริมาณโลหะหนักที่ออกจากถัง

โดยที่ ปริมาณของโลหะหนักในแต่ละส่วนที่หาได้จาก ปริมาตรของน้ำเสียคูณกับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

จากการผลการทดลองอัตราการไหลของถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์ ซึ่งมีอัตราการไหลไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการหาปริมาณโลหะหนักในแต่ละส่วนจะหาได้จาก ปริมาตรของน้ำเสียในช่วงเวลานั้นๆ คูณกับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียที่ชั่วโมงนั้น ผลการดุลมวลสารของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดดังแสดงใน ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงสมดุลมวลสารของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ผ่านการบำบัดด้วยตัวกลางเศษ

คอนกรีต ในถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์ในชั่วโมงที่ 0- 30

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะ ที่เข้า(mg)	ปริมาณโลหะ สะสม(mg)	ปริมาณโลหะ ที่ออก(mg)	%
ทองแดง	69.32	18.86	50.46	27.20
นิกเกิล	5.22	5.51	9.71	36.20
ตะกั่ว	56.38	-	-	-
สังกะสี	13.86	4.90	8.96	35.35

จากผลการทดลองถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์ สามารถแบ่งการทดลองถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์ได้เป็น 2 ช่วง

ช่วงที่ 1 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0-30

ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 31 เป็นต้นไป

ในช่วงที่ 1 จากภาพที่ 4.33 ถึง 4.39 จะพบว่า ทองแดง นิกเกิล และสังกะสีมีการสะสมในถังกูดตีดผิวแบบคอล์มน์ ซึ่งเห็นได้จากความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในน้ำเสียที่ไหลออกจากถัง มีค่าลดลง ส่วนตะกั่วไม่เกิดการสะสมในถัง โดยที่ตะกั่วในน้ำเสียที่ออกจากถังมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียที่เข้าถัง

ในช่วงที่ 2 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 31 เป็นต้นไปโลหะหนัก 3 ชนิด ไม่มีการสะสม โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของโลหะหนักมีค่ามากกว่าในน้ำเข้า

เมื่อพิจารณาค่าพีเอช ของน้ำเสียที่ไหลออกจากถังดูดติดผิวจะเห็นว่าค่าเป็นต่างในช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0 - 30) และมีค่าน้อยกว่า 7 ในช่วงที่ 2 เมื่อพิจารณา เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสะสมโลหะในถัง จะเห็นว่าสอดคล้องกัน กล่าวคือ มีพีเอชเป็นต่างในช่วงชั่วโมงที่ 0 - 30 เกิดการสะสมของโลหะหนัก และเมื่อพีเอชน้อยกว่า 7 ไม่เกิดการสะสม(ความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำออกมาเกินกว่าน้ำเข้า) นอกจากนี้ โลหะหนักที่สะสมยังหลุดออกมาจากถังด้วย

ในช่วงที่ 2 โลหะหนักที่สะสมอยู่ในถังจะละลายกลับออกมาเท่ากับ

ทองแดง 4.52 mg

นิกเกิล 1.05 mg

สังกะสี โลหะที่สะสมยังไม่ละลายออกมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะทั้ง 5 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ และการทดลองกำจัดโลหะในน้ำเสียจริงด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าเศษคอนกรีตสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในสภาวะแบทช์ต่างๆดังนี้

- โครเมียม เวลาที่สัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที และค่าความพีเอชที่เหมาะสมคือค่าเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์
- ทองแดง เวลาที่สัมผัสที่เหมาะสมคือ 30 นาที และค่าความพีเอชที่เหมาะสมคือค่าเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์
- นิกเกิล เวลาที่สัมผัสที่เหมาะสมคือ 90 นาที และค่าความพีเอชที่เหมาะสมคือค่าเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์
- ตะกั่ว เวลาที่สัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที และค่าความพีเอชที่เหมาะสมคือค่าเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์
- สังกะสี เวลาที่สัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที และค่าความพีเอชที่เหมาะสมคือค่าเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์

2) พีเอชเริ่มต้นที่แตกต่างกันในน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พีเอชท้ายของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน

3) การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดิช สำหรับโลหะทั้ง 5 ชนิดพบว่า สามารถใช้ไอโซเทอมของฟรอนดิชในการอธิบายกระบวนการดูดติดผิวของโลหะ 4 ชนิดคือ โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ

4) ผลจากการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์พบว่า ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์สามารถกำจัดโลหะที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงได้ 3 ชนิด คือ ทองแดง นิกเกิล และ สังกะสี โดยมีความสามารถในการบำบัดโลหะทั้งสามชนิดได้ไม่เกิน 50 % หรือลดความเข้มข้นลงได้ครึ่งหนึ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงประมาณ 0.7 mg/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล ประมาณ 0.17 mg/L และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีที่ 0.14 mg/L แต่ไม่สามารถกำจัดตะกั่วที่อยู่ในน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.61 mg/L ได้

5) ที่ชั่วโมงที่ 30 ของการทดลอง ถังดูดติดผิวหมดประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง และนิกเกิลที่อยู่ในน้ำเสียจริง เนื่องจากกระบวนการกำจัดโลหะส่วนใหญ่เป็นกระบวนการตกตะกอน ดังนั้นเมื่อพีเอชของน้ำเสียมีค่าต่ำลง โลหะหนักในน้ำเสียจึงไม่ตกตะกอนเป็นของแข็งติดอยู่ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

6) จากผลการทดลองถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ มีการตกตะกอนเกิดขึ้นในถัง ซึ่งทำให้อัตราการไหลของน้ำเสียลดลง

7) จากปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ทั้งหมดจนถึงชั่วโมงที่ 30 มีปริมาณน้ำไหลผ่านถังดูดติดผิวทั้งหมด 91.83 ลิตร เปรียบเทียบกับปริมาตรตัวกลาง ซึ่งมีปริมาตร 0.412 ลิตร สรุปได้ว่า สามารถทำงานได้ประมาณ 222.34 Bed volume

8) เศษคอนกรีตมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L ได้ โดยอาศัยกระบวนการตกตะกอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดสอบการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเศษคอนกรีตในปริมาณต่างๆ กับความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก

2. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอื่นๆ ที่มีค่ามากกว่า 10 mg/L

3. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยตัวกลางเศษคอนกรีตโดยอาศัยเทคนิคการกรอง

4. ศึกษาถึงผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุต.2536. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บ. คอนกรีตผสมเสร็จ
ซีแพค.
- นันทนา ชูจันทร์ .2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์.2537. วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- วินิต ช่อวิเชียร.2527. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์,

ภาษาอังกฤษ

- Aziz, H.A. and Smith, P.G.1996. Removal of manganese from water using crushed
dolomite filtration technique. Water Research 30 : 489-492.
- Aziz, H.A., et al, 2001. Removal of Copper from water using limestone filtration technique
Determination of mechanism of removal. Environmental International 26 : 395-399.
- Coombs, C.F., Jr. 1990. Printed circuits handbook. 2nd ed. New York : McGraw-Hill.
- Dimitrova, S.V. and Mehandgiev, D.R. 1998. Lead removal from aqueous solutions by
Granulated blast-furnace slag . Water Research 32 : 3289 – 3292.
- Dimitrova, S.V. 1996. Metal sorption on blast-furnace slag. Water Research 30 : 228-232.
- Eckenfelder, W.W. 2000. Industrial water pollution control. 3rd ed. Boston : McGraw-Hill.
- Faust, S.D. and Aly, O.M. 1987. Adsorption processes for water treatment. Boston :
Butterworth.
- Lea, F.M. 1970. The chemistry of cement and concrete. 3rd ed. New York : Chemical
Publishing.
- Lee, M.Y., Jong, M.P. and Yang, J.W. 1998. Micro precipitation of lead on the surface of
crab shell particle. Process Biochemistry 32 : 671-677.

- Lee, M.Y., Lee, S.H., Shin, H.J., Kajiuchi, T. and Yang, J.W. 1998 Characteristics of lead removal by crab shell particles Process Biochemistry 33 : 749-753.
- Metcalf and Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering : treatment disposal reuse. 3rd ed. New York : McGraw-Hill.
- Patterson, J.W. 1985. Industrial waste water treatment technology. 2^{ed}. Boston : Butterworth.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., and Sing, K. 1999. Adsorption by powders & porous solids : principles, methodology and applications. San Diego, Calif. : Academic Press.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L., and Parkin, G.F. Chemistry for environmental engineering. 4th ed. New York : McGraw-Hill,
- Weng, C.H., Huang, C.P., Allen, H.E., Leavens, P.B. and Sanders, P.F. 1996. Chemical interaction between Cr(VI) and Hydrous Concrete Particles. Environmental Science and Technology 30 : 371-376.
- Wu, F.C., Tsen, R.L. and Juang, R.S. 1999. Role of pH in Metal adsorption from Aqueous Solution Containing Chelating Agents on Chitosan. Industrial Engineering Chemistry Research 38 : 270-275.
- Yao, K.M., Habbian, M.T. and O' Melia, C.R. 1971. Water and wastewater Filtration. Environmental Science and Technology 5 : 1105 - 1112.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก - 1 ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของโครเมียม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Cr]	% removal	pH	[Cr]	% removal	pH	[Cr]	% removal	pH		
5	4.36	56.4	5.72	4.64	53.6	5.67	5.17	48.30	5.19	52.77	4.11
10	2.10	79.0	7.04	1.80	82.0	7.17	2.00	80.00	7.27	80.33	1.52
20	1.02	89.8	7.40	0.91	90.9	7.46	1.03	89.70	7.44	90.13	0.83
30	0.77	92.3	7.50	0.77	92.3	7.46	0.65	93.50	7.55	92.70	0.69
60	0.26	97.5	7.53	0.30	97.0	7.60	0.38	96.20	7.76	96.90	0.65
90	1.08	89.2	7.77	1.07	89.3	7.68	1.25	87.50	7.76	88.67	1.01
120	1.77	82.3	7.62	1.88	81.2	7.71	1.70	83.00	7.66	82.17	0.90
150	2.02	79.8	7.75	1.82	81.8	7.66	1.90	81.00	7.74	80.87	1.00
180	2.21	78.0	7.71	1.89	81.1	7.74	1.63	83.70	7.70	80.93	2.85
240	1.63	83.7	7.78	1.92	80.8	7.79	1.86	81.50	7.79	82.00	1.51
300	1.23	87.7	7.65	1.63	83.7	7.76	1.06	89.40	7.80	86.93	2.92
360	2.07	79.3	7.47	2.36	76.4	7.49	2.14	78.70	7.62	78.13	1.5

ตาราง ก - 2 ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของทองแดง

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Cu]	% removal	pH	[Cu]	% removal	pH	[Cu]	% removal	pH		
5	1.89	81.1	6.61	1.52	84.8	6.46	1.54	84.6	6.62	83.50	2.08
10	0.38	96.2	6.82	0.62	93.8	6.76	0.8	92.0	6.74	94.00	2.10
20	0.17	98.3	7.09	0.25	97.5	7.09	0.19	98.1	7.17	97.97	0.41
30	0.10	99.0	7.18	0.08	99.2	7.18	0.11	98.9	7.38	99.03	0.15
60	0.09	99.1	7.55	0.11	98.9	7.45	0.09	99.1	7.54	99.03	0.11
90	0.10	99.0	7.54	0.09	99.1	7.5	0.09	99.1	7.51	99.07	0.05
120	0.09	99.1	7.42	0.16	98.4	7.31	0.09	99.1	7.45	98.87	0.40
150	0.12	98.8	7.69	0.13	98.7	7.62	0.07	99.3	7.59	98.93	0.32
180	0.13	98.7	7.37	0.07	99.3	7.33	0.07	99.3	7.37	99.10	0.34
240	0.08	99.2	7.62	0.09	99.1	7.62	0.07	99.3	7.53	99.20	0.10

ตาราง ก - 2(ต่อ) ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของทองแดง

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Cu]	% removal	pH	[Cu]	% removal	pH	[Cu]	% removal	pH		
300	0.08	99.2	7.57	0.07	99.3	7.8	0.07	99.3	7.73	99.27	0.05
360	0.06	99.4	7.47	0.12	98.8	7.42	0.09	99.1	7.57	99.10	0.30

ตาราง ก - 3 ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของนิกเกิล

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Ni]	% removal	pH	[Ni]	% removal	pH	[Ni]	% removal	pH		
5	1.41	85.9	7.42	1.71	82.90	7.43	1.84	81.60	7.55	83.47	2.20
10	1.27	87.3	7.60	1.14	88.60	7.63	0.9	91.00	7.66	88.97	1.87
20	0.32	96.8	7.74	0.46	95.40	7.69	0.43	95.70	7.76	95.97	0.73
30	0.46	95.4	7.69	0.38	96.20	7.81	0.24	97.60	7.76	96.40	1.11
60	0.13	98.7	7.83	0.15	98.50	7.85	0.14	98.60	7.79	98.60	0.10
90	0.12	98.8	7.72	0.11	98.90	7.85	0.12	98.80	7.84	98.83	0.05
120	0.13	98.7	7.68	0.1	99.00	7.68	0.1	99.00	7.79	98.90	0.17
150	0.08	99.2	7.99	0.09	99.10	8.07	0.08	99.20	8.10	99.17	0.05
180	0.09	99.1	7.94	0.06	99.40	8.04	0.11	98.90	7.94	99.13	0.25
240	0.11	98.9	8.04	0.08	99.20	8.01	0.1	99.00	8.00	99.03	0.15
300	0.11	98.9	7.95	0.1	99.00	7.92	0.08	99.20	7.90	99.03	0.15
360	0.08	99.2	7.87	0.09	99.10	7.86	0.11	98.90	7.85	99.07	0.15

ตาราง ก - 4 ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของตะกั่ว

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Pb]	% removal	pH	[Pb]	% removal	pH	[Pb]	% removal	pH		
5	0.72	92.8	6.57	0.65	93.5	6.65	1.12	88.8	6.59	91.70	2.53
10	0.33	96.7	7.26	0.34	96.6	7.28	0.35	96.5	7.29	96.60	0.10
20	0.37	96.3	7.44	0.326	96.7	7.23	0.4	96	7.37	96.35	0.28
30	0.45	95.5	7.44	0.45	95.5	7.47	0.43	95.7	7.46	95.57	0.11

ตาราง ก - 4(ต่อ) ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของตะกั่ว

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Pb]	% removal	pH	[Pb]	% removal	pH	[Pb]	% removal	pH		
60	0.41	95.9	7.54	0.41	95.9	7.60	0.42	95.8	7.64	95.87	0.05
90	0.4	96.0	7.66	0.46	95.4	7.62	0.49	95.1	7.71	95.50	0.45
120	0.57	94.3	7.68	0.47	95.3	7.77	0.51	94.9	7.56	94.83	0.50
150	0.54	94.6	7.70	0.6	94.0	7.72	0.56	94.4	7.70	94.33	0.31
180	0.57	94.3	7.75	0.59	94.1	7.72	0.65	93.5	7.78	93.97	0.42
240	0.6	94.0	7.76	0.59	94.1	7.78	0.62	93.8	7.82	93.97	0.15
300	0.61	93.9	7.82	0.55	94.5	7.83	0.52	94.8	7.85	94.40	0.46

ตาราง ก - 5 ผลการทดลองเรื่องเวลาสัมผัสของสังกะสี

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย	SD
	[Zn]	% removal	pH	[Zn]	% removal	pH	[Zn]	% removal	pH		
5	2.84	71.6	6.69	1.71	82.9	6.09	1.85	81.50	7.06	78.67	6.16
10	0.48	95.2	7.21	0.44	95.6	7.38	0.38	96.20	7.50	95.67	0.50
20	0.42	95.8	7.82	0.24	97.6	7.76	0.28	97.20	7.60	96.87	0.95
30	0.21	97.9	7.69	0.21	97.9	7.60	0.21	97.90	7.68	97.90	0.00
60	0.31	96.9	7.65	0.21	97.9	7.69	0.28	97.20	7.57	97.33	0.51
90	0.16	98.4	7.72	0.16	98.4	7.74	0.16	98.40	7.80	98.40	0.00
120	0.13	98.7	7.83	0.15	98.5	7.81	0.14	98.60	7.85	98.60	0.10
150	0.12	98.8	7.85	0.11	98.9	7.87	0.14	98.60	7.70	98.77	0.15
180	0.13	98.7	8.04	0.13	98.7	8.04	0.16	98.40	7.92	98.60	0.17
240	0.11	98.9	8.04	0.1	99.0	8.02	0.09	99.10	8.00	99.00	0.10
300	0.09	99.1	8.04	0.11	98.9	8.00	0.10	99.00	8.04	99.00	0.10
360	0.10	99.0	8.04	0.09	99.1	7.97	0.10	99.00	7.98	99.03	0.06

ตารางที่ ก – 6 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมที่พีเอช 4 – 9

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย % removal	SD
	pH ท้าย	[Cr]	% removal	pH ท้าย	[Cr]	% removal	pH ท้าย	[Cr]	% removal		
4	7.87	0.95	90.54	7.95	0.84	91.63	7.79	0.89	91.09	91.1	0.55
5	7.92	0.83	91.66	7.78	0.60	93.96	7.84	1.03	89.72	91.8	0.12
6	7.87	1.19	88.15	7.97	1.45	85.52	7.93	1.19	88.13	87.3	1.51
7	7.95	1.22	87.78	7.96	1.27	87.27	8.02	1.31	86.93	87.3	0.46
8	8.02	1.10	88.98	8.03	1.44	85.57	8.05	1.30	86.98	87.2	1.71
9	8.08	1.36	86.41	8.09	1.39	86.08	8.07	1.04	89.59	87.4	1.44

ตารางที่ ก – 7 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงที่พีเอช 4 – 9

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย % removal	SD
	pH ท้าย	[Cu]	% removal	pH ท้าย	[Cu]	% removal	pH ท้าย	[Cu]	% removal		
4	7.75	0.09	99.1	7.76	0.07	99.3	7.74	0.10	99.0	99.1	0.15
5	7.79	0.05	99.5	7.8	0.07	99.3	7.86	0.07	99.3	99.4	0.12
6	7.72	0.06	99.4	7.88	0.06	99.4	7.93	0.05	99.5	99.4	0.06
7	7.79	0.08	99.2	7.84	0.08	99.2	7.8	0.09	99.1	99.2	0.06
8	7.84	0.05	99.5	7.88	0.02	99.8	7.92	0.03	99.7	99.7	0.15
9	7.7	0.05	99.5	7.74	0.07	99.3	7.74	0.04	99.6	99.5	0.15

ตารางที่ ก – 8 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลที่พีเอช 4 – 9

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย % removal	SD
	pH ท้าย	[Ni]	% removal	pH ท้าย	[Ni]	% removal	pH ท้าย	[Ni]	% removal		
4	7.78	0.40	96.0	7.80	0.64	93.6	7.77	0.66	93.4	94.3	1.45
5	7.78	0.49	95.1	7.85	0.45	95.5	7.83	0.62	93.8	94.8	0.89
6	7.82	0.59	94.1	7.79	0.55	94.5	7.83	0.75	92.5	93.7	1.06
7	7.92	0.64	93.6	7.90	0.83	91.7	7.89	0.78	92.2	92.5	0.98
8	7.92	0.49	95.1	7.94	0.66	93.4	7.93	0.43	95.7	94.7	1.19
9	7.95	0.16	98.4	7.94	0.21	97.9	7.95	0.19	98.1	98.1	0.25

ตารางที่ ก - 9 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่พีเอช 4 - 9

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย % removal	SD
	pH ท้าย	[Pb]	% removal	pH ท้าย	[Pb]	% removal	pH ท้าย	[Pb]	% removal		
4	7.95	0.30	97.0	7.93	0.32	96.8	7.98	0.26	97.4	97.1	0.31
5	7.98	0.20	98.0	8.00	0.24	97.7	8.05	0.37	96.3	97.3	0.91
6	8.07	0.30	97.0	8.07	0.39	96.2	8.04	0.43	95.7	96.3	0.66
7	8.07	0.54	94.6	8.07	0.68	93.3	8.09	0.65	93.5	93.8	0.71
8	8.07	0.59	94.1	8.14	0.55	94.5	8.12	0.62	93.8	94.1	0.35
9	8.11	0.70	93.0	8.07	0.69	93.1	8.08	0.69	93.1	93.1	0.06

ตารางที่ ก - 10 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีที่พีเอช 4 - 9

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย % removal	SD
	pH ท้าย	[Zn]	% removal	pH ท้าย	[Zn]	% removal	pH ท้าย	[Zn]	% removal		
4	7.32	0.46	95.4	7.47	0.26	97.4	7.50	0.32	96.8	96.53	1.03
5	7.56	0.34	96.6	7.41	0.31	96.9	7.45	0.29	97.1	96.87	0.25
6	7.54	0.18	98.2	7.71	0.21	97.9	7.66	0.19	98.1	98.07	0.15
7	7.64	0.35	96.5	7.69	0.29	97.1	7.66	0.30	97.0	96.87	0.32
8	7.61	0.20	98.0	7.75	0.18	98.2	7.80	0.20	98.0	98.07	0.12
9	7.84	0.14	98.6	7.60	0.21	97.9	7.78	0.22	97.8	98.10	0.44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก – 11 ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนดิช ในน้ำเสียโครเมียม

น้ำหนักปุ๋น(M)(g)	Co[Cr](PPM)	Ce[Cr] (PPM)	X (mg)	X/M (mg/g)
0.0996	10.000	2.700	0.365	0.1832
0.1009	10.000	2.270	0.387	0.1915
0.1002	10.000	2.650	0.368	0.1834
0.2003	10.000	0.396	0.480	0.1199
0.2000	10.000	0.291	0.485	0.1214
0.2005	10.000	0.359	0.482	0.1202
0.4000	10.000	0.087	0.496	0.0620
0.4015	10.000	0.060	0.497	0.0619
0.4006	10.000	0.084	0.496	0.0619
1.0000	10.000	0.105	0.495	0.0247
0.9995	10.000	0.098	0.495	0.0248
1.0013	10.000	0.100	0.495	0.0247

ตารางที่ ก – 12 ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนดิช ในน้ำเสียทองแดง

น้ำหนักปุ๋น(M)(g)	Co[Cu](PPM)	Ce[Cu] (PPM)	X (mg)	X/M (mg/g)
0.1000	10	6.86	0.1570	1.5700
0.1007	10	6.81	0.1595	1.5839
0.0993	10	6.86	0.1570	1.5811
0.2010	10	5.36	0.2320	1.1542
0.2005	10	5.37	0.2315	1.1546
0.2004	10	5.57	0.2215	1.1053
0.4006	10	3.00	0.3500	0.8737
0.4001	10	3.69	0.3155	0.7886
0.4004	10	3.28	0.3360	0.8392
1.0002	10	0.11	0.4945	0.4944
1.0003	10	0.18	0.4910	0.4909
1.0010	10	0.15	0.4925	0.4920

ตารางที่ ก – 13 ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนดิช ในน้ำเสียที่เกิด

น้ำหนักปูน(M)(g)	Co[Ni](PPM)	Ce[Ni] (PPM)	X (mg)	X/M (mg/g)
0.1004	10	6.57	0.1715	1.7082
0.0998	10	6.60	0.1700	1.7034
0.1002	10	6.67	0.1665	1.6617
0.2006	10	5.90	0.2050	1.0219
0.1999	10	5.66	0.2170	1.0855
0.2002	10	5.61	0.2195	1.0964
0.3996	10	1.92	0.4040	1.0110
0.4001	10	1.99	0.4005	1.0010
0.4004	10	1.99	0.4005	1.0002
1.0005	10	0.38	0.4810	0.4808
0.9998	10	0.30	0.4850	0.4851
1.0006	10	0.25	0.4875	0.4872

ตารางที่ ก – 14 ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนดิช ในน้ำเสียตะกั่ว

น้ำหนักปูน(M)(g)	Co[Pb](PPM)	Ce[Pb] (PPM)	X (mg)	X/M (mg/g)
0.1006	10	0.964	0.4518	0.2246
0.1004	10	0.762	0.4619	0.2300
0.1000	10	0.759	0.4621	0.2310
0.1996	10	1.166	0.4417	0.1106
0.2001	10	1.136	0.4432	0.1107
0.1996	10	0.932	0.4534	0.1136
0.4006	10	0.942	0.4529	0.0565
0.4011	10	0.709	0.4646	0.0579
0.4006	10	0.845	0.4578	0.0571
0.9999	10	0.844	0.4578	0.0229
0.9997	10	0.707	0.4647	0.0232
1.0005	10	0.622	0.4689	0.0234

ตารางที่ ก – 15 ผลการทดลองการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนดิช ในน้ำเสียสังกะสี

น้ำหนักปูน(M)(g)	Co[Zn](PPM)	Ce[Zn] (PPM)	X (mg)	X/M (mg/g)
0.1005	10	6.50	0.1750	1.741
0.1001	10	6.20	0.1900	1.898
0.1005	10	6.28	0.1860	1.851
0.2005	10	4.41	0.2795	1.394
0.2002	10	4.44	0.2780	1.389
0.2004	10	4.49	0.2755	1.375
0.4007	10	2.20	0.3900	0.973
0.4001	10	2.39	0.3805	0.951
0.4000	10	2.02	0.3990	0.998
1.0000	10	0.36	0.4820	0.482
1.0007	10	0.36	0.4820	0.482
1.0008	10	0.35	0.4825	0.482

ตารางที่ ก – 16 ผลการทดลองอัตราการไหลในถังดูดติดผิวแบบแบ่ง

เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการไหล (มล./นาที)	เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการไหล (มล./นาที)	เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการไหล(มล./ นาที)
1	38	13	50	25	51
2	38	14	50	26	51
3	40	15	49	27	51
4	40	16	50	28	51
5	50	17	50	29	51
6	55	18	50	30	45
7	58	19	54	31	43
8	58	20	60	32	41
9	57	21	56	33	39
10	57	22	56	34	37
11	60	23	54	35	30
12	53	24	52	36	20

ตารางที่ ก – 17 ผลการทดลองพีเอชของน้ำตัวอย่างในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	pH (0ชม.)	pH (30ชม.)	pH (60 ชม.)	pH (90 ชม.)	pH (120 ชม.)	pH (150 ชม.)	pH (180 ชม.)
1	7.15	7.32	8.24	8.61	9.32	9.61	9.83
2	7.27	7.27	8.04	8.43	9.01	9.34	9.53
3	7.03	7.29	7.97	8.52	8.74	9.20	9.40
4	7.19	7.28	7.84	8.31	8.65	8.75	8.95
5	7.16	7.45	7.79	8.19	8.36	8.55	8.75
6	7.14	7.55	7.72	7.73	8.07	8.30	8.55
7	7.20	7.76	7.71	7.85	8.05	8.15	8.23
8	7.14	7.43	7.49	7.72	7.93	7.97	8.25
9	7.09	7.80	7.95	8.02	8.19	8.30	8.43
10	7.13	7.79	8.02	8.10	8.12	8.22	8.30
11	7.08	7.75	7.90	7.96	8.10	8.26	8.32
12	7.21	7.78	7.88	8.04	8.13	8.18	8.21
13	7.14	7.92	7.96	8.14	8.26	8.37	8.58
14	7.10	7.97	7.97	8.07	8.17	8.24	8.32
15	7.11	7.06	7.19	7.14	7.27	7.48	7.34
16	7.07	7.18	7.14	7.06	7.31	7.22	7.40
17	7.03	7.12	7.02	7.32	7.29	7.24	7.05
18	7.16	7.32	7.25	7.14	7.22	7.54	7.14
19	7.20	7.14	7.13	7.22	7.39	7.23	7.11
20	7.21	7.45	7.55	7.52	7.58	7.65	7.53
21	7.16	7.32	7.57	7.45	7.61	7.52	7.52
22	7.02	7.39	7.42	7.35	7.70	7.48	7.57
23	7.12	7.37	7.34	7.40	7.43	7.41	7.80
24	7.14	7.62	7.76	7.64	7.84	7.74	7.75
25	7.13	7.52	7.85	7.67	7.84	7.69	7.73
26	7.16	7.52	7.79	7.55	7.64	7.79	7.77

ตารางที่ ก – 17(ต่อ) ผลการทดลองพีเอชของน้ำตัวอย่างในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
------	----	----	----	----	----	----	----

(ชั่วโมง)	(0ชม.)	(30ชม.)	(60 ชม.)	(90 ชม.)	(120 ชม.)	(150 ชม.)	(180 ชม.)
27	7.09	7.44	7.57	7.41	7.68	7.60	7.59
28	7.18	7.55	8.00	7.99	7.77	7.83	7.68
29	7.21	7.57	7.70	7.68	7.92	7.80	7.81
30	7.18	6.36	6.63	6.40	6.21	6.83	6.25
31	7.24	6.29	6.74	6.82	6.70	6.74	6.29
32	7.16	6.47	6.74	6.76	6.58	6.25	6.19
33	7.14	6.52	6.24	6.52	6.65	6.46	6.54
34	7.15	6.28	6.60	6.22	6.14	6.82	6.14
35	7.11	6.34	6.27	6.20	6.35	6.73	6.36
36	7.20	6.68	6.45	6.65	6.28	6.30	6.55

ตารางที่ ก - 18 ผลการทดลองของแข็งละลายของน้ำตัวอย่างในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	TDS (0ชม.)	TDS (30 ชม.)	TDS (60 ชม.)	TDS (90 ชม.)	TDS (120 ชม.)	TDS (150 ชม.)	TDS (180 ชม.)
1							
2	4.220	4.100	4.130	4.130	4.105	4.250	4.590
3	4.230	4.720	4.610	4.519	4.275	4.495	4.460
4	4.115	4.460	4.440	4.405	4.330	4.635	4.650
5	4.125	4.350	4.460	4.485	4.535	4.430	4.470
6	4.105	4.765	4.670	4.550	4.435	4.300	4.380
7	4.205	4.150	4.090	4.255	4.215	4.200	4.155
8	4.125	4.230	4.170	4.205	4.190	4.200	4.160
9	4.115	4.205	4.035	4.175	4.130	4.030	4.250
10	4.220	4.250	4.180	4.025	4.160	4.085	4.215

ตารางที่ ก - 18(ต่อ) ผลการทดลองของแข็งละลายของน้ำตัวอย่างในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	TDS (30 ชม.)	TDS (60 ชม.)	TDS (90 ชม.)	TDS (120 ชม.)	TDS (150 ชม.)	TDS (180 ชม.)
11	4.010	4.015	3.985	4.010	3.975	4.010
12	3.865	3.885	3.985	4.015	3.950	4.010
13	3.765	3.775	3.820	3.850	3.905	3.925
14	3.840	3.680	3.950	3.855	3.720	3.790
15	3.775	3.875	3.805	3.685	3.825	3.890
16	3.935	3.730	3.765	3.730	3.745	3.690
17	3.890	4.090	4.300	4.205	4.090	3.680
18	4.050	4.145	4.150	4.080	4.145	4.090
19	4.145	4.160	4.155	4.185	4.000	4.085
20	3.940	4.115	4.185	4.160	4.190	4.140
21	3.960	3.940	3.935	3.950	3.995	3.985
22	4.005	4.090	3.930	4.010	3.955	4.090
23	3.885	3.860	3.960	3.885	3.910	3.885
24	3.980	4.050	4.175	4.065	3.880	4.445
25	4.205	3.975	4.320	4.130	4.385	4.350
26	4.315	4.425	4.270	4.100	4.415	4.225
27	3.935	4.045	4.315	3.925	4.140	3.920
28	3.950	3.800	4.085	4.050	4.210	3.980
29	3.950	4.390	4.205	3.955	4.311	3.965
30	3.825	3.980	3.580	3.750	4.105	3.830
31	3.700	3.560	3.615	3.700	3.775	3.650
32	3.550	3.540	3.590	3.330	3.625	3.600
33	3.405	3.660	3.450	3.500	3.560	3.365
34	3.580	3.660	3.740	3.575	3.455	3.420
35	3.585	3.560	3.620	3.805	3.565	3.460
36	3.630	3.635	3.620	3.760	3.360	3.540

ตารางที่ ก - 19 ผลการทดลองความเข้มข้นทองแดงในถังดูดตีผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Cu](PPM) (30 ชม.)	[Cu](PPM) (60 ชม.)	[Cu](PPM) (90 ชม.)	[Cu](PPM) (120 ชม.)	[Cu](PPM)(150 ชม.)	[Cu](PPM) (180 ชม.)
1						
2	0.46	0.44	0.38	0.38	0.36	0.47
3	0.46	0.36	0.30	0.27	0.26	0.41
4	0.43	0.37	0.32	0.28	0.24	0.42
5	0.44	0.36	0.33	0.33	0.23	0.43
6	0.45	0.43	0.38	0.36	0.33	0.40
7	0.51	0.44	0.42	0.38	0.36	0.44
8	0.47	0.46	0.45	0.41	0.38	0.45
9	0.50	0.45	0.42	0.40	0.38	0.46
10	0.48	0.46	0.43	0.40	0.40	0.48
11	0.49	0.48	0.48	0.43	0.42	0.48
12	0.50	0.53	0.47	0.45	0.42	0.49
13	0.52	0.48	0.54	0.45	0.42	0.47
14	0.54	0.53	0.48	0.46	0.43	0.52
15	0.53	0.53	0.47	0.46	0.52	0.47
16	0.52	0.51	0.47	0.46	0.45	0.49
17	0.54	0.50	0.50	0.46	0.46	0.52
18	0.54	0.53	0.49	0.49	0.48	0.51
19	0.54	0.52	0.51	0.48	0.46	0.53
20	0.53	0.55	0.52	0.51	0.50	0.57
21	0.54	0.56	0.54	0.53	0.52	0.59
22	0.55	0.55	0.56	0.53	0.53	0.61
23	0.57	0.59	0.59	0.57	0.56	0.59
24	0.66	0.70	0.69	0.69	0.69	0.73
25	0.66	0.67	0.72	0.71	0.68	0.73
26	0.70	0.68	0.71	0.71	0.71	0.70
27	0.71	0.72	0.72	0.71	0.70	0.70
28	0.68	0.71	0.70	0.72	0.72	0.70

ตารางที่ ก – 19(ต่อ) ผลการทดลองความเข้มข้นของแดงในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Cu](PPM) (30 ชม.)	[Cu](PPM) (60 ชม.)	[Cu](PPM) (90 ชม.)	[Cu](PPM) (120 ชม.)	[Cu](PPM) (150 ชม.)	[Cu](PPM) (180 ชม.)
29	0.72	0.76	0.75	0.74	0.76	0.74
30	1.06	1.05	0.92	0.90	0.90	0.89
31	1.14	1.01	0.97	0.95	0.94	0.93
32	1.16	1.14	1.05	1.02	0.98	0.99
33	1.35	1.34	1.20	1.14	1.10	1.16
34	1.34	1.29	1.31	1.22	1.20	1.13
35	1.40	1.39	1.29	1.31	1.22	1.16
36	1.46	1.32	1.28	1.34	1.11	1.10

ตารางที่ ก – 20 ผลการทดลองความเข้มข้นนิกเกิลในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Ni](PPM) (30 ชม.)	[Ni](PPM) (60 ชม.)	[Ni](PPM) (90 ชม.)	[Ni](PPM) (120 ชม.)	[Ni](PPM) (150 ชม.)	[Ni](PPM) (180 ชม.)
1						
2	0.13	0.13	0.15	0.15	0.16	0.16
3	0.17	0.15	0.15	0.12	0.13	0.15
4	0.15	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13
5	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
6	0.11	0.12	0.10	0.10	0.13	0.11
7	0.11	0.09	0.12	0.12	0.11	0.11
8	0.10	0.11	0.11	0.08	0.10	0.09
9	0.09	0.10	0.09	0.08	0.10	0.09
10	0.07	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08
11	0.12	0.10	0.12	0.11	0.12	0.11
12	0.14	0.14	0.13	0.11	0.12	0.12
13	0.11	0.12	0.10	0.12	0.11	0.12
14	0.12	0.12	0.12	0.13	0.11	0.13
15	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12

ตารางที่ ก - 20(ต่อ) ผลการทดลองความเข้มข้นนิกเกิลในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Ni](PPM) (30 ชม.)	[Ni](PPM) (60 ชม.)	[Ni](PPM) (90 ชม.)	[Ni](PPM) (120 ชม.)	[Ni](PPM) (150 ชม.)	[Ni](PPM) (180 ชม.)
16	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.14
17	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12
18	0.15	0.15	0.13	0.15	0.15	0.12
19	0.13	0.12	0.14	0.12	0.13	0.13
20	0.13	0.12	0.14	0.13	0.13	0.13
21	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14
22	0.12	0.13	0.13	0.11	0.13	0.11
23	0.11	0.08	0.11	0.08	0.08	0.07
24	0.07	0.08	0.07	0.07	0.09	0.07
25	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09
26	0.08	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07
27	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.10
28	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.08
29	0.10	0.09	0.09	0.08	0.09	0.10
30	0.25	0.22	0.23	0.24	0.21	0.24
31	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.21
32	0.25	0.27	0.24	0.23	0.23	0.24
33	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.27
34	0.26	0.23	0.26	0.25	0.25	0.28
35	0.27	0.25	0.25	0.27	0.25	0.25
36	0.29	0.25	0.25	0.26	0.25	0.25

ตารางที่ ก - 21 ผลการทดลองความเข้มข้นตะกั่วในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Pb](PPM) (30 ชม.)	[Pb](PPM) (60 ชม.)	[Pb](PPM) (90 ชม.)	[Pb](PPM) (120 ชม.)	[Pb](PPM) (150 ชม.)	[Pb](PPM) (180 ชม.)
1						
2	0.618	0.621	0.619	0.628	0.629	0.616
3	0.606	0.608	0.617	0.617	0.609	0.612
4	0.628	0.617	0.618	0.619	0.627	0.611
5	0.619	0.62	0.628	0.629	0.627	0.619
6	0.622	0.616	0.62	0.618	0.621	0.619
7	0.618	0.621	0.618	0.621	0.612	0.616
8	0.621	0.615	0.62	0.619	0.622	0.619
9	0.622	0.621	0.617	0.622	0.628	0.623
10	0.619	0.622	0.621	0.624	0.623	0.622
11	0.618	0.621	0.629	0.628	0.622	0.619
12	0.621	0.622	0.623	0.613	0.622	0.621
13	0.63	0.628	0.629	0.631	0.627	0.619
14	0.629	0.624	0.629	0.621	0.622	0.623
15	0.622	0.623	0.623	0.623	0.631	0.628
16	0.622	0.621	0.632	0.631	0.628	0.618
17	0.618	0.621	0.628	0.632	0.627	0.631
18	0.621	0.621	0.628	0.63	0.628	0.627
19	0.619	0.622	0.625	0.632	0.625	0.631
20	0.621	0.622	0.621	0.622	0.628	0.628
21	0.631	0.621	0.624	0.624	0.622	0.618
22	0.622	0.631	0.628	0.627	0.622	0.625
23	0.631	0.628	0.619	0.621	0.632	0.619
24	0.622	0.622	0.625	0.629	0.632	0.62
25	0.621	0.631	0.628	0.618	0.622	0.62
26	0.622	0.628	0.615	0.629	0.631	0.633
27	0.629	0.621	0.628	0.632	0.621	0.619
28	0.629	0.621	0.632	0.629	0.619	0.626

ตารางที่ ก - 21(ต่อ) ผลการทดลองความเข้มข้นตะกั่วในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Pb](PPM) (30 ชม.)	[Pb](PPM) (60 ชม.)	[Pb](PPM) (90 ชม.)	[Pb](PPM) (120 ชม.)	[Pb](PPM) (150 ชม.)	[Pb](PPM) (180 ชม.)
29	0.627	0.623	0.629	0.631	0.621	0.631
30	0.627	0.624	0.622	0.621	0.629	0.631
31	0.623	0.619	0.628	0.618	0.622	0.625
32	0.631	0.629	0.62	0.622	0.627	0.627
33	0.631	0.635	0.629	0.622	0.632	0.628
34	0.619	0.621	0.622	0.618	0.622	0.631
35	0.623	0.632	0.627	0.624	0.621	0.619
36	0.621	0.628	0.622	0.629	0.625	0.632

ตารางที่ ก - 22 ผลการทดลองความเข้มข้นสังกะสีในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Zn](PPM) (30 ชม.)	[Zn](PPM) (60 ชม.)	[Zn](PPM) (90 ชม.)	[Zn](PPM) (120 ชม.)	[Zn](PPM) (150 ชม.)	[Zn](PPM) (180 ชม.)
1						
2	0.09	0.11	0.11	0.10	0.09	0.12
3	0.09	0.10	0.08	0.09	0.07	0.06
4	0.10	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09
5	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
6	0.11	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09
7	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09
8	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09
9	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10
11	0.11	0.11	0.12	0.10	0.12	0.11
12	0.08	0.12	0.10	0.11	0.09	0.12
13	0.13	0.08	0.10	0.09	0.09	0.12
14	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
15	0.09	0.12	0.09	0.09	0.11	0.09

ตารางที่ ก - 22(ต่อ) ผลการทดลองความเข้มข้นสังกะสีในถังดูดติดผิวแบบแห้ง

เวลา (ชั่วโมง)	[Zn](PPM) (30 ชม.)	[Zn](PPM) (60 ชม.)	[Zn](PPM) (90 ชม.)	[Zn](PPM) (120 ชม.)	[Zn](PPM) (150 ชม.)	[Zn](PPM) (180 ชม.)
16	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
17	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09
18	0.09	0.09	0.08	0.13	0.11	0.09
19	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.10
20	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08
21	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
22	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.10
23	0.09	0.10	0.08	0.10	0.09	0.10
24	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
25	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08
26	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10
27	0.16	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09
28	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
29	0.11	0.14	0.11	0.11	0.14	0.11
30	0.09	0.13	0.10	0.08	0.09	0.09
31	0.15	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08
32	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.12
33	0.07	0.14	0.07	0.07	0.07	0.07
34	0.07	0.06	0.14	0.09	0.09	0.08
35	0.07	0.11	0.07	0.14	0.08	0.08
36	0.10	0.08	0.16	0.08	0.08	0.07

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (Standard test method for specific surface area of carbon or graphite, ASTM C 819 – 77)

วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของของแข็งนี้ เป็นวิธีของ Brunauer, Emmett and Teller method หรือ BET method ซึ่งวิธีนี้อาศัยหลักการของการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) ที่อุณหภูมิจุดเดือดปกติ (-195.8 องศาเซลเซียส) บนผิวหน้าของตัวอย่าง วิธีวิเคราะห์มีดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุ่น ASAP 2000 ของบริษัท Micromeritics
- เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมคำนวณ
- หลอดใส่ตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่าง

- ใช้ตัวอย่างเศษคอนกรีตขนาด 0.5 – 1.0 มิลลิเมตร อบตัวอย่างให้แห้งที่ 150 องศาเซลเซียส
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4
- ใส่ตัวอย่างลงในหลอด ให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3-0.5 กรัม
- นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวตัวอย่าง (Outgas) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอดใส่ตัวอย่าง เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่างหลัง Outgas เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่าง (W)

3. การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว

- กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่สมดุล (P/Po) ทั้งหมด 10 จุด
- ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุลเท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้

4. การคำนวณ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

- นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือ ความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) แกนตั้งฉากคือปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ในเทอมของ $[W (P/P_0) - 1] - 1$ จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ S จุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ I สามารถคำนวณพื้นที่ผิว (S_{BET}) ได้ดังนี้

$$S_{BET} \text{ (ตารางเมตรต่อกรัม)} = \frac{N A_{CS}}{[(S+I) \cdot (MW)]}$$

โดย $N =$ เลขอาโวกาโดร (6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)

$A_{CS} =$ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน
(16.2 ตารางอังสตรอม)

$MW =$ น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

Ammonium Acetate Procedure for Cation Exchange Capacity (CEC) Determination

In this laboratory practical, we will determine the CEC of soil using the method applied in soil classification.

1. Place 3 g of 2-mm air-dried soil sample in a 250-ml Erlenmeyer flask, and add 100 ml of 1 N NH₄ OAC (pH = 7.0) solution. Shake the flask thoroughly by hand and allow it to stand overnight (cover the flask mouth with parafilm).
2. Filter the soil with light suction using a Buchner funnel and No. 2 filter paper into a clean flask. Add a small (25 ml) portion at a time.
3. Filter the soil with an additional 100 ml of 1 N NH₄ OAC (pH = 7). Check for Ca²⁺ : close vacuum, lift funnel carefully out of flask, transfer 3 drops of filtrate from funnel end into a test tube, add 3 drops 1 N NH₄ Cl, 3 drops 1:1 NH₄ OH, and 3 drops 10% ammonium oxalate. No precipitate indicates the completion of filtering. When the Ca²⁺ test is negative (no precipitate) save the cover and filtrate for the later determination of exchangeable K⁺, Na⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺.
4. Filter the soil with light suction using 200 ml 1 N NH₄ Cl followed by 100 ml 0.25 N NH₄ Cl.
5. Wash the soil with 150 to 200 ml of isopropyl alcohol, add a small (25-ml) portion at a time. Test for Cl⁻ : Remove funnel as in step 3; add 10 drops of filtrate and 10 drops of 0.1 N AgNO₃ to a clean test tube. A precipitate (AgCl) indicates the presence of chloride. When the chloride is no longer present, empty and clean the collection flask for step 6 (discard filtrate).
6. Filter the soil with 300 ml of 10% NaCl (in 5 to 6 portions). Save the filtrate in a clean bottle for CEC determination.
7. Transfer 20 ml of the filtrate to a microkjeldahl flask, add a spoon (calibrated) of MgO powder, and distill 40 ml of the solution into 5 ml of 2% H₃BO₃. Titrate the boric acid solution with standard H₂SO₄ (0.01 N). Refer to the following instructions for using the microkjeldahl apparatus.

Microkjeldahl Distillation of Ammonium for the Ammonium Acetate

Procedure CEC

1. Turn on the rheostat to the heater and allow the water to boil.
2. Prepare the steam distillation apparatus for use by opening the lower stopcock on the steam-bypass assembly and closing the upper stopcock, which is connected to the distillation head. These should be the positions of these stopcocks while the water heats.
3. Add 5 ml H₃BO₃ indicator solution to 100 ml beaker marked to indicate a volume of 40 ml, and position the beaker under the condenser of the distillation apparatus so that the tip of the condenser is in contact with the side of the beaker.
4. Attach the kjeldahl flask containing 20 ml NaCl filtrate and MgO powder to the distillation apparatus. Then seal the funnel with the peg stopper, and immediately commence distillation by opening the upper stopcock on the steam-bypass assembly and closing the lower stopcock.
5. When the volume of distillation reaches 40 ml, rinse the tip of the condenser, and stop the distillation by opening the lower stopcock on the steam-bypass assembly.
6. Determine NH₄⁺-N in the distillate by titration with 0.0139 N H₂SO₄. At the end-point, the color changes from green to a faint pink.

References

- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity in Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph 9: 891-894.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations in Page, A.L. (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Second Ed., Chapter 9, p. 159-165, Soil Science Society of America, Madison, WI.

ผลการทดลอง CEC

เศษคอนกรีตขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร

- ตัวอย่างที่ 1.1 Titrate กับ 0.1504 M H₂SO₄ 26.4 ml
 1.2 Titrate กับ 0.1504 M H₂SO₄ 25.2 ml

เศษคอนกรีตขนาด < 0.5 มิลลิเมตร

- ตัวอย่างที่ 2.3 Titrate กับ 0.1504 M H₂SO₄ 39.1 ml
 2.4 Titrate กับ 0.1504 M H₂SO₄ 19.8*2 ml

จาก 0.1504 M H₂SO₄ 39.1 ml มีเนื้อ H₂SO₄ = $0.1504 \times 39.1 / 1000 = 0.003970560$ mole

แต่ 1 mole H₂SO₄ ทำปฏิกิริยาพอดีกับ NH₃ 2 mole

ดังนั้น sample 1.1 มี NH₃ = 0.003970560×2 mole มาจาก Sample 25.0042 g
 sample 1.1 มี NH₃ = 0.00794112 mole

ทำนองเดียวกัน

sample 1.2 มี NH₃ = 0.007580160 mole มาจาก Sample 25.0036 g
 sample 2.3 มี NH₃ = 0.011761280 mole มาจาก Sample 25.0288 g
 sample 2.4 มี NH₃ = 0.011911680 mole มาจาก Sample 25.0038 g

Remember

1 equivalent = 1 mole
 1 cmole = 1/100 mole
 1 meq = 1/1000 equivalent

ฉะนั้น Sample 1.1 คิดใน 1 kg = $0.00794112 \text{ mole} \times 1000 / 25.0042$
 = 0.299597668 mole/kg
 Sample 1.2 = $0.007580160 \text{ mole} \times 1000 / 25.0036$
 = 0.303162745 mole/Kg
 เฉลี่ย = 0.301380206 mole/Kg
 = 30.1 cmole/Kg

ภาคผนวก ง

Designation : C136-95a

Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates¹

This standard is issue under fixed designation C 136; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or in case of revision. A number in parentheses indicates the year of last revision. A superscript epsilon

This standard has been approved for use by agencies of the department of defense. Consult the DoD Index of specifications Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 this test method covers the determination of the particle size distribution of fine and coarse aggregates by sieving

1.2 Some specification for aggregates which reference this method contain grading requirements including both coarse and fine factions. Instructions are included for sieve analysis of such aggregates

1.3 The values stated in SI unit (SI unit and units specifically approved in Practice E380 for use in SI units) are to be regarded as the standard. The values in parentheses are provided for information purpose only.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concern, if any, associated with its use. It 's the responsibility of user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the application of regulatory limitation prior to use.

2. Reference Document

2.1 ASTM STADARDS:

C 117 Test Method for Material Finer than 75- μm (No.200)Sieve in Mineral aggregate by washing

C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates

C 670 Practice for Preparing precision and Bias Statement for Test Methods for Construction Materials

C 702 Practice for Reducing Filed Samples of Aggregate to Testing Size

D 75 Practice for Sampling Aggregates

E 11 Specification for wire-Cloth Sieve for Testing Purpose

E 380 Practice for Use of The International System of Units (SI)(The modernized Metric System)

2.2 AASHTO Standard:

AASHTO No. T 27 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

3. Terminology

3.1 Definition-For definitions of term used in this standard, refer to Terminology C125.

4 Summary of Test Method

4.1 A weighed sample of dry aggregates is separated through a series of sieve of progressively smaller openings for determination of particle size distribution.

5. Significance and Use

5.1 This test method is used primarily to determine the grading of material proposed for use as aggregates of being use as aggregates. The results are used to determine compliance of the particle size distribution with applicable specification requirement and to provide necessary data for control of production of various aggregates product and mixtures contain aggregates. The data may also useful in developing relationships concerning porosity and packing

5.2 Accurate determination of material finer than 75 μm (No.200) sieve cannot be achieved by use of this method alone. Test Method C117 for material finer than 75 μm sieve by washing should be employed

6. Apparatus

6.1 *Balance*-Balance or scale used in testing fine and coarse aggregates shall have readability and accuracy as follows:

6.1.1 For fine aggregates, readable to 0.1g and accurate to 0.1g or 0.1% of test load, whichever is greater, at any point within range of use.

6.1.2 For Coarse aggregates, of mixtures of fine and coarse aggregates, readable and accurate to 0.5g or 0.1% of test load, whichever is greater, at any point within the range of use

6.2 *Sieve*-The sieve shall be mounted on substantial frames constructed in manner during sieving. The sieve shall conform to Specification E 11. Sieves with openings larger than 125 mm(5 in.) shall have a permissible variation in average opening of ± 2 and shall have a nominal wire diameter of 8.0 mm(5/16 in.) or larger.

Note-1 It is recommended that sieves mounted in frames larger than standard 203 –mm(8 in.) diameter frames be used for testing coarse aggregates

6.3 *Mechanics Sieve Shaker*- A mechanical sieve shaker, if used, shall impart a vertical or lateral and vertical, motion to the sieve, causing the particles thereon to bounce and turn so as to present different orientations to the sieving surface. The sieving action shall be such that the criterion for adequacy of sieving described in 8.4, is met in a reasonable time period.

NOTE-2 Use of a mechanical sieve shaker is recommended when the size of the sample is 20 kg or greater, and may be used for smaller samples, including fine aggregates. Excessive time (more than approximately 10 min) to achieve adequate sieving may result in degrading of the sample. The same mechanical sieve shaker may not be practical for all size of sample, since the large sieving area needed for practical sieving of a large nominal size coarse aggregates very likely could result in loss of portion of the sample in used for small sample of coarse aggregate or fine aggregate.

6.4 *Oven* – An oven of appropriate size capable of maintaining a uniform temperature of 110 ± 5 C (230 ± 9 F).

7 Sampling

7.1 Sample the aggregate in accordance with practice D 75. The size of the field sample shall be the quantity shown in Practice D 75 or four time the quantity required in 7.4 and 7.5 (except as modified 7.6) whichever is greater.

7.2 Thoroughly mix the sample and reduce it to an amount suitable for testing the applicable procedures described in Practice C702. The sample for test shall be approximately the quantity desired when dry and shall be the end result of the reduction. Reduction to an exact predetermined quantity shall not be permitted.

NOTE-3 Where sieve analysis, including determination of material finer than the 75 μ m sieve, is the only testing proposed, the size of the sample may be reduced in the field to avoid shipping excessive quantities of extra material to the laboratory.

7.3 *Fine Aggregate* The size of the test sample, after drying, shall be 300 g minimum.

7.4 *Coarse Aggregate* The size of the test sample of coarse aggregate shall conform with the following:

Nominal Maximum Size Square Openings, mm.	Test Sample Size, min, Kg
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50.0	20
63.0	35
75.0	60
90.0	100
100.0	150
112.0	200
125.0	300
126.0	500

7.5 *Coarse and Fine Aggregate Mixtures* The size of the test sample of coarse and fine aggregate mixtures shall be the same as for coarse aggregate in 7.4

7.6 The size of the sample required for aggregates with large nominal maximum size is such as to preclude testing except with large mechanics sieve shaker. However, the intent of this method will be satisfied for sample of aggregate larger than 50-mm nominal size if a small sample size is used, provided that the criterion for acceptance or rejection of the material is base on the average of result of several samples, such that the sample size used times the number of samples average equals the minimum size of sample shown in 7.4

7.7 In the event that the amount of material finer than the 75 μ m sieve is to be determined by Test Method C117, proceed as follows:

7.7.1 For aggregate with nominal maximum size of 12.5 mm or less ,use same test sample for testing by Test Method C117 and this method. First test the sample in accordance with Test Method C117 through the final drying operation, then dry sieve the sample as stipulated in 8.2 through 8.7 of this method.

7.7.2 For aggregate with nominal maximum size greater than 12.5 mm, a single test sample may be used as

described in 7.7.1, or separate test sample may be used for Test Method C 117 and this method.

7.7.3 Where the specifications require determination of the total amount of material finer than 75 μm sieve by washing and drying sieving, use the procedure described in 7.7.1

8. Procedure

8.1 Dry the sample to constant mass at a temperature of 110 ± 5 C (230 ± 9 F)

Note-4 For control purposes, particularly where rapid results are desired, it is generally not necessary to dry coarse aggregate for the sieve analysis test. The results are little affected by moisture content unless (1) the nominal maximum size is smaller than about 12.5 mm; (2) the coarse aggregate contains appreciable material finer than 4.75 mm; or (3) the coarse aggregate is highly absorptive (a lightweight aggregate, for example). Also, sample may be dried at the higher temperature associated with use of hot plate without affecting results, provided steam escapes without generating pressure sufficient to fracture the particles, and temperatures are not so great as to cause chemical breakdown of the aggregate.

8.2 Suitable sieve size shall be selected to furnish information required by the specification covering the material to be tested. The use of additional sieves may be desirable to provide other information, such as fineness modulus, or to regulate the amount of material on a sieve. Nest the sieves in order of decreasing size of opening from top to bottom and place the sample on the top sieve. Agitate the sieve by hand or by mechanical apparatus for a sufficient period, established by trial or checked by measurement on the actual test sample, to meet the criterion for adequacy or sieving described in 8.4.

8.3 Limit the quantity on a given sieve so that all particles have opportunity to reach sieve opening number of times during the sieve operation. For sieves with opening smaller than 4.75 mm, the quantity retained on any sieve at completion of the sieving operation shall not exceed 7 kg/m^2 of sieving surface. For sieves with openings 4.75 mm and larger, the quantity retained in kg/m^2 of sieving surface shall not exceed the quantity retained, but so great as to cause permanent deformation of sieve cloth.

NOTE 5 The 7 kg/m^2 amounts to 200 g for the usual 203.2 mm diameter sieve (with effective sieving diameter of 190.5 mm) with openings smaller than 4.75 mm. See appendix X1 for the maximum amount that may be retained on sieves of various sizes with openings of 4.75 mm and larger. The amount of material retained on a sieve may be regulated by

(1) the introduction of a sieve with larger openings immediately above the given sieve or (2) testing the sample in a number of increments.

8.4 Continue sieving for a sufficient period and in such manner that, after completion, not more than 1 mass % of the residue on any individual sieve will pass the sieve during 1 min of continuous hand sieving performed as follows: Hold the individual sieve, provided with a snug-fitting pan and cover, in a slightly inclined position in one hand. Strike the side of sieve sharply and with upward motion against the heel of the other hand at the rate about 150 times per minute, turn the sieve about 25 strokes. In determining sufficiency of sieving for sizes larger than the 4.75 mm sieve, limit the material on a sieve to a single layer of particles. If the size of the mounted testing sieve makes the described sieving motion impractical, use 203 mm diameter sieves to verify the sufficiency of sieving.

8.5 In the case of coarse and fine aggregate mixtures, the portion of the sample finer than 4.75 mm sieve may be distributed among two or more sets of sieve to prevent overloading of individual sieves.

8.5.1 Alternatively, the portion finer than the 4.75 mm sieve may be reduced in size using a mechanical splitter according to Practice C702. If this procedure is followed, compute the mass of each size increment of the original sample as follows:

$$A = (W_1/W_2) * B$$

Where

- A = mass of size increment on total sample basis,
- W_1 = mass of fraction finer than 4.75 mm sieve in total sample,
- W_2 = mass of reduced portion of material finer than 4.75 mm sieve actually sieved and
- B = mass of size incremental reduced portion sieved.

8.6 Unless a mechanical sieve is used, hand sieve particles larger than 75 mm by determining the smallest sieve opening through which each particle will pass. Start the test on the smallest sieve to be used. Rotate the particles, if necessary, in order to determine whether they will pass through a particular opening; however, do not force particles to pass through an opening.

8.7 Determine the mass of each size increment on a scale or balance conforming to the requirements specified in 5.1 to the nearest 0.1 % of the total original dry sample mass. The total mass of material after sieving should check

closely with original mass of sample places on the sieve. If the amount of differ by more than 0.3 % ,based on the original dry sample mass, the result should not be used for acceptance purposes.

8.8 If the sample has previously been tested by Test Method C117, add the mass finer than 75 μ m sieve determined by that method to the mass passing the 75 μ m sieve by dry sieving of the same sample in this method.

9 Calculation

9.1 Calculate percentages passing, total percentages retained, or percentages in various size fractions to the nearest 0.1 % on the basis of the total mass of the initial dry sample. If the same test sample was first tested by Test Method C117, include the mass of material finer than the 75 μ m size by washing in the sieve analysis calculation; and use the total dry sample mass prior to washing in Test Method C117 as the basis for calculating all the percentages.

9.2 Calculate the fineness modulus, when required, by adding the total percentages of material in the sample that is coarser than each of the following sieves (cumulative percentages retained), and dividing the sum by 100; 150 μ m, 300 μ m, 600 μ m, 1.18 mm, 2.36 mm, 4.75 mm, 9.5 mm, 19.0 mm, 37.5 mm and larger ,increasing in the ration of 2 : 1.

10 Report

10.1 Depending upon the form of the specifications for use of the material under test, the report shall include the following:

10.1.1 Total percentage of material passing each sieve, or

10.1.2 Total percentage of material retained on each sieve, or

10.1.3 Percentage of material retained between consecutive sieves.

10.2 Report percentages to the nearest whole number; except if the percentage passing the 75 μ m sieve is less than 10 % ,it shall be reported to the nearest 0.1 %

10.3 Report the fineness modulus, when required, to the nearest 0.01.

11 Precision and Bias

11.1 Precision – The estimates of precision for this test method are listed in Table 1. The estimates are based on the result from AASHTO Material Reference Laboratory Proficiency Sample Program, with testing conducted by Test Method C136 and AASHTO Test Method T 27. The data are based on the analyses of the test result for 65 to 233 laboratories that tested 18 pairs of coarse aggregate proficiency test sample and test result from 47 to 222 laboratories that tested 17 pairs of fine aggregate proficiency test sample(Sample No. 21 through 90).The values in the table are given for different ranges of total percentage passing a sieve.

11.1.1 The precision values for the fine aggregate in table 1 are based on nominal 500 g test sample. Revision of this test method in 1994 permits the fine aggregate test sample size to be 300 g minimum. Analysis of results of 300 g and 500 g test samples from Aggregates Proficiency Test Samples 99 and 100 (Samples 99 and 100 were essentially identical)produced the precision values in Table 2,which indicate only minor difference due to test sample size.

NOTE 6 The values for fine aggregate in Table 1 will be revised to reflect the 300 g test sample size when a sufficient number of Aggregate Proficiency Tests have been conducted using that samples size to provide reliable data.

11.2 *Bias* Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias in this test method, no statement on basis is made.

12 Keywords

12.1 aggregate; coarse aggregate; fine aggregate; gradation; grading; sieve analysis; size analysis

ภาคผนวก จ

Designation: D3922-89(reapproved 1993)(Ξ)¹

Standard Practice for

Estimating the Operating Performance of Granular Activated Carbon for Removal of Soluble Pollutants from Water

This standard is issued under the fixed designation D 3922; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the last year reapproval. A subscript epsilon (Ξ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

Ξ ¹ NOTE - Section 13 was added editorially in September 1993.

1. Scope.

1.1 This practice covers the determination of the operating capacity of granular activated carbon (GAC) to remove soluble pollutants from water. This practice can be used to determine the operating capacity of virgin and reactivated granular activated carbons.

1.2 This practice can be applied to all types of water, including industrial waste water, potable waters, sanitary waters and effluent waters.

1.3 This practice is recommended to determine the operating capacity of GAC on a weight basis for removals of the following from water, but not limited to these :

- 1.3.1 Removal of color,
- 1.3.2 Taste and odor,
- 1.3.3 Toxicants,
- 1.3.4 Surface active agents,
- 1.3.5 BOD₅ from sanitary waste waters, and
- 1.3.6 TOC from industrial waste waters.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety problem, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Reference Documents

- 2.1 ASTM Standard :
 - D 1129 Terminology Relating to Water²
 - D 1193 Specification for Reagent Water²

D 2652 Terminology Relating to Activated Carbon³

D 2867 Test Method for moisture in Activated Carbon³

D 3370 Practices for Sampling Water from Closed Conduits²

E 300 Practice for Sampling Industrial Chemicals⁴

3. Terminology

3.1 Definition:

3.1.1 For determinations of terms used in this practice relating to activated carbon, refer to Terminology D 2652.

3.1.2 For determinations of terms used in this practice relating to water, refer to Terminology D 1129.

4. Summary of Practice

4.1 The operating capacity of the GAC is determined by passing the water sample at fixed flow rate through a bed of GAC contained in column until the effluent quality has degraded to a predetermined level.

5. Significant and used

5.1 This Practice can be used to determine effluent quality obtainable when treating a water sample with GAC of removal of soluble pollutant, and is generally performed at 20 C. However, other temperature may be used and recorded.

5.2 This Practice can be used to compare different type of GAC

6. Interference

6.1 Insoluble material, such as oil, emulsion, and solid particulates, will interfere with the adsorption of solubles by the GAC. These materials must be removed by suitable means.

7. Apparatus

7.1 The test assembly consists of the following:

7.1.1 *Column*, vertically supported, 25.4±2.5 mm. (1.0± 1 in.)

inside diameter and approximately 92 cm (36 in.) long. (The inside diameter of the column should be at least 10 times the average particle diameter of the GAC being evaluated. Connection shall be provided at top and bottom for admission and discharge of solution and back wash capabilities as described in 10.3. Adequate means for measuring flow and through-put volume shall be provided.)

7.1.2 *Support for GAC*-A suggested support utilize a 60-mesh screen of a material compatible with the solution. Other support such as glass beads or pea-size gravel may be used.

8. Reagent and Materials

8.1 *Granular activated carbon (GAC)*

8.2 *Reagent grade water*, Type IV.

8.2.1 *Purity of Water* - Unless otherwise indicated, reference to water shall be understood to Specification D 1193.

9. Sampling

9.1 Collect the water sample in accordance with Practices D 3370.

9.2 Collect and prepare the sample of granular activated carbon (GAC) in accordance with Practice E 300.

10 Procedure

10.1 Measure a volume of GAC sufficient to provide a length-to-diameter ratio in the column of 3 : 1 in a graduated cylinder. Weigh the GAC to the nearest 0.1 g, record the weigh, then transfer the GAC to a 1000-mL Erlenmeyer flask and add enough reagent grade water to completely cover the GAC.

NOTE- Determine the moisture content of the GAC in accordance with Test Method D 2867 and record.

10.2 Stir the GAC slurry and place on a hot plate. Allow the slurry to come to a vigorous boil for 10 min. Remove the flask from the hot plate and allow the slurry to cool to ambient temperature. The purpose of this procedure is to deaerate the GAC.

10.3 Transfer the deaerated GAC in slurry form to the column in small increment, keeping a layer of water above the GAC during the transfer. This is best accomplished by filling the column one-fourth to one-third full with water prior to transferring the GAC slurry. Remove any remaining air pocket in the GAC by back wash the column to a 10 to 25% bed expansion for 2 to 5 min while tapping the column.

10.4 Pass the water sample to be tested down-flow through the carbon column at a flow rate of 1 to 5 gal/min/ft² cross sectional area (40 to 200 l/min/m²).

10.5 Periodically sample the column in fluent and effluent and analyze of the pollutant of interest. The frequency of the sampling will depend on the expected length of the run. It is important that accurate of volume through-put be maintained during the column study.

10.6 Continue the column study until the effluent analysis equal the influent concentration of interest.

NOTE - 2 If a layer of a suspended material forms on the top of the bed, it may be necessary to remove it using an aspirator

NOTE - 3 This step may require an extended period time to complete when determining operating performance with water that contain low concentrations of adsorption constituents. That is, low concentrations of haloforms and haloform precursor may be found in some municipal potable water systems. The time period could be week or even months.

10.7 Plot volume through-put on the horizontal axis and the corresponding effluent analyses on the vertical axis

11 Calculation

11.1 Integrate the area between the influent curves to the end point as agreed to determine the quantity of pollutant adsorbed. It is convenient to determine quantity in milligrams or micrograms

11.2 Determine capacity as follows:

Capacity, mg/g (or µg/g)

$$= (\text{mg (or } \mu\text{g/g) adsorbed}) / \text{carbon, g}$$

Where

$$\text{Carbon, g} = \text{original weigh} \times (1 - (\% \text{ moisture}/100))$$

12 Precision and Bias

12.1 The precision of this practice is limited by the precision of the test method used in determining the concentration of the constituents.

12.2 The bias of this practice is limited by the bias of the test methods used in determining the concentration of constituents.

13. Keywords

13.1 activated carbon; granular activated carbon.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ทศพร ภู่อะหงษ์

เกิดเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวิสุทธิวงศ์ จังหวัด กาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2537 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย