

การนำชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง



นางสาววันวิภา เผ่าสวัสดิ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4891-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF BAGASSE AS ADSORBENT MATERIAL  
FOR LEAD REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION

Miss Wanvipa Paosawat

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4891-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การนำชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง  
โดย                              นางสาววันวิภา เผ่าสวัสดิ์  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันวิภา เฝ้าสวัสดิ์ : การนำขานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง  
(UTILIZATION OF BAGASSE AS ADSORBENT MATERIAL FOR LEAD REMOVAL  
WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ , 138 หน้า. ISBN 974-17-4891-4

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพของขานอ้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากโรงงานน้ำตาลมาทำจัดตะกั่ว โดยใช้ขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ จากนั้นนำขานอ้อยปรับสภาพที่ดูดซับตะกั่วแล้วมาทำเป็นก้อนแข็งโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตาร์ โดยในส่วนของการทำงานจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการทดลองแบบแบตช์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน แต่ละความเข้มข้นจะทำการปรับค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2 ถึง 6

ผลการทดลองพบว่า ผลความเข้มข้นของตะกั่วและพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่ว ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มพีเอช จะทำให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่พีเอช 6 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ พีเอชเท่ากับ 6 มีเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 นาที โดยจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 56.72 ความสามารถในการดูดซับสูงสุดคิดเป็น 4.700 มิลลิกรัมต่อกรัมขานอ้อย ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ขานอ้อยพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับทั้งแบบแลงมัวร์ และฟรุนดลิช

จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วแล้ว มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตาร์ ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของมอร์ตาร์ผสมขานอ้อย เมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.45 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 46.45 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของมอร์ตาร์ผสมขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ภาควิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546.....

##4470531921 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : Adsorption / Solidification / Lead / Bagasse

WANVIPA PAOSAWAT : UTILIZATION OF BAGASSE AS ADSORBENT MATERIAL FOR LEAD  
REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION , THESIS ADVISOR : MANASKORN  
RACHAKORNKIJ, Ph.D., 138 pp. ISBN 974-17-4891-4

The research was conducted to study the feasibility and efficiency of bagasse, the widely available waste from sugar factories, for adsorption of lead from synthetic wastewater and subsequent solidification. Bagasse was treated under acidic condition. Adsorption studies were conducted using the batch technique at room temperature. The adsorption studies were carried out for different contact times, initial concentrations, initial pHs (2-6). Lastly, the adsorption data were fitted with isotherm models.

The adsorption experimental results indicated that initial pH and initial concentration of lead in aqueous solution affected lead removal. That is the removal efficiency increased with increasing solution pH, while it decreased with increasing lead concentration. The maximum adsorption capacity was about 4.700 mg/g of bagasse and the removal efficiency was 56.72% at pH 6, initial concentration of 80 mg/L and contact time of 3 minutes. The adsorption isotherm for lead removal was best fitted both Langmuir and Freundlich model.

The partial cement replacement experimental results indicated that the compressive strength of mortar decreased with increasing percent replacement of adsorbed bagasse. It was used to directly replace cement by up to 5 percent for making mortars. The maximum compressive strength was 46.45 % of the with control specimen with a 1 : 2.75 ratio of binder to sand ratio, a water to cement ratio of 0.45 and curing time of 28 days. The concentrations of lead in leachate solution were within the limits set by the Notification of Ministry of Industry No.6 (1997).

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department .....Environmental Engineering..... Student's signature .....

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

Academic year .....2003.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิจัยตลอดมา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์บางส่วนและสถานที่ในการทำงานวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทบวงมหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ความดีของวิทยานิพนธ์ ขอบอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ข้าพเจ้าที่ให้ความรัก การสนับสนุน ทั้งด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และกำลังใจ ที่มีให้แก่ผู้วิจัยมา โดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกคน โดยเฉพาะอาร์ม เมธ เบนซ์ และพีเอ ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	5
2.1 โลหะหนัก.....	5
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	14
2.3 กระบวนการดูดติดผิว.....	15
2.4 การผลิตน้ำตาล.....	30
2.5 ชานอ้อย.....	34
2.6 การหล่อแข็ง.....	35
2.7 วัสดุประสาน.....	37
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....	48
3.2 การดำเนินการทดลอง.....	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	61
4.1 การปรับสภาพขานอ้อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	61
4.2 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	62
4.3 ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่ว.....	67
4.4 ผลการศึกษาขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง.....	80
4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
5.2 ความสำคัญทางงานวิศวกรรม.....	98
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	99
รายการอ้างอิง.....	100
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดลองขั้นตอนการดูดซับ.....	105
ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดลองขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง.....	114
ภาคผนวก ค. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	118
ภาคผนวก ง. วิธีทดลองโดยละเอียด.....	125
ภาคผนวก จ. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	130
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยวิธีตกตะกอน.....	134
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	138



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของแพกเตอรืของการแยกตัวจากลักษณะรูปไอโซเทอม.....	24
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย.....	35
ตารางที่ 2.3 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	38
ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	39
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	40
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 1.1.....	52
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 1.2.....	53
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 1.3.....	54
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 1.4.....	55
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 2.1.....	56
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 2.2.....	56
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 2.3.....	57
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชานอ้อยปรับสภาพ และทราย.....	64
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของชานอ้อยในรูปออกไซด์.....	65
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มก./ล.พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 6 ด้วยชานอ้อยปริมาณต่างๆ.....	77
ตารางที่ 4.4 ร้อยละกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าผสมชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา.....	80
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย.....	85
ตารางที่ 4.6 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมชานอ้อยเมื่อเทียบกับ มอร์ต้าธรรมดาที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ.....	87
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้า ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 5% ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ.....	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

### หน้า

ตารางที่ ก.1	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพที่เวลาต่างๆ.....	106
ตารางที่ ก.2	ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	108
ตารางที่ ก.3	ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำเสียตัวอย่างที่เวลาต่างๆ.....	111
ตารางที่ ก.4	ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพ ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5 มก./ล. และพีเอช 6 ที่ปริมาณชานอ้อยต่างๆ.....	113
ตารางที่ ข.1	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของชานอ้อยปรับสภาพต่างๆและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	115
ตารางที่ ข.2	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของชานอ้อยปรับสภาพ 0% และ 5% อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ.....	117
ตารางที่ จ.1	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	131

## สารบัญรูป

### หน้า

รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำ ของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ.....	9
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Eh และ pH สำหรับระบบ Pb-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> .....	10
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Eh และ pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม.....	10
รูปที่ 2.4	การกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี.....	11
รูปที่ 2.5	สมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ความแรงไอออน 0 และ 0.1 โมลาร์.....	12
รูปที่ 2.6	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	19
รูปที่ 2.7	ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	22
รูปที่ 2.8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่างๆ.....	26
รูปที่ 2.9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดย พิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดิลิซ.....	27
รูปที่ 2.10	กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	33
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบในเซลล์พืช.....	34
รูปที่ 4.1	สีของน้ำที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	61
รูปที่ 4.2	ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคขานอ้อย.....	62
รูปที่ 4.3	ขานอ้อยที่กำลังขยาย 350 เท่า.....	63
รูปที่ 4.4	ขานอ้อยที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	63
รูปที่ 4.5	ผล XRD ของขานอ้อยก่อนปรับสภาพ.....	65
รูปที่ 4.6	ผล XRD ของขานอ้อยปรับสภาพ.....	66
รูปที่ 4.7	ผลวิเคราะห์โครงสร้างของขานอ้อยปรับสภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้ แสงอินฟราเรด (FTIR).....	67
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสัมผัสกับร้อยละการกำจัด ตะกั่วโดยการดูดซับด้วยขานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอช 4.....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

### หน้า

รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสัมผัสกับร้อยละการกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพ ปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. พีเอช 4.....	69
รูปที่ 4.10	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของตะกั่วที่พีเอชต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดย การดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง กับพีเอช ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดย การดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างกับพีเอช ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดย การดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างกับ ความเข้มข้นที่พีเอชต่างๆ.....	72
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดย การดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างกับความเข้มข้นที่พีเอชต่างๆ.....	73
รูปที่ 4.15	ค่าความสามารถในการดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชต่างๆ.....	73
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดย การดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดย ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอช 6.....	75
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดย การดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอช 6.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

### หน้า

รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อย ปรับสภาพโดยการดูดซับกับปริมาณชานอ้อยปรับสภาพ จำนวนต่างๆ ในน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6.....	76
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อย ปรับสภาพโดยการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนกับปริมาณ ชานอ้อยปรับสภาพจำนวนต่างๆ ในน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6.....	76
รูปที่ 4.20	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์.....	78
รูปที่ 4.21	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	78
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยชานอ้อย ปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	81
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	81
รูปที่ 4.24	ก้อนมอร์ต้าแทนที่ด้วยชานอ้อยปรับสภาพ 10%.....	82
รูปที่ 4.25	ก้อนมอร์ต้าแทนที่ด้วยชานอ้อยปรับสภาพ 15%.....	82
รูปที่ 4.26	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการ แทนที่ซีเมนต์ 0% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	83
รูปที่ 4.27	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการ แทนที่ซีเมนต์ 5% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	84
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มของมอร์ต้า ธรรมดาและมอร์ต้าผสมชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับ โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45.....	86
รูปที่ 4.29	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการ แทนที่ 0% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

### หน้า

รูปที่ 4.30	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนมอร์ตาที่อัตราส่วนการแทนที่ 5% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน.....	89
รูปที่ 4.31	ก้อนมอร์ตาที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน กำลังขยาย 1500 เท่า.....	90
รูปที่ 4.32	ก้อนมอร์ตาที่มีร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านกระบวนการดูดซับตะกั่ว ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน กำลังขยาย 1500 เท่า..	91
รูปที่ 4.33	ก้อนมอร์ตาที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 1500 เท่า.....	92
รูปที่ 4.34	ก้อนมอร์ตาที่มีร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านกระบวนการดูดซับตะกั่ว ที่ระยะเวลาบ่ม 2/ วัน กำลังขยาย 1500 เท่า..	92
รูปที่ ค1	วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....	119
รูปที่ ค2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพขานอ้อยและขั้นตอนการดูดซับ.....	120
รูปที่ ค3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง.....	122
รูปที่ ค4	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย.....	123

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่จะต้องเร่งแก้ไข โดยปัญหาที่สำคัญก็คือ โลหะหนักที่เจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และยังคงมีแนวโน้มว่าจะมีปริมาณของสิ่งเจือปนในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม จึงมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดน้ำเสียโดยที่โรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน ก็จะปล่อยน้ำเสียที่มีการเจือปนของโลหะหนักต่างชนิดกันไปด้วยซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายกับมนุษย์ในลักษณะที่ต่างกันออกไป ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้มีปริมาณโลหะหนักอยู่ในค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งก่อนที่จะทำการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

ปัจจุบันกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีมากมายหลายวิธีได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน หรือกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุน ตลอดจนใช้เทคโนโลยีสูง รวมทั้งต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นถ้าหากสามารถนำของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนัก ก็นับว่าเป็นการช่วยจัดการกับของเสียเหล่านั้นได้อีกด้วย

น้ำตาลนับเป็นสินค้าออกที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย นอกจากนี้อุตสาหกรรมน้ำตาล ยังเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่นๆ รวมทั้งภาคเกษตรกรรมอีกด้วย กล่าวคือ นอกจากน้ำตาลจะต้องอาศัยอ้อยซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบแล้ว น้ำตาลยังสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร ผลิตภัณฑ์นม น้ำหวาน น้ำอัดลม ผลิตภัณฑ์ยา และผลิตภัณฑ์

อื่นๆอีกมากมาย ปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยจำนวน 46 โรงงานมีการใช้อ้อยในแต่ละปีการผลิตประมาณ 50 ล้านตัน

ในกรรมวิธีการผลิตน้ำตาลนั้น อ้อยจะถูกทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำเข้าเครื่องหีบเพื่อให้ได้น้ำอ้อยออกมา น้ำอ้อยนี้จะนำไปผ่านกระบวนการทำให้สะอาดและนำเข้าหม้อต้มระเหยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลต่อไป และจะมีวัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นคือ เศษอ้อยที่ผ่านการหีบแล้วหรือที่เรียกว่า ชานอ้อย ปริมาณชานอ้อยในปีการผลิตหนึ่งๆ ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย นั้นไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน และประมาณร้อยละ 30 ของชานอ้อยเหล่านี้ จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานความร้อนเพื่อใช้กับหม้อต้มระเหยในโรงงานน้ำตาล

ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำชานอ้อย ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมาก มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาเตรียมเพื่อใช้เป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดโลหะหนัก คือ ตะกั่ว โดยการศึกษาสภาวะของน้ำเสียเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว รวมถึงปริมาณชานอ้อยที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และนำชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้วไปทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification) และหาประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักสูงพอที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง ซึ่งจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตสารดูดติดผิวที่มีราคาถูกมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ปัจจัยที่สนใจสำหรับการวิจัยนี้ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับ และปริมาณชานอ้อยที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

1.2.2 ศึกษาการทำให้ชานอ้อยที่ใช้เป็นตัวดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการนำชานอ้อยไปแทนที่ซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆแล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง

1.2.3 ศึกษาความเสถียรของก้อนซีเมนต์ผสมชานอ้อยที่ใช้เป็นตัวดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดสอบการถูกชะละลายของตะกั่ว



1.2.4 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยการใช้ชานอ้อย เป็นตัวดูดซับแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลอง ณ.ห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ทำการเตรียมชานอ้อยเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยนำไปต้มกับกรดไฮโดรคลอริก และทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำไปบดให้มีขนาด 200 ไมครอน

1.3.2 การวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1.3.2.1 ขั้นตอนการดูดซับ

- การทดลองที่1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของชานอ้อยที่ใช้ดูดซับตะกั่วในน้ำเสีย สังเคราะห์
- การทดลองที่2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์
- การทดลองที่3 การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ
- การทดลองที่4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3.2.2 ขั้นตอนการทำให้เป็นก้อนแข็ง

- การทดลองที่ 1 การศึกษาหาอัตราส่วนชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับตะกั่วต่อซีเมนต์ และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม
- การทดลองที่ 2 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่ม โดยใช้อัตราผสมของชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับตะกั่วต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม
- การทดลองที่ 3 การศึกษาวิธีการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้มีการนำขาน้อยซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากการผลิตน้ำตาล ให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก

1.4.2 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้ขาน้อยปรับสภาพในการดูดซับตะกั่วและสามารถนำข้อมูลไอโซเทอมซึ่งเป็นการทดสอบการดูดซับมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับอื่นได้

1.4.3 ผลที่จากการศึกษาครั้งนี้อาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่จริง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### บททวนเอกสาร

#### 2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ จากธาตุต่างๆเท่าที่ค้นพบ 105 ธาตุ

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลว) สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี

คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า จึงสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-compound) ได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound)

##### 2.1.1 ตะกั่ว

###### 2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุทรานสิชัน (Transition element) ในตารางธาตุ พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ตะกั่วเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีหลายไอโซโทป (Isotope) แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียร (Stable isotope) มีเพียงชนิดเดียวคือ Pb-208 เป็นโลหะหนักสีเทา มีสีผงเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีน้ำหนักอะตอม 207.17 ความถ่วงจำเพาะ 11.37 มีความอ่อนตัว สามารถดัดหรือรีดได้ง่าย เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง เป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่างๆได้หลายชนิด สารประกอบตะกั่วส่วนมากไม่ละลายน้ำ โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ไดออกไซด์จะมีสีดำหรือสีเทา ตะกั่วอาจอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์บางอย่างสามารถละลายน้ำได้ (Rochow และ Abel, 1973 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภราชนนทร์รัตน์, 2543) ตะกั่วเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในกรดไนตริกเข้มข้นร้อนและในกรดเกลือ กรดกำมะถันและกรดน้ำส้มที่เข้มข้นเดือด ตะกั่วมีจุดเดือดที่ 1740 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศา

เซลเซียส ส่วนแร่ตะกั่วเป็นสารประกอบตะกั่วที่มีวาเลนซ์ +2 และ +4 โดยส่วนมากจะพบอยู่ปนกับหินอัคนีบางชนิดในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ มีรูปแบบต่างๆที่สำคัญ 3 แบบได้แก่

- 1) กาลีนา (Galena, PbS) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ  $1.1 \times 10^{-29}$
- 2) เซอร์ไรต์ (Cerrusite, PbCO<sub>3</sub>) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ  $1.5 \times 10^{-13}$
- 3) แองกลีไซต์ (Anglesite, PbSO<sub>4</sub>) จะมีค่าคงที่ของการละลายน้ำเท่ากับ  $1.8 \times 10^{-8}$

Barth, 1985 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภราชนทร์รัตน์, 2543 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่าความสามารถในการละลายน้ำตะกั่วในธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะพบได้ว่าความสามารถในการละลายน้ำจะต่ำสุดอยู่ในช่วงพีเอชที่ 7-9 ถ้าค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำกว่านี้ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วจะมากขึ้น

#### 2.1.1.2 การใช้ตะกั่วในวงการอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

##### 1. สารประกอบอนินทรีย์ตะกั่ว เช่น

1.1 โลหะตะกั่วใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะ นำมาทำเป็นแผ่น หรือท่อโลหะใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน แผ่นกรองฝนอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำลูกปืนฉากกันกัมมันตรังสี

##### 1.2 ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่

- ตะกั่วโมนอกไซด์ (Lead Monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน
- ตะกั่วออกไซด์ (Leadred Dioxide) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร
- ตะกั่วออกไซด์ หรือตะกั่วทองแดง (Leadred Oxide) ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ สีทากันสนิม เครื่องแก้ว ยาง และเครื่องเคลือบ

1.3 สารประกอบของเกลือตะกั่ว คุณสมบัติมีสีต่างๆกันจึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมสี เช่น

- ตะกั่วเหลือง (Lead cromate)
- ตะกั่วขาว (Lead Carbonate)
- ตะกั่วซัลเฟต (Lead Sulfate) ใช้ในอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์
- ตะกั่วอะซิเตต (Lead Acetate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม

2. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว ได้แก่ เตตราเอทิล เลด (Tetramethyl lead) และ เตตราเมทิล เลด (Tetramethyl lead) โดยใช้เป็นสารกันน็อก หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ เวลาทำงาน โดยใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อให้เชื้อเพลิงมีค่าออกเทนสูง

### 2.1.1.3 การดูดซึมของตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ

1. การดูดซึมจากระบบทางเดินอาหาร แหล่งสำคัญ คือปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร น้ำ เครื่องดื่ม ยาสมุนไพรแผนโบราณ และภาชนะเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อน พบว่าร้อยละ 70-85 ของ ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายคนปกติได้จากอาหาร

2. การดูดซึมจากระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาควันหรือฟุ้งของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น จากการหลอมตะกั่วหรือเชื่อมโลหะ ซึ่งเป็นทางเข้าสู่ร่างกายอันดับแรกของผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสตะกั่ว เช่นคนงานในโรงงานหลอมตะกั่ว แบตเตอรี่ โรงงานผลิตสี ฯลฯ

3. การดูดซึมทางผิวหนัง เกิดเฉพาะตะกั่วอินทรีย์เท่านั้น ผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนัง ได้แก่ คนงานที่ทำงานในปั๊มน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์ เนื่องในอุตสาหกรรมน้ำมันมีการเติมเตตราเอทิล เลด (Tetraethyl lead) หรือ เตตราเมทิล เลด (Tetramethyl lead) ผสมในน้ำมันเบนซิน ดังนั้นเมื่อคนงานถูกน้ำมันหกรดผิวหนัง หรือใช้น้ำมันเบนซินล้างมือ เตตราเอทิลสามารถละลายชั้นไขมันของผิวหนังได้ ตะกั่วจึงสามารถซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกายไปสู่ตับ และจะเปลี่ยนเป็นไตรเอทิล เลด (Triethyl lead) ได้ช้ามาก โดยมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 200-350 วัน ตะกั่วจึงสามารถสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นเวลานาน

กลุ่มผู้เสี่ยงต่อการเกิดโรคพิษตะกั่วได้แก่ คนงานทำเหมืองตะกั่ว คนงานโรงงานถลุงแร่ตะกั่ว คนงานโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ คนงานโรงงานผลิตแบตเตอรี่ คนงานโรงงานผลิตสี คนงานโรงงานชุบโลหะ คนงานโรงงานทำเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก คนงานโรงงานทำเครื่องประดับโลหะ คนงานบัดกรีตะกั่ว คนงานเรียงพิมพ์ และหล่อตัวพิมพ์ คนงานโรงงานผลิตและบรรจุสารกำจัดศัตรูพืช คนงานทาหรือพ่นสีกันสนิม และสีทาบ้าน คนงานโรงงานผลิตแก้ว คนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับน้ำมันเบนซินที่ผสมสารตะกั่ว (ตะกั่วอินทรีย์) เช่น เด็กสถานีบริการน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์

#### 2.1.1.4 พิษตะกั่วต่อร่างกาย

##### พิษตะกั่วในผู้ใหญ่

1. อาการทางระบบทางเดินอาหาร พบได้บ่อยในผู้ใหญ่ โดยเริ่มจากมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก บางรายมีอาการท้องเสีย อาการที่สำคัญคือ ปวดท้องอย่างรุนแรงมาก ที่เรียกว่า “โคลิค” เป็นสาเหตุให้ผู้ป่วยมาโรงพยาบาลผู้ป่วยอาจปวดท้องจนตื่นตัวงอ อาการปวดท้องนี้อาจทำให้แพทย์วินิจฉัยโรคผิดว่าเป็นอาการปวดท้องเนื่องจากสาเหตุทางศัลยกรรมได้ เช่น ไส้ติ่งอักเสบ นอกจากนี้การดื่มสุรา หรือภาวะเจ็บป่วยอื่นๆ จะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกั่วจากที่เก็บสะสมไว้ ออกมามากขึ้น นอกจากนี้อาจตรวจพบแนวเส้นตะกั่วบริเวณตะกั่วเหงือก (Lead line) มีลักษณะเป็นเส้นสีน้ำเงิน-ดำ จับอยู่ที่ขอบเหงือกต่อกับฟันห่างจากฟันประมาณ 1 มิลลิเมตร พบบ่อยบริเวณฟันหน้ากราม และฟันกราม

2. อาการทางระบบประสาทส่วนปลาย ผู้ป่วยจะมีอาการอ่อนแรงของกล้ามเนื้อแขนและขา บางครั้งมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อ และข้อต่อต่างๆ ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วมากๆ เป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดอัมพาตของกล้ามเนื้อได้ ซึ่งมักจะเกิดกับกล้ามเนื้อที่ใช้เหยียดข้อ มืออ่อนแรง ทำให้เกิดอาการที่เรียกว่า ข้อมือตก หรือข้อเท้าตก การเป็นอัมพาตมักจะไม่ใช่ทำให้ประสาทความรู้สึกเสียส่วนมากมักจะ เป็นเฉพาะกล้ามเนื้อข้างใดข้างหนึ่งของแขนหรือขาเท่านั้น และมักจะมีอาการข้างที่ถนัดก่อน

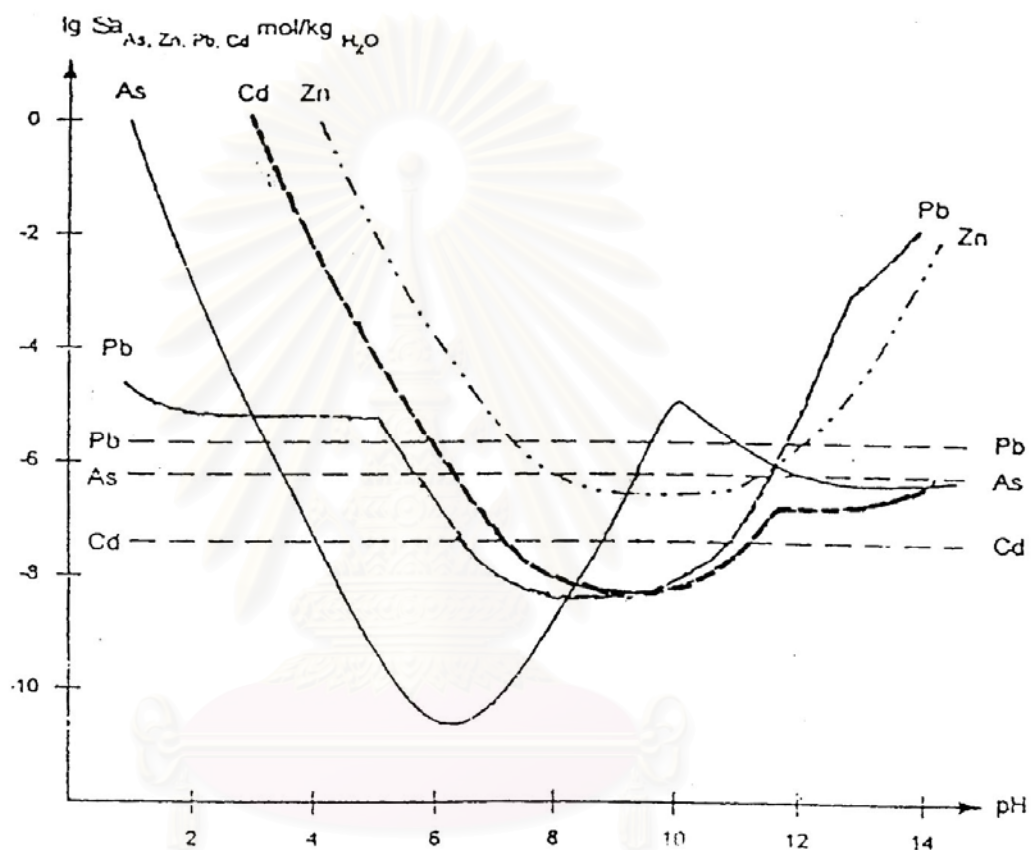
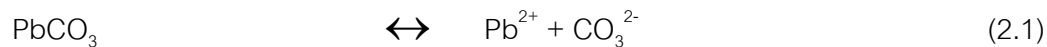
3. อาการทางสมอง เป็นอาการแสดงที่พบว่ารุนแรงที่สุด มักพบในเด็กที่รับตะกั่ว อินทรีรี่หรือสูดเอาไอและละอองฝุ่นตะกั่วเข้าไปมาก สำหรับผู้ใหญ่พบได้น้อย โดยมากเกิดจากตะกั่ว อินทรีรี่

4. อาการทางโลหิต ผู้ป่วยมักจะมีอาการซีดเลือดจาง อ่อนเพลีย นอกจากอาการดังกล่าว แล้วผู้ป่วยมักมีอาการปวดศีรษะ มึนงง ในรายที่เป็นเรื้อรัง พบว่ามีอาการตัวเหลือง ตาเหลืองได้ด้วย

#### 2.1.2 กลไกในการละลายน้ำของตะกั่ว

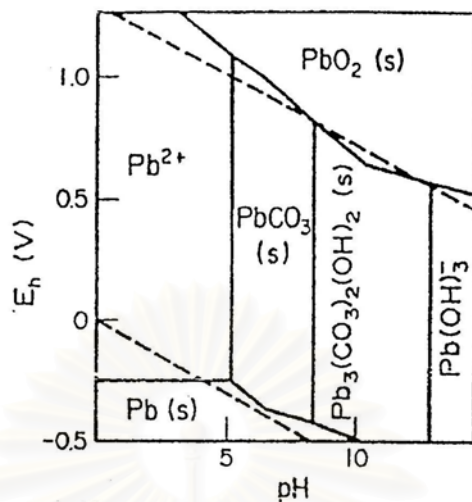
สารตะกั่วที่ปรากฏว่าปนเปื้อนอยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปคาร์บอเนต ( $PbCO_3$ ) ประกอบกับ ผิวดินบริเวณต้นน้ำตามธรรมชาติก็เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนต รวมทั้งกิจกรรมการทำเหมืองแร่ในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นในที่นี้จะขอกกล่าวเฉพาะการละลายของตะกั่วคาร์บอเนตเป็นหลัก

ในธรรมชาติจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ตะกั่วคาร์บอเนตเกิดรูปได้หลายรูปที่ละลายน้ำได้ดังสมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งแสดงการแตกตัวและการละลายในสภาพกรดของ ตะกั่วกลุ่มคาร์บอเนต

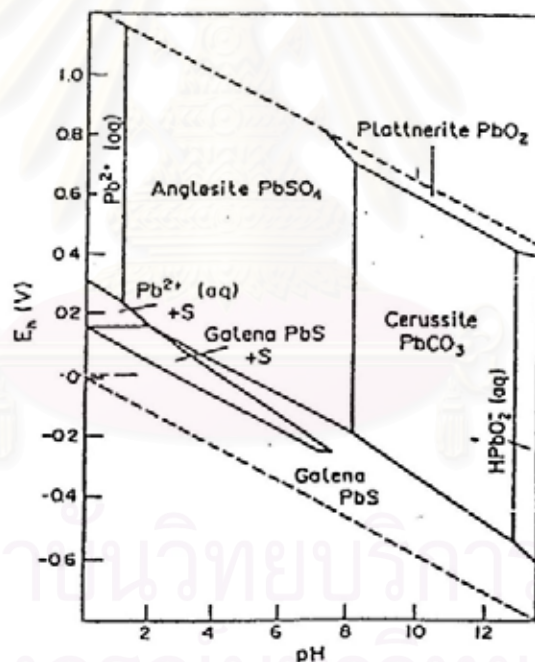


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ (Barth, 1985 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์, 2543)

ในรูปที่ 2.2 เป็นรูปของตะกั่วคาร์บอเนตที่อยู่ภายใต้สภาวะตามธรรมชาติ และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ตะกั่วกับน้ำตามธรรมชาติ แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Eh และ pH สำหรับระบบ Pb-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>  
(Stumm และ Morgan, 1970)

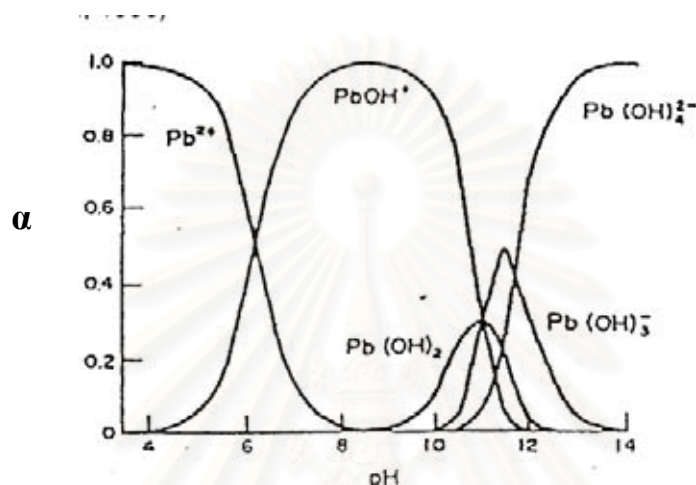


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Eh และ pH สำหรับสินแร่ตะกั่วและกลุ่ม  
(Garrels และ Christ, 1965 )

การละลายน้ำของตะกั่วอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) จะได้ค่า  $\log K$  ของ  $\text{Pb}(\text{OH})^+$  เท่ากับ -7.9 สารไฮโดรไลซิสของตะกั่วจะเป็นสารที่พบได้หลายองค์ประกอบ เช่น เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 12 ไม่พบว่ามีการเกิดของ  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  เกิดขึ้น แต่



จะอยู่ในรูปของสารละลาย จากรูปที่ 3.4 จะแสดงปริมาณตะกั่วไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆที่ระดับความเป็นกรด-ด่างต่างๆกัน โดย  $\text{Pb(OH)}^+$  มีค่า  $\log K_1 = 7.82$   $\text{Pb(OH)}_2$  มีค่า  $\log K_2 = 10.88$   $\text{Pb(OH)}_3^-$  มีค่า  $\log K_3 = 13.94$  และ  $\text{Pb(OH)}_4^{2-}$  มีค่า  $\log K_4 = 16.33$  นอกเหนือจากสารทั้งสี่ตัวที่กล่าวมาแล้ว สารละลายจะมี  $\text{Pb(OH)}_4^{4+}$   $\text{Pb}_2(\text{OH})_3^{3+}$   $\text{Pb(OH)}_4^{2+}$  และ  $\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}$  (Fergusson,1991)



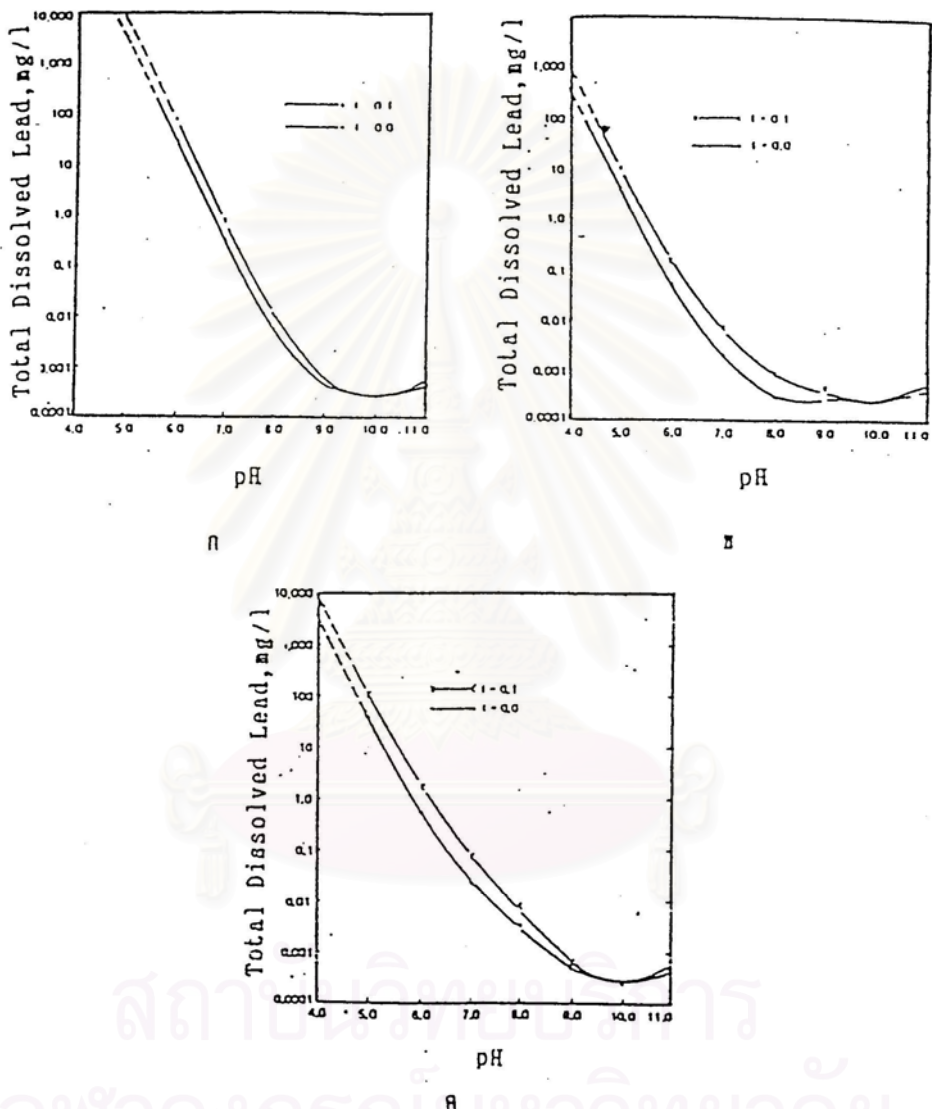
รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี (Fergusson,1991)

นอกจากการทำให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกันน้ำแล้ว ในการละลายน้ำของสารประกอบโลหะหนักตะกั่ว ในวิชาวิทยาการละลาย (Hydrometallurgy) ก็ได้ใช้สภาพความเป็นกรด-ด่าง หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากเกลือ เช่น กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือแกง มาใช้ในการสกัดเอาสินแร่ออกจากสินแร่ที่มีเกรดต่ำ ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนสภาพความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตะกั่วจะมีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติของกลุ่มทางเคมีของตะกั่วในดินที่เป็นกรด-ด่างภายใต้ toxic condition นั้น  $\text{Pb(II)}$  จะมี  $\text{Pb}^{2+}$  Org,  $\text{PbSO}_4$  และ  $\text{PbHCO}_3^+$  เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด และมี  $\text{PbCO}_3$   $\text{PbHCO}_3^+$   $\text{Pb(CO}_3\text{PbHCO}_3)_2^{2-}$  และ  $\text{PbOH}^+$  เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง (Florence,1977; Sposito, 1983 อ้างถึงใน อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ, 2544)

### 2.1.3 ตะกั่วในน้ำเสีย

ตะกั่วเป็นสารมลภาวะที่ไม่สลายตัวเองในธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากตะกั่วมี

คุณสมบัติเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ทำสี หุ้มสายเคเบิล การทำบัดกรี ทำตัวพิมพ์ ท่อน้ำ ลูกปืน แผ่นตะกั่วใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว พลาสติก เซรามิก แผ่นเหล็กอบสังกะสีและโลหะผสมนานาชนิด



รูปที่ 2.5 สมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ความแรงไอออน 0 และ 0.1 โมลาร์ โดยมี

- ก.  $CO_2 = 10^{-3}$  โมลาร์
- ข.  $CO_2 = 10^{-2}$  โมลาร์
- ค.  $CO_2 = 10^{-4.87}$  โมลาร์ (Hem และ Duram, 1973 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์, 2543)

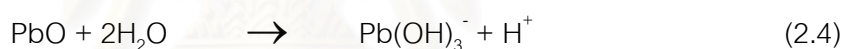
การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของ ตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติหรือน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ความสัมพันธ์ของการละลายของตะกั่วในน้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ ในความเข้มข้นต่างๆกับพีเอช แสดงในรูป 2.5 จากการศึกษาของ Nayer และ Dague, 1975 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน, 2543 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ คือความเป็นด่าง ความกระด้าง และพีเอช ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันกล่าวคือ อัตราส่วนของความเป็นด่าง ซึ่งอยู่ในรูปคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต-ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ความกระด้าง ก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างและพีเอชเช่นเดียวกัน

- ผลของพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูป สารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วออกไซด์ ดังสมการ (2.3)



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ (2.4)



- ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วย ปูนขาวที่พีเอช 10.5 ซึ่งที่พีเอชนี้ ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ไอออนลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมและแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

- ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออนที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนอยู่รูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ (2.5)



ที่พีเอช 8.5-12 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ดังสมการที่ (2.3) หรืออาจจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนตพื้นฐาน (Basic lead carbonate) ดังสมการ (2.6)



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ตามสมการ (2.4)

## 2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ความยากง่ายในการเดินระบบ และความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 แบบดั้งเดิม (Conventional) ใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation) ด้วยสารเคมี เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยการเปลี่ยนรูปโลหะหนักจากโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยกระบวนการทางเคมี การกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งเสียก่อน โลหะบางชนิดมีความเป็นพิษสูงและละลายน้ำได้ดี ต้องทำการรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษแล้วจึงตกตะกอน เช่น  $\text{Cr}^{6+}$  รีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของ  $\text{Cr}^{3+}$  แล้วตกตะกอนเป็น  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ปฏิกริยการรีดิวซ์ และการตกตะกอนจะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับพีเอช ปริมาณและชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสีย ต้องตกตะกอนโลหะหนักทีละชนิด จึงต้องใช้เวลานาน และต้องนำกากตะกอนไปฝังกลบ นอกจากนี้ยังไม่สามารถที่จะลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่มีอยู่ในปริมาณน้อยให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้ และประการสำคัญคือ สูญเสียโลหะที่มีค่า และน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งไม่ต้องทำการสร้างตะกอนแข็งในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ แต่เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ที่มีประจุเหมือนกับที่มีอยู่ในสารละลาย กับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด มีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุมูลในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด วิธีการนี้มีข้อดีคือ เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะได้น้ำที่มีความ

เข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบโลหะสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ ใหม่ได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่อง ค่าใช้จ่าย เนื่องจากเรซินสังเคราะห์มีราคาแพงมาก ดังนั้นวิธีการนี้ จึงเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณ โลหะหนักในน้ำต่ำ หรือมีความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลย์ต่อลิตร เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

2.2.3 การระเหย (Evaporation) เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไป ทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้น หรือกลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดความร้อนมาจาก เชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อน หรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำเสียที่ทำจากบำบัดด้วยวิธีนี้ต้อง ผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่ความเข้มข้นโลหะหนักสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับการ แลกเปลี่ยนไอออน แต่จะทำให้ต้นทุนการดำเนินการสูง

2.2.4 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยใช้ แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและ สารบางตัวผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง น้ำเสียที่จะนำไป บำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงออก และกรอง สารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานอุตสาหกรรมชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิของกระบวนการสูง

2.2.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านกัมมันต์ใน การดูดซับมลสารไว้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับ น้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ทำให้น้ำทิ้งสะอาด

## 2.3 กระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิวถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นการดูดติดผิวของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดติดผิวของสารละลายเป็นที่ทราบกันดีว่า การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับ การสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิว หรือระหว่างหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างสองสถานะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับ ของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

การดูดติดผิวมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางภาพและเคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf และ Eddy, 1991 Rizzo, 1971 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน, 2543) กล่าวว่า การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิ หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ เงินลงทุนต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

สารที่มีอำนาจดูดติดผิวโมเลกุลต่างๆ ได้ หรือสารดูดติดผิวมีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอ็คติเวเต็ดซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามสารดูดติดผิวประเภทนี้มีข้อเสียคือจับโมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทนี้มีจำกัดมาก

2) แอ็คติเวเต็ดคาร์บอน อันที่จริงสารดูดติดผิวประเภทนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแอ็คติเวเต็ดคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่าคือ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามากและสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมักเป็นสารราคาถูกลง ความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดติดผิวอาจมีมากกว่าแอ็คติเวเต็ดคาร์บอน เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องการฟื้นฟูสภาพ

ปัจจุบันได้มีการผลิตสารดูดติดผิวสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมากมายหลายชนิด เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่มีความสามารถในการดูดติดผิวและความคล่องตัวในการทำงานน้อยกว่าแอ็คติเวเต็ดคาร์บอน แต่สารดูดติดผิวเหล่านี้เหมาะสำหรับนำไปใช้งานบางประเภท

### 2.3.1 กลไกการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

#### 2.3.1.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) (Eckenfelder, 1989) การดูดติดผิวทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Outer - Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



เมื่อ SOH คือ พื้นที่ผิวไฮดรอกซิล

M<sup>2+</sup> คือ ไดวาเลนต์แคโทออน

H<sup>+</sup> คือ ไฮโดรเจนไอออน

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีแตกต่างกับการดูดติดผิวทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ส่วนการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนั้นอ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Inner-Sphere Surface Reaction ดังสมการที่ 2.9



เมื่อ	SOH	คือ พื้นที่ผิวไฮดรอกไซด์
	$M^{2+}$	คือ ไดวาเลนต์แคทไอออน
	$H^+$	คือ ไฮโดรเจนไอออน

Kiselev ,1965 และ Voice และ Weber, 1983 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์, 2543 กล่าวว่า ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดติดผิว โดยการดูดติดผิวทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล นอกจากนี้ Hassler,1963 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์, 2543 ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่า การดูดติดผิวทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดติดผิวทางเคมีเพิ่มขึ้น

### 2.3.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

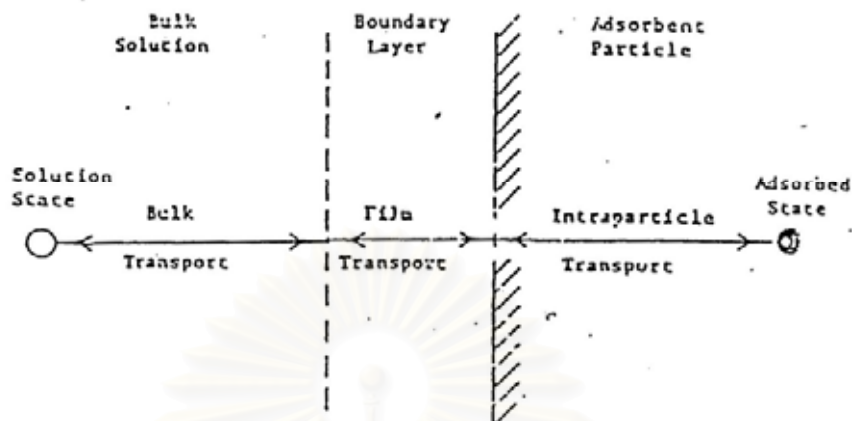
อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุด ในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน คือ

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Interparticle transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในชั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน





รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์  
(Eckenfelder, 1989)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่า ภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว

### 2.3.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวเกิดจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของแข็ง ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง ที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ จะมีค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ หรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ดูดซับไว้เทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับนั้นที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมมากที่สุด

กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่นี้ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็ง อัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวทำละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติของตัวถูกละลาย

เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของของแข็ง กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

### 2.3.2.1 รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ

(Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับ มี 5 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.7

ไอโซเทอมแบบที่ 1 (รูปที่ 2.7a) พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งโมเลกุล (Single layer adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous powders) ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้ แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

ไอโซเทอมแบบที่ 2 (รูปที่ 2.7b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอินฟินิตี้) โดยจะเกิดบนวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous powder) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนขนาดเล็ก (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ไอโซเทอมแบบที่ 3 (รูปที่ 2.7c) การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 แต่การดูดซับของชั้นแรกให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกละลายที่เป็นของเหลว (The adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกละลายมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

ไอโซเทอมแบบที่ 4 (รูปที่ 2.7d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับ มีรัศมีรูพรุนประมาณ 15-1000 อังสตรอม การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดขึ้นเดียวกับในแบบที่ 2 คือเกือบเป็นแบบผิวชั้นเดียว (Monolayer) สมบูรณ์

ไอโซเทอมแบบที่ 5 (รูปที่ 2.7e) การดูดซับแบบที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับแบบที่ 4 เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

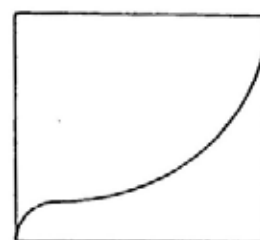


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



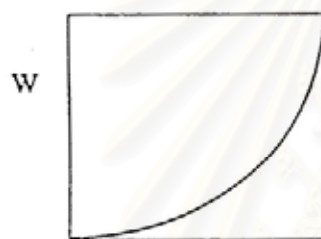
0 P/Po 1

(a)



0 P/Po 1

(b)



0 P/Po 1

(c)



0 P/Po 1

(d)



0 P/Po 1

(e)

รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ :  $W$  = ปริมาณการดูดซับ ;  $P/P_0$  = ความดันสัมพัทธ์ (Cheremisinoff และ Ellerburch, 1978)

### 2.3.2.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่ง  
เป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและผลจากการทดลอง ซึ่งรูปแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์มี  
ดังนี้

#### ก) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมุติฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ ที่เรียกว่า Ideal localized monolayer model คือ

- โมเลกุลถูกดูดซับอยู่ในบริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว
- พื้นที่บริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดซับของไอโซเทอมการดูดซับแบบ  
แลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2.10)$$

โดยที่  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วย  
เป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่น  
ชั้นเดียว (Monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ  
โมลต่อลิตร

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.10) เมื่อ  $X$  เข้าใกล้  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าใกล้อนันต์ สมการที่ (2.10) สามารถ  
เขียนได้เป็น

$$C_e / X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X$  กับ  $C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/bX_m$  สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ  $C_e$  ไปหารสมการที่ (2.11) จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_0)(1/bX_m) \quad (2.12)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_0$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/bX_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m$  รูปที่ 2.8 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงมัวร์

$$r = 1/(1+bC_0) \quad (2.13)$$

โดยที่  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง 2.1 ผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวจากลักษณะรูปไอโซเทอม  
(ชลธา ไกรวัตนุสสรณ์ และคณะ, 2538)

Seperation Factor : r	ลักษณะของไอโซเทอม
$r > 1$	การดูดซับไม่ดี
$r = 1$	การดูดซับคงที่หรือการดูดซึม
$0 < r < 1$	การดูดซับดี
$r = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท

(BET, Brunauer Emmerett Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสมมุติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือแต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สองหรือชั้นต่อไป สมการการดูดติดผิวแบบเบท แสดงในสมการที่ (2.14)

$$X = (X_m B C_e) / (C_s - C_e) [1 + (B-1)C_e/C_s] \quad (2.14)$$

โดยที่  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

$C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

สมการที่ (2.14) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e / X(C_s - C_e) = (1/X_m B) + \{(B-1)/X_m B\} (C_e/C_s) \quad (2.15)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X(C_s - C_e)$  กับ  $C_e/C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B-1)/X_m B$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m B$

ค) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = K C_e^{1/n} \quad (2.16)$$

โดยที่  $x$  = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

$m$  = น้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม

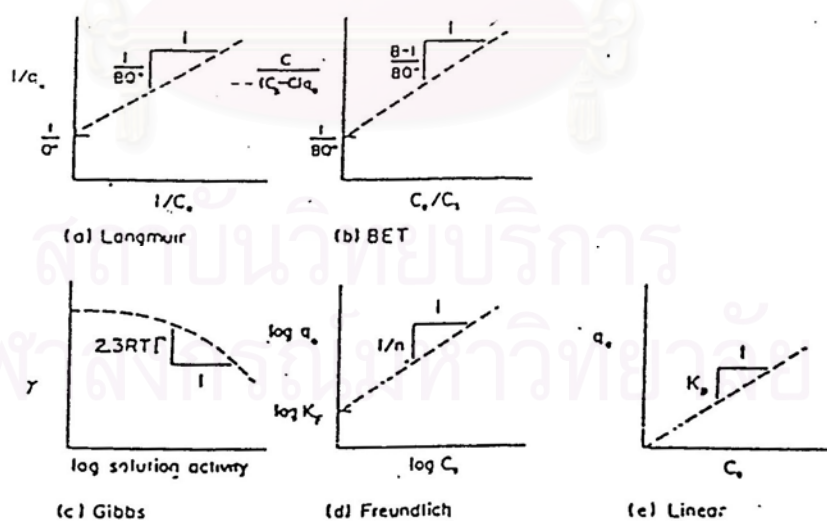
$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

$K, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการฟรุนดลิชเป็นฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\log (x/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.17)$$

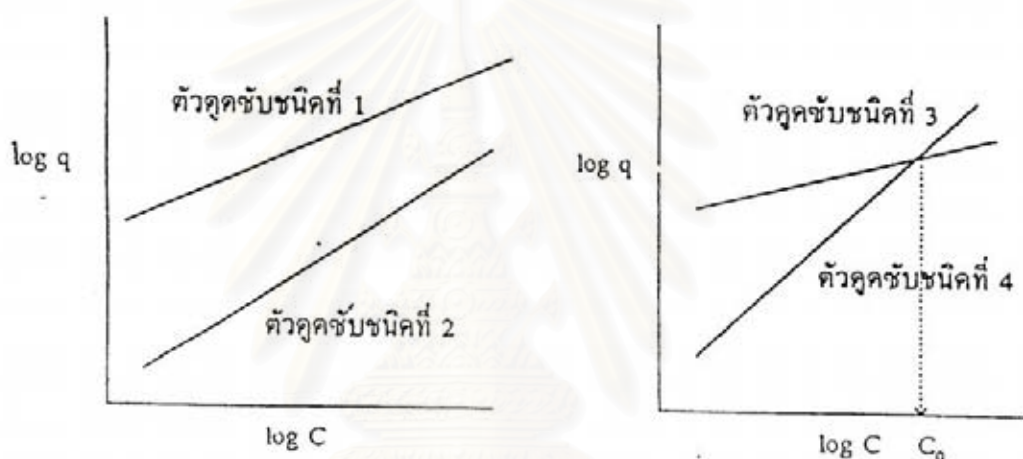
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log (x/m)$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  เมื่อ  $\log C_e = 0$  ( $C_e = 1$ ) กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชแสดงดังรูปที่ 2.8 ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี นอกจากนี้ค่า  $n$  ยังใช้บอกความสามารถในการดูดซับ และความจุของตัวดูดซับได้อีกด้วยโดยถ้าค่า  $n$  มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า  $n$  อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่า การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี



รูปที่ 2.8 แสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบต่างๆ (Voice และ Weber, 1983 อ้างถึงใน ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์, 2543)



ในการพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน พิจารณาจากค่าไอโซเทอม ดังรูปที่ 2.9ก. จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของการดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงค่าความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.9ข. ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า  $C_0$  แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูงกว่า  $C_0$  ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.9ข. ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดแบบที่มีการไหลต่อเนื่องแล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช (ชลธา ไกรวัฒน์สุพรรณ และคณะ, 2538)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

#### ก) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากเนื่องจาก

ไม่ถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม น้ำมีความดันป้อนสูง ทำให้น้ำไม่อาจจะสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดติดผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงกรณีนี้ Pore diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ด้วยเหตุนี้ในกรณีความดันป้อนสูง อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับ Pore diffusion และในกรณีความดันป้อนต่ำ อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับ Film diffusion

#### ข) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

อัตราการดูดติดผิวเป็นส่วนหนึ่งผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว ส่วนพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption capacity)

#### ค) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดผิว

เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้นโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดติดผิวได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถกล่าวได้เต็มที่ว่ามีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวและความสามารถในการละลายน้ำ

#### ง) ขนาดของสารที่ถูกดูดติดผิว

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว จากการวิจัยพบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจะถูกดูดเข้าไปบ้าง

### จ) พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกรดติดผิวด้วย

### ฉ) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

#### 2.3.4 ประโยชน์ของการดูดติดผิว

สารดูดติดผิวชนิดต่างๆได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียเพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่นกรดฮิวมิก และกรดฟัลลิก
- 2) กำจัดคลอรีนในน้ำ
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะสารไฮโดรคาร์บอนแบบลูกโซ่อิ่มตัว

แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารดูดติดผิวแทน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำชานอ้อยมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในการบำบัดโลหะหนัก

## 2.4 การผลิตน้ำตาล

### 2.4.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

กระบวนการผลิตน้ำตาลแสดงใน รูปที่ 2.10 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 1.) การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปซึ่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกย่อยอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำ หน้าทีฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

#### 2.) การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมากที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เยื่อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

#### 3.) การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ชุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่างอ่อน ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำน้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกโดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลางและปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปลอ่ยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวานกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่งส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

#### 4.) การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (Evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (Syrup) ในหม้อสุดท้าย มีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อม หลังจากผ่านตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (Vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผลึกนี้ว่า แมสควิท (Massequite) เมื่อทำให้แมสควิทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปแยกผลึกต่อไป

#### 5.) การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสควิทที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆขนาด 400-600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

### 2.4.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอนและเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

#### 1.) กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีน้ำตาลที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียม อินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก

- ใช้ผสมกับขานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

## 2.) กากอ้อยหรือขานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี้ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

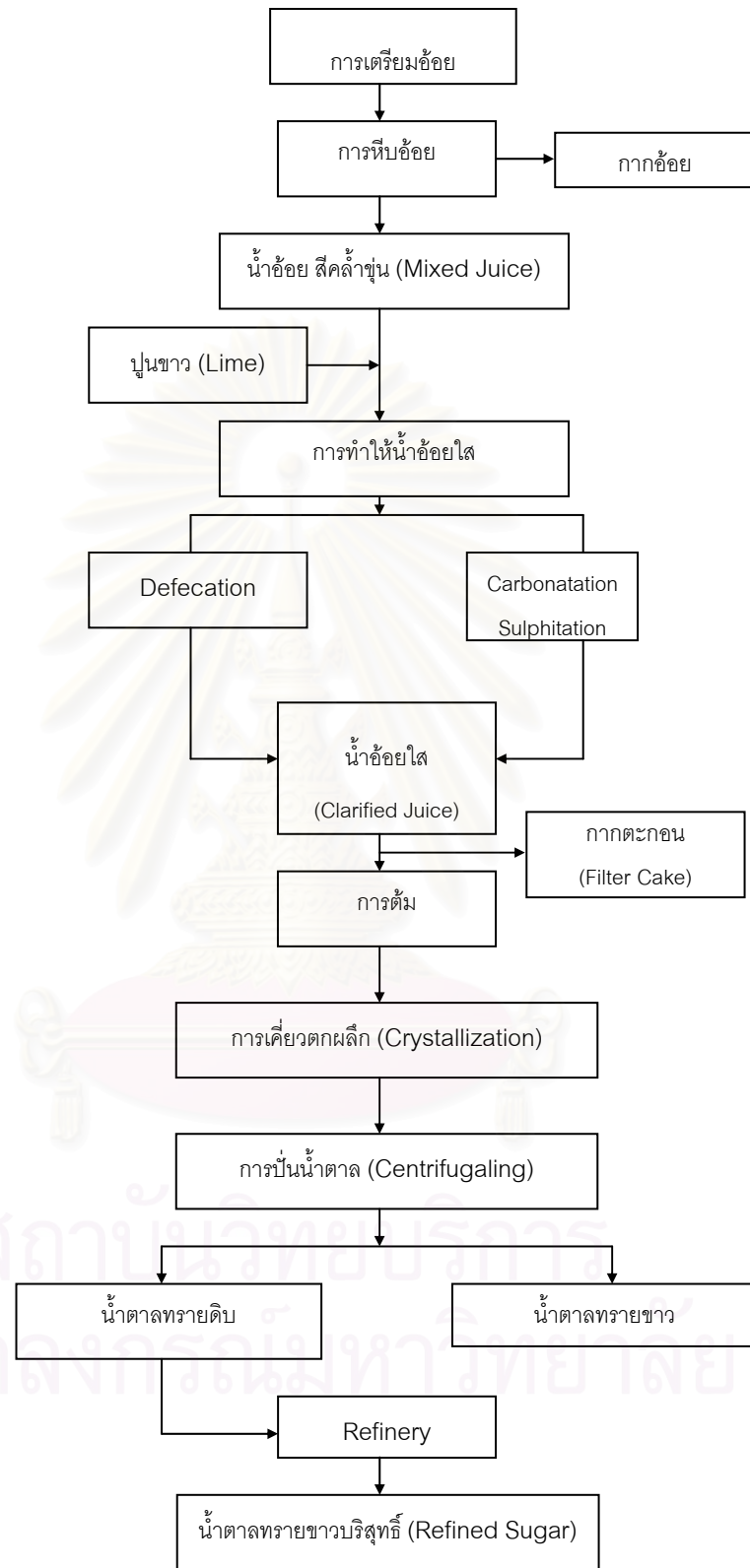
ในประเทศไทยจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้นโดยปริมาณขานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณขานอ้อยทั้งหมดที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การนำขานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือขานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

## 3.) กากตะกอนอ้อย (Filter Cake)

เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

## 4.) เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse Fly Ash)

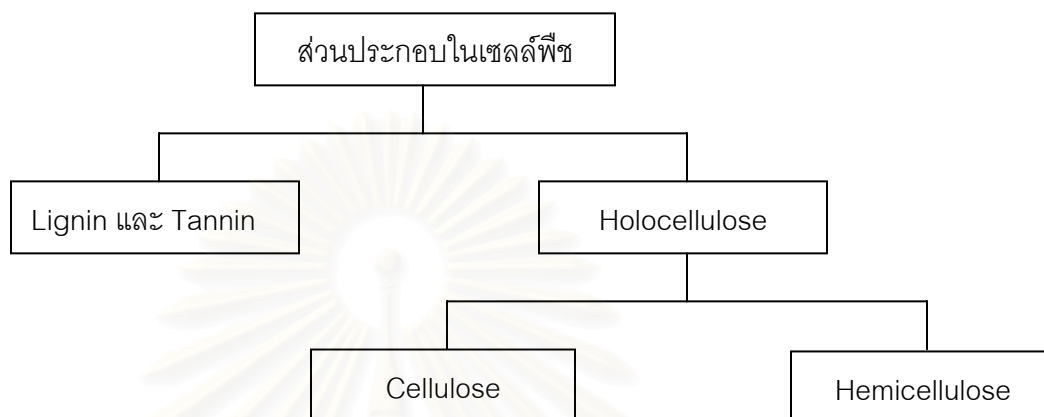
เถ้าลอยนี้เกิดจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้น พุ้งกระจาย จึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับ เถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตน้ำตาล (อัศวินธ์ ปัทมะเวณู, 2540)

## 2.5 ชานอ้อย (Bagasse)

2.5.1 องค์ประกอบในเซลล์พืช ในเซลล์พืชประกอบด้วย Lignin, Tannin และ Holocellulose ใน Holocellulose ยังประกอบไปด้วย Cellulose และ Hemicellulose เป็นไปดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบในเซลล์พืช (กนกพร โกชะโยธิน, 2545)

### 2.5.2 องค์ประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของชานอ้อย

ลำต้นอ้อยประกอบด้วยข้อและปล้องเป็นระยะๆ สลับกัน ภายในลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ประเภท คือ

1. เนื้อเยื่อที่อยู่รอบนอก ได้แก่ Epidermis, Cortex และ Pericycle
2. เนื้อเยื่อประเภทท่อลำเลียง ได้แก่ Vascular Fiber Bundles
3. เนื้อเยื่อประเภทสะสมอาหาร ได้แก่ Parenchyma

เมื่ออ้อยเข้าหีบในโรงงาน จะถูกสกัดเอาน้ำอ้อยออก ส่วนที่เหลือคือชานอ้อยซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำไฟเบอร์และมีสารที่ละลายน้ำได้ (Soluble solid) ปนอยู่นิดหน่อย ส่วนประกอบพวกนี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของอ้อย การตัดและประสิทธิภาพของโรงงาน

ค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบเหล่านี้ มีดังนี้

ความชื้น (Moisture)	46-52 %
ไฟเบอร์ (Fiber)	43-52 %
Soluble Solid (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล)	2-6 %



องค์ประกอบที่เป็นไฟเบอร์จะไม่ละลายน้ำ ประกอบด้วย Cellulose, Pentosans, Lignin ขนาดของไฟเบอร์และพารามิเตอร์แตกต่างกันไปตามแหล่งของอ้อย ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ค่าเฉลี่ยของความยาวไฟเบอร์อยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.7 มม. ส่วนความยาวของพารามิเตอร์มีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.4 มม.

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ใช้วิธีวิเคราะห์ของ Technical Association of The Pulp and Paper Industry Standard ชานอ้อยที่จะนำมาวิเคราะห์จะถูกบดจนป่นและเลือกเอาขนาด 40-60 เมช ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย (ปรีชา เกียรติกระจาย, 2532)

องค์ประกอบ	สัดส่วน (%ON THE EVEN-DAY BASIC)
Holocellulose	82.52
α-Cellulose	44.05
Pentosans	27.21
Lignin (ash free)	19.78
Ash	1.60
Alcohol Benzene solubility	3.06

## 2.6 การหล่อแข็ง (Solidification)

### 2.6.1 คำนิยาม

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency : US EPA) ได้ให้ความหมายของการหล่อแข็งไว้ว่า เป็นเทคนิคที่ใช้กักเก็บ (Encapsulate) ของเสียไว้ในโครงสร้างที่มีความมั่นคงแข็งแรงคล้ายหิน (Monolithic) การกักเก็บ อาจจะใช้กับของเสียที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Microencapsulation) หรือใช้กับของเสียขนาดใหญ่ (Macroencapsulation) การหล่อแข็งไม่จำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างของเสียและตัวยึดประสาน (Solidifying material) แต่จะเชื่อมประสานของเสียให้อยู่ในรูปของแข็งคล้ายหิน การ

เคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจะถูกจำกัดโดยการลดขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งมีผลต่อการชะละลาย (Leaching) และ/หรือ โดยการแยกของเสียไปเก็บไว้ในแคปซูล ที่ของเสียไม่สามารถซึมผ่านออกมาได้

จุดประสงค์ของการหล่อแข็ง เพื่อเตรียมกากของเสียอันตรายให้มีคุณสมบัติที่ดี กล่าวคือ เชื่อยต่อปฏิกิริยา คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ลดการชะละลายของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม และก้อนหล่อแข็งที่ได้สามารถรับกำลังอัด หรือมีความแข็งแรงพอสมควรสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย

วัสดุประสาน (Solidifying material) ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการหล่อแข็งเพื่อทำให้เกิดการแข็งตัว ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- เพิ่มกำลังรับแรงอัด (Strength)
- ลดความสามารถในการอัดแน่น (Compressibility) ของก้อนหล่อแข็ง
- ลดความต้านทานและซึมผ่านได้ของน้ำของของเสีย

#### 2.6.2 เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย มีดังนี้

ก) Cement-Based Techniques เป็นกระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ช่วยลดการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งได้ เมื่อหล่อแข็งแล้ว กากของเสียจะมีสภาพเป็นของแข็งคล้ายหิน วิธีนี้เหมาะสำหรับการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก การผสมกับซีเมนต์ที่พีเอชสูงๆ มีแนวโน้มที่จะตรึงโลหะหนักไว้ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble hydroxide) หรือเกลือคาร์บอเนต (Carbonate salt) อีออนของโลหะหนักอาจเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของสารยึดประสาน หรืออาจถูกดูดซับหรือถูกดูดกลืนไว้ในโครงผลึกของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้

ข) Lime-Based Techniques เป็นการหล่อแข็งด้วยปูนขาว ผสมกับกากตะกอนของเสียโดยอาศัยปฏิกิริยาการจับตัวแข็งระหว่างปูนขาว (Lime) กับผงซิลิกอนละเอียด และน้ำ การแข็งตัวใช้เวลานาน เหมาะที่จะใช้กับกากของเสียพวก สารอินทรีย์ มากกว่าพวกสารอินทรีย์ เนื่องจากกากของเสียพวกสารอินทรีย์ เมื่อผ่านกรรมวิธีการกำจัดแล้ว ภายหลังจากบ่ม จะได้กากของแข็งที่มีความแข็งแรงลดลง และอาจมีการแพร่ซึมเพิ่มขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การหล่อแข็งด้วย Cement-Based จะพบว่าก้อนหล่อแข็งที่ได้จาก Lime-Based ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถรับกำลังอัดได้น้อยกว่า

ค) Thermoplastic Techniques เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่ใช้ บิทูเมน(Bitumen), พาราฟิน (Paraffin) หรือ โพลีเอทิลีน (Polyethylene) ผสมกับกากของเสียแห้ง ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียสทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงกากของเสียจะถูกบรรจุหรือถูกเคลือบด้วยสารเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติจะใช้กับกากกัมมันตรังสี

ง) Organic Polymer Techniques เป็นการหล่อแข็งโดยใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์ เป็นเทคนิคการทำโพลีเมอร์ไรเซชันระหว่างโมโนเมอร์กับกากของเสีย โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนที่จะบรรจุและบำบัดต่อไป

จ) Encapsulation Techniques เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำและสภาพของสิ่งแวดล้อมได้ดี ข้อเสียคือ เป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากจึงใช้ในการกำจัดกากของเสียที่มีพิษสูงเท่านั้น

ฉ) Self-Cementing Techniques เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต, ซัลไฟด์ และมีสารคัลไซด์ (Calcined) 8-10% จะทำให้เกิด Plasterlike

ช) Glassification ใช้สำหรับการหล่อแข็งกากสารกัมมันตรังสีโดยใช้กากตะกอน ผสมกับสารซิลิกาแล้วหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของแก้วหรือวัตถุที่เป็นเซรามิก

## 2.7 วัสดุประสาน (Solidifying Material)

ในการหล่อแข็งด้วยเทคนิค Cement based วัสดุประสานที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อ สำหรับงาน

ก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทรายและน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

#### 2.7.1.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุ ซิลิกอนและอลูมินาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

#### 2.7.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วย ออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
<b>ออกไซด์หลัก</b>	
CaO	60 – 67
SiO <sub>2</sub>	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 – 6.0
<b>ออกไซด์รอง</b>	
MgO	0.1 – 5.5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.5 – 1.3
TiO <sub>2</sub>	0.1 – 0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 – 0.2
SO <sub>3</sub>	1 - 3

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	33-55
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15-35
ไตรแคลเซียม อลูมินาต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	7-15
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5-10

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

### 2.7.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำ และถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) และไดซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X-Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสาน คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ● งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดตะกั่วโดยกระบวนการดูดซับ

Harison และ Laxen (1983) ได้อธิบายว่าถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความดูดซับตะกั่วได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 และสามารถใช้กับน้ำทิ้งที่มีปริมาณตะกั่วเข้มข้นสูง แต่มีราคาแพงแม้จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการฟื้นฟูสภาพก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วโดยวิธีนี้ก็ยังคงสูง

Yavada และคณะ (1989) ได้ศึกษาถึงการนำถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์มาใช้ในการดูดซับตะกั่วโดยใช้ถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์ปริมาณ 1 กรัม เขย่าในสารละลายสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6.4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในรูปร้อยละการกำจัดจะลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น และสมการไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช

Yu และคณะ (2001) ศึกษาถึงการใช้ซีลีโอในดูดซับตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึงผลพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว ระยะเวลาในการสัมผัสและ ปริมาณของตัวดูดซับ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว ผลการทดลองพบว่าผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว (5, 10, 25 และ 50 มก./ล.) และปริมาณของตัวดูดซับ (5 10 20 30 และ 40 ก./ล.) จะเป็นไปในทางตรงข้ามกันกล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วก็จะลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัส 3 ชั่วโมง ส่วนผลของพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะน้อยมากที่พีเอชน้อยๆและจะมากขึ้นเมื่อพีเอชมากขึ้น โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น

Gupta และ Ali (In press) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดได้แก่ ตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียโดยใช้ถ่านลอยขานอ้อย โดยได้ทำการทดลองแบบแบตช์

ผลของระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้นและจะคงที่ที่ 60 นาทีสำหรับตะกั่วและ 40 นาทีสำหรับโครเมียม ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นพบว่าสามารถดูดซับมากที่สุดที่ 40 มก./ล. สำหรับตะกั่วและ 20 มก./ล. สำหรับโครเมียม และเมื่อเพิ่มพีเอชพบว่าสามารถดูดซับได้ดีขึ้นโดยที่พีเอชเท่ากับ 6 สามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดคือ 3.8 มก./ก. และที่พีเอชเท่ากับ 5 สามารถดูดซับโครเมียมได้มากที่สุดคือเท่ากับ 1.8 มก./ก.

ผลของปริมาณตัวดูดซับ พบว่าสามารถดูดซับได้มากขึ้นเมื่อปริมาณมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลอยขาน้อยจาก 2 ก./ล. เป็น 10 ก./ล. สามารถดูดซับตะกั่วได้จาก 1.4 มก./ก. เป็น 3.8 มก./ก. และสามารถดูดซับโครเมียมได้จาก 1.5 มก./ก. เป็น 1.8 มก./ก. และจากผลการทดลองยังพบว่าที่ความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C} > 40^{\circ}\text{C} > 50^{\circ}\text{C}$  ทั้งตะกั่วและโครเมียม

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟไอโซเทอมแลงมัวร์สำหรับตะกั่วให้ค่า  $Q_0 = 2.5$  2.3 และ 2.10 ที่  $30^{\circ}\text{C}$   $40^{\circ}\text{C}$  และ  $50^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และให้ค่า  $Q_0 = 4.35$  4.30 และ 4.25 ที่  $30^{\circ}\text{C}$   $40^{\circ}\text{C}$  และ  $50^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับสำหรับโครเมียม

**จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์ (2539)** ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์แบบแบตช์ โดยใช้โลหะหนักในการทดลอง 3 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลของระยะเวลาในการกวนและปริมาณของถ่านลอย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการกวนเพิ่มขึ้น และระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์มากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพบว่า ตะกั่วจะถูกกำจัดเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลเพียงแค่ 30 นาทีเท่านั้น เมื่อใช้ถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 1 และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นร้อยละ 10 เวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 10 นาทีเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์ในปริมาณต่างๆ กันพบว่าปริมาณนิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว ที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.8 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อถ่านลอย ตามลำดับ เมื่อใช้ถ่านลอยความเข้มข้นร้อยละ 1 2.5 และ 1 ตามลำดับ

ผลของพีเอช จากการทดลองบ่งชี้ว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ โดยการดูดซับจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าพีเอชสูงกว่าหรือเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดจะต่ำมาก (<20%) และประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นจนกระทั่งใกล้เคียง 100% เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า 8 สำหรับนิกเกิลและแคดเมียม และพีเอชสูงกว่า 6 สำหรับตะกั่ว

สรุปได้ว่าถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเช่นเดียวกับสารดูดซับอื่นๆ เช่น แอกทิเวตเต็ดคาร์บอน โดยการกำจัดโลหะหนักของถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์เกิดจากกระบวนการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนผลึก



**อุบลรัตน์ วาริวัฒน์ (2544)** ศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมด้วยถ่านกระดุกที่เตรียมจากการเผากระดุกโคกระปือ โดยทำการทดลองแบบแบตซ์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบตซ์พบว่า ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้ โดยถ่านกระดุกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่การเตรียมถ่านกระดุกที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดในการทดลอง

ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยคิดเป็น 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกระดุกที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ส่วนแคดเมียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกระดุกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสีย 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ถ่านกระดุกพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และการกำจัดแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

ในส่วนการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าสำหรับการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 85.28 และ 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกระดุกและสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 4937.14 และ 1851.43 เท่าของปริมาณเบด สำหรับแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 2.62 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกระดุก และสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 308.57 และ 137.14 เท่าของปริมาณเบด

- **งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ชานอ้อย**

Rao, Parwate และ Bhole (2002) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ชานอ้อยและเถ้าลอยชานอ้อยเป็นตัวดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่โครเมียม และนิกเกิล โดยได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักระหว่างการนำชานอ้อย เถ้าชานอ้อย และถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช เวลาในการสัมผัส ปริมาณของตัวดูดซับ ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ และขนาดของตัวดูดซับ สำหรับวิธีการทดลองได้ทดลองแบบแบตซ์ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะสามารถอธิบายได้โดยใช้ ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ แบบฟรุนดลิช และแบบบททฤษฎี และ เวนโกบาชาร์

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของ ถ่านกัมมันต์>ชานอ้อย> ถั่วลันเตา> และประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลของ ถ่านกัมมันต์>ถั่วลันเตา>ชานอ้อย >ชานอ้อยสำหรับสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

**เกศสุชา พูลคำ (2538)** ศึกษาการใช้ผักตบชวาและชานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนองค์ประกอบในชานอ้อยมีไฮโดรเซลลูโลส 82.52% แอลฟาเซลลูโลส 44% ลิกนิน 19.78% แพนโนแซน 27.21% และสารอื่นๆ โลหะที่ทำการศึกษาได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพอยู่ในช่วง 0.686-0.809 ม.สมมูลย์/ก. และผักตบชวาที่ปรับสภาพ (carboxymethyl water hyacinth) อยู่ในช่วง 0.330-0.496 ม.สมมูลย์/ก. ส่วนชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.065-0.086 ม.สมมูลย์/ก. และชานอ้อยที่ปรับสภาพ (carboxymethyl bagasse) มีอยู่ในช่วง 0.052-0.069 ม.สมมูลย์/ก. นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิล และสังกะสี สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียพบว่า น้ำเสียที่มีโลหะหนักน้อยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 สำหรับการรีเจนเนรชั่นใช้ประมาณ 3 เท่าของปริมาณเบด

**กนกพร โภชะโยธิน (2545)** ทำการศึกษาการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ด้วยชานอ้อย ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสภาวะที่เหมาะสม และค่าใช้จ่ายในการบำบัด ซึ่งโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้แก่ โครเมียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส แคดเมียม เงิน และปรอท

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก ได้แก่ พีเอช 9 ปริมาณชานอ้อย 25 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาในการสัมผัส 90 นาที กลุ่มชานอ้อยที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด คือชานอ้อยปรับสภาพ ขนาด 0.045 -1.00 มม. ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะหนักภายหลังจากการบำบัดในสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ แคดเมียม 0.021 มก./ลิตร โครเมียม 0.053 มก./ลิตร เหล็ก 0.078 มก./ลิตร ปรอท 3.010 มก./ลิตร แมกนีเซียม 35.920 มก./ลิตร แมงกานีส 77.100 มก./ลิตร และเงิน ไม่สามารถตรวจวัดได้

- งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ชานอ้อยนอกเหนือจากการใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

**ชลธา ไกรวัตนุสรณ์และ คณะ (2538)** ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชานอ้อยและศึกษาผลของความชื้นที่ใช้ในการกระตุ้นให้ได้ถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่าความชื้นที่เหมาะสมในการกระตุ้นเท่ากับร้อยละ 54.4 ซึ่งจะให้ผลการดูดซับสีจากน้ำตาลได้สูงสุดถึงร้อยละ 97.4

**จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ (2542)** ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของชานอ้อยผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม ที่ผ่านการปรับเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์โครสลิงก์ เซลลูโลส และที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ สีย้อมที่ใช้ได้แก่ สีไดเรกท์ (Best Direct Black B, Sirius Blue KCFN และ Sirius Rubine KZBL) และสีรีแอกทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R และ Remazol Brilliant Red 3BS) ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีของวัสดุทั้ง 3 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสลิงก์ คือต่ำกว่าร้อยละ 4 และร้อยละ 95-99 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของวัสดุทั้ง 3 ที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสลิงก์ สูงกว่าที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมาก

**ชนิตา เสมรัตน์ (2543)** ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยสารดูดติดผิวที่ใช้ คือ ถ่านกัมมันต์และ ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้แก่ ถ่านกะลา และถ่านชานอ้อยที่ได้ทำการเพิ่มคุณภาพในการดูดติดผิวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดติดผิว การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพุนดลิช และการทดสอบความสามารถในการดูดติดผิวโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง โดยผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการลดสีและซีไอดีอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 84-99 และร้อยละ 54-85 ถ่านกัมมันต์ผสมถ่านชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการลดสีและซีไอดีอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 50-98 และ 44-75 ส่วนถ่านชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการลดสีและซีไอดีอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 51-95 และร้อยละ 15-73

**ลัดดา ยาวีร์ (2544)** ศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีย้อมแอฟและสีย้อมไดเรกต์ และสีน้ำกาฬของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ชานอ้อย ผักตบชวาและเส้นใยลูกปาล์ม ทั้งชนิดที่ไม่ได้ผ่านและผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองพบว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์ จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีร่องลึกต่างๆ มากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเล็กน้อย สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมนั้นพบว่าชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมแอฟและสีย้อมไดเรกต์ เฉลี่ยเท่ากับ 6.02% ซึ่งจัดว่าต่ำกว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์มากโดยวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 91.54%

- **งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำเป็นก้อนแข็ง**

**Weng และ Haung (1994)** ศึกษาถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้ถ้ำลอยถ่านหินลิคไนต์ในการดูดซับ และการทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement fixation) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ถ้ำลอยเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับสำหรับโลหะสังกะสีและโลหะแคดเมียมในน้ำเสียที่เจือจาง ได้ผลดังต่อไปนี้คือ

ประสิทธิภาพในการดูดซับของสังกะสี เท่ากับ 0.27 มก./ก.

ประสิทธิภาพในการดูดซับของแคดเมียม เท่ากับ 0.27 มก./ก.

และเมื่อทดลองผสมปูนซีเมนต์กับถ้ำลอยถ่านหินลิคไนต์ในอัตราส่วน 90: 10 แล้วทดสอบกำลังกีดกันของคอนกรีต พบว่าต้องใช้เวลา 65 วัน จึงจะมีกำลังกีดกันเท่ากับใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ และจากการทดสอบการชะละลายของโลหะตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency Extraction Procedure , USEPA- EP) แสดงว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่าในมาตรฐานน้ำดื่มและสามารถสรุปผลการทดลองจากการหา Compressive strength และ Leaching Test แล้วเสนอว่าสามารถใช้ถ้ำลอยเป็น Secondary construction materials ได้

Janusa และคณะ (2000) ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำเป็นก้อนแข็ง ในการทดลองได้นำชานอ้อยปรับสภาพใน 2 สภาวะ คือกรดและเบส จุดประสงค์ของการปรับสภาพชานอ้อยก็คือ เพื่อปล่อยลิกนินออกมาจากเซลลูโลส ได้ทำการต้มใน 0.1 M. HCl และ 0.1M.NaOH ความแตกต่างระหว่างการปรับสภาพด้วยกรดและเบส คือ องค์ประกอบที่เหลือจากการปรับสภาพด้วยเบส จะเหนียว ทำให้ยากต่อการบด ทำการต้มเป็นเวลา 45 นาที 3-4 ครั้ง จนได้น้ำที่ใสแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วทำให้ละเอียดและร่อนคัดขนาดโดยให้มีขนาด 200 ไมครอน จากนั้นใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วจึงใส่ซีเมนต์ลงไป และทำก้อนแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวทำเสถียรตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่ต้องใส่ชานอ้อยเพื่อไว้เปรียบเทียบ ทิ้งไว้ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส เมื่อถึงระยะเวลาบ่มที่กำหนด จึงนำก้อนแข็งมา สกัดสาร และวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด

ในการทดลองได้เปรียบเทียบระหว่างก้อนแข็งที่ใส่ชานอ้อย 5 % โดยน้ำหนักต่อซีเมนต์ กับก้อนแข็งที่ไม่ได้ใส่ชานอ้อยลงไป ผลการทดลองพบว่าก้อนแข็งที่ใส่ชานอ้อยมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดน้อยกว่าในน้ำสกัดของก้อนแข็งที่ไม่ได้ใส่ชานอ้อย ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว 10% (182 ก./ล.) และ 15 % (270 ก./ล.) โดยน้ำหนักต่อซีเมนต์ คือตัวอย่างที่มีตะกั่ว 10% (182 ก./ล.) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่าก้อนแข็งที่ใส่ชานอ้อยมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดน้อยกว่า 0.5 มก./ล. สำหรับทุกๆระยะเวลาบ่ม ส่วนก้อนแข็งที่ไม่ได้ใส่ชานอ้อย มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด 7 มก./ล. ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน 5 มก./ล. ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน และ 4 มก./ล. ที่ระยะเวลาบ่ม 28วัน และสำหรับตัวอย่างที่มีตะกั่ว 15 % (270 ก./ล.) พบว่าก้อนแข็งที่ใส่ชานอ้อย จะมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด 0.9 มก./ล. ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน และน้อยกว่า 0.5 มก./ล. ที่ระยะเวลาบ่ม 28วัน สำหรับก้อนแข็งที่ไม่ได้ใส่ชานอ้อยพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัด 48 และ 60 มก./ล. ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 และ 28วัน ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก และจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับโลหะหนักก่อนการทำให้เป็นก้อนแข็ง จะสามารถกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขาน้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมาก มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาเตรียมเพื่อใช้เป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดโลหะหนักคือ ตะกั่ว โดยงานวิจัยสามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 การทดลองใหญ่ๆ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสถานะของน้ำเสียเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว รวมถึงปริมาณขาน้อยที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนที่สองเป็นการนำขาน้อยที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้วไปทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification) โดยการดำเนินการวิจัยนี้กระทำที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

#### 3.1.1 วัสดุ

- ขาน้อย แสดงดังรูปที่ ค1(ก.) ภาคผนวก ค.
- ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราช้าง (Ordinary Portland Cement, OPC) แสดงดังรูปที่ ค1(ข.) ภาคผนวก ค.
- ทรายละเอียดแสดงดังรูปที่ ค1(ค.) ภาคผนวก ค.
- น้ำประปา

#### 3.1.2 สารเคมี

- สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพขาน้อยได้แก่ HCl
- สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่  $(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)$
- สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชได้แก่ NaOH,  $\text{HNO}_3$
- สารเคมีที่ใช้เป็นฟัฟเฟอร์ได้แก่  $\text{CH}_3\text{COONa}$
- สารเคมีที่ใช้ในการชะละลายได้แก่  $\text{H}_2(\text{SO})_4$ ,  $\text{HNO}_3$
- น้ำกลั่น

### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

#### 3.1.3.1 การเตรียมขานอ้อยใช้เป็นสารดูดซับ

- เครื่องบดละเอียด
- เครื่องแยกขนาดแสดงดังรูปที่ ค2(ก.) ภาคผนวก ค.
- เตอบวัสดุ
- เตาก๊าซ

#### 3.1.3.2 การดูดซับตะกั่วของขานอ้อย

- เครื่องวัดพีเอช ของ Consort model C 830
- เครื่องเขย่า (Shaker) ของ IKA HS 501แสดงดังรูปที่ ค2(ข.) ภาคผนวก ค.
- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียดอ่านค่าละเอียด 0.0001 กรัม ของ Sartorius รุ่น 2462 และของ Metter AC 100
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรมิเตอร์  
(Atomic absorption spectrometerของ Perkin-Elmer model 800)  
แสดงดังรูปที่ ค2(ค.) ภาคผนวก ค.
- ชุดเครื่องกรองสูญญากาศ
- หลอดทดลองผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ ค2(ง.)  
ภาคผนวก ค.
- ขวดยาพลาสติกสำหรับเก็บน้ำเสียขนาด 60 มิลลิลิตร
- กระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

#### 3.1.3.3 การหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง

- เครื่องชั่ง: ขนาด 3,100 กรัม อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม ของ AND model D0003
- แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์: ขนาด 5 เซนติเมตร หรือ 2 นิ้ว  
แสดงดังรูปที่ ค3(ก.) ภาคผนวก ค.
- เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตาและคอนกรีตของ Wykeham Farrance International model WF 61240 แสดงดังรูปที่ ค3(ข.) ภาคผนวก ค.
- แท่งกระทุ้ง (Temper): ขนาดหน้าตัด 0.5 X 0.5 ตารางนิ้ว ยาว 5-6 นิ้ว

- ปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนเมื่อจับ ทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบน ขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100 ถึง 150 มิลลิเมตร
  - เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างของ Top One model TO-150TE แสดงดังรูปที่ ค3(ค.) ภาคผนวก ค.
  - กรวยเหล็กมาตรฐานสำหรับทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ : เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน  $40 \pm 3$  มิลลิเมตร ด้านล่าง  $90 \pm 3$  มิลลิเมตร สูง  $75 \pm 3$  มิลลิเมตร หนาอย่างน้อย 0.8 มิลลิเมตร

#### 3.1.3.4 การทดสอบการชะละลาย

- ตะแกรงร่อนขนาด 9.5 มิลลิเมตร
- เครื่องชั่ง : ขนาด 210 กรัม อ่านค่าละเอียด 0.0001 กรัม
- ขวดพลาสติกมีฝาปิด : ขนาด 2 ลิตรแสดงดังรูปที่ ค4(ก.) ภาคผนวก ค.
- เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ของ G. Ruamkit Panich., LTD.: อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ ค4(ข.) ภาคผนวก ค.
- กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน
- เครื่องวัดพีเอช

## 3.2 การดำเนินการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

### ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการดูดซับ

สำหรับการทดลองในขั้นนี้ได้ทำการทดลองศึกษาการหาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบแบตช์และได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลองดังนี้คือ

การทดลองที่ 1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของชานอ้อยที่ใช้ดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วโดยการให้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับ

การทดลองที่ 3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ



#### การทดลองที่ 4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

**หมายเหตุ :** ทำการเขย่าน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่เติมขาน้อย (Blank) ร่วมด้วยในแต่ละการทดลอง เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียขณะทำการทดลอง

#### ขั้นตอนที่ 2 การทำให้เป็นก้อนแข็ง

สำหรับการทดลองในขั้นนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ขาน้อยปรับสภาพที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้วไปทำให้เป็นก้อนแข็งโดยแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองดังนี้คือ

การทดลองที่ 1 การศึกษาหาอัตราส่วนขาน้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม

การทดลองที่ 2 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่มโดยใช้อัตราส่วนขาน้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลการชะละลาย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละการทดลองขั้นตอนการดูดซับ แสดงในตาราง 3.1-

3.4

#### การทดลองขั้นตอนการดูดซับ

#### ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 1.1

(การทดลองที่ 1.1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของชานอ้อยที่ใช้ดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เวลาในการเขย่า	ทุก 15 นาทีใน 1 ชั่วโมงแรก ทุก 30 จนครบ 2 ชั่วโมง 3 และ 4 ชั่วโมง
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1. ลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้น -ความเข้มข้นของตะกั่ว -พีเอช -ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้	10 มิลลิกรัมต่อลิตร 4 50 มิลลิลิตร
2. ปริมาณชานอ้อยที่ใช้	10 กรัมต่อลิตร
3. ความเร็วในการเขย่า	125 รอบต่อนาที
4. ขนาดของชานอ้อย	200 ไมครอน
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง	- ปริมาณตะกั่วที่เหลือ - พีเอช
2. ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว	- ร้อยละการกำจัด

### ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 1.2

(การทดลองที่ 1.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อกำจัดตะกั่วโดยการใช้นานอ้อยเป็นตัวดูดซับ)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้น - ความเข้มข้นของตะกั่ว - พีเอช	5 10 20 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 2 3 4 5 และ 6
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1. เวลาในการเขย่า 2. ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ 3. ปริมาณนานอ้อยที่ใช้ 4. ความเร็วในการเขย่า 5. ขนาดของนานอ้อย	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 1.1) 50 มิลลิลิตร 10 กรัมต่อลิตร 125 รอบต่อนาที 200 ไมครอน
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว	- ปริมาณตะกั่วที่เหลือ - พีเอช - ร้อยละการกำจัด

### ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 1.3

(การทดลองที่ 1.3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เวลาที่ใช้ในการเขย่า	ทุก 15 นาทีใน 1 ชั่วโมงแรก ทุก 30 จนครบ 2 ชั่วโมง 3 และ 4 ชั่วโมง
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1. ลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้น - ความเข้มข้นของตะกั่ว  - พีเอช - ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ 2. ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ 3. ความเร็วในการเขย่า 4. ขนาดของชานอ้อย	(เลือกค่าที่ให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่ 1.2)  (เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 1.2) 50 มิลลิลิตร 10 กรัมต่อลิตร 125 รอบต่อนาที 200 ไมครอน
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง  2. ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว	- ปริมาณตะกั่วที่เหลือ - พีเอช - ร้อยละการกำจัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 1.4  
(การทดลองที่1.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1.ปริมาณชานอ้อยปรับสภาพที่ใช้	0.2 0.3 0.5 1 5 10 15 และ 20 กรัมต่อลิตร
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1.ลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้น - ความเข้มข้นของตะกั่ว  - พีเอช 2.เวลาที่ใช้ในการเขย่า 3.ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ 4.ความเร็วในการเขย่า 5. ขนาดของชานอ้อย	(เลือกค่าที่ให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลองที่1.2)  (เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่1.2) (เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่1.3) 50 มิลลิลิตร 125 รอบต่อนาที 200 ไมครอน
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1.ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง  2. ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว	- ปริมาณตะกั่วที่เหลือ - พีเอช - ร้อยละการกำจัด

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆในแต่ละการทดลองขั้นตอนที่ 2 แสดงในตาราง 3.5 – 3.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การทดลองขั้นตอนการทำให้เป็นก้อนแข็ง

#### ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1

(การทดลองที่ 2.1 การศึกษาหาอัตราส่วนชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับตะกั่วต่อซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ชานอ้อยต่อซีเมนต์	0% 5% 10% และ 15%
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.45 0.5 0.55 และ 0.6
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
ระยะเวลาบ่ม	7 วัน
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ค่ากำลังรับแรงอัด	
2. ค่าการชะละลาย	

#### ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.2

(การทดลองที่ 2.2 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาในการบ่มโดยใช้อัตราส่วนผสมของชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับตะกั่วต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม)

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ระยะเวลาบ่ม	7 14 และ 28 วัน
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1. ชานอ้อยต่อซีเมนต์	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2.1)
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2.1)
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ค่ากำลังรับแรงอัด	
2. ค่าการชะละลาย	

### ตารางที่ 3.7 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2.3

(การทดลองที่ 2.3 การศึกษาวิธีการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 )

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่</b>	
1. ชานอ้อยต่อซีเมนต์	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2.1)
2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2.1)
3. ระยะเวลาบ่ม	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2.2)
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ค่ากำลังรับแรงอัด	
2. ค่าการชะละลาย	

### 3.2.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.2.1 การปรับสภาพชานอ้อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Janusa, 2000)

- นำชานอ้อยต้มใน 0.1 M.HCl เป็นเวลา 45 นาที
- ทำซ้ำประมาณ 3 ครั้ง
- ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
- นำไปอบในเตาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- นำชานอ้อยที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด
- คัดขนาดของชานอ้อยโดยให้มีขนาด 200 ไมครอน

### 3.2.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ, 2544)

ในกรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว เริ่มจากการเตรียมตะกั่วเข้มข้นจากการชั่งเลด(II) ไนเตรต ( $Pb(NO_3)_2$ ) ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 331.20 ปริมาณ 1.5999 กรัมผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายตะกั่วเข้มข้นโดยในสารละลายตะกั่ว 1 มิลลิลิตรจะมีตะกั่วเท่ากับ 1 มิลลิกรัม สำหรับเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นตามต้องการต่อไป

### 3.2.2.3 ขั้นตอนการดูดซับ

**การทดลองที่1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของชานอ้อยที่ใช้ดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์**

ทำการทดลองโดยชั่งชานอ้อยปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่พีเอชเท่ากับ 4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในหลอดพลาสติกสำหรับเขย่า นำไปเขย่าที่เครื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างโดย ชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 15 นาที หลังจาก 1 ชั่วโมง จะเก็บตัวอย่างทุกครึ่งชั่วโมงจนครบ 2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน

**การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วของชานอ้อย**

ทำการทดลองโดยชั่งชานอ้อยปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 5 10 20 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 3 4 5 และ 6 จากนั้นนำไปเขย่าที่เครื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าพีเอช และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน



### การทดลองที่3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

ทำการทดลองโดยชั่งชานอ้อยปริมาณ10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ ตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรในหลอดพลาสติกสำหรับเขย่านำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างโดย ชั่วโมงแรกเก็บตัวอย่างทุก 15 นาที หลังจาก 1 ชั่วโมง จะเก็บตัวอย่างทุก ครึ่งชั่วโมงจนครบ 2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างที่ 3 และ4ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างไป กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์ปชัน

### การทดลองที่4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

ทำการทดลองโดยชั่งชานอ้อยปริมาณ 0.2 0.3 0.5 1 5 10 15 และ 20 กรัมต่อลิตรน้ำ ตัวอย่างและเติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่2และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัด สูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีตามเวลาที่ เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 เมื่อครบตามเวลา นำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน

**หมายเหตุ :** ทำการเขย่าน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่เติมชานอ้อย (Blank) ร่วมด้วยในแต่ละการทดลอง เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียขณะทำการทดลอง

#### 3.2.2.4 ขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง

**การทดลองที่1 การศึกษาหาอัตราส่วนชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม โดยทุกส่วนผสมจะใช้เวลาบ่ม 7 วัน**

ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ จากขั้นตอนที่1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ปริมาณร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.5 0.55 และ 0.6 หลังจากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการชะละลาย

**การทดลองที่ 2 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่ม โดยใช้อัตราผสมของซันอ้อย ที่ถูกใช้ในการดูดซับตะกั่วต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมจากทดลองที่ 1**

ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนซันอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และแปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 3 7 14 และ 28 วันหลังจากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการชะละลาย

### **การทดลองที่ 3 การศึกษาวิธีการชะละลาย**

ทำการทดสอบการชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

3.2.2.4.1 บดลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่ผสมแล้วแยกแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

3.2.2.4.2 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.2.2.4.1หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดหรือค่าพีเอช (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม)

ของตัวอย่าง

3.2.2.4.3 เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3.2.2.4.4 กรองสารละลายจากการสกัด ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

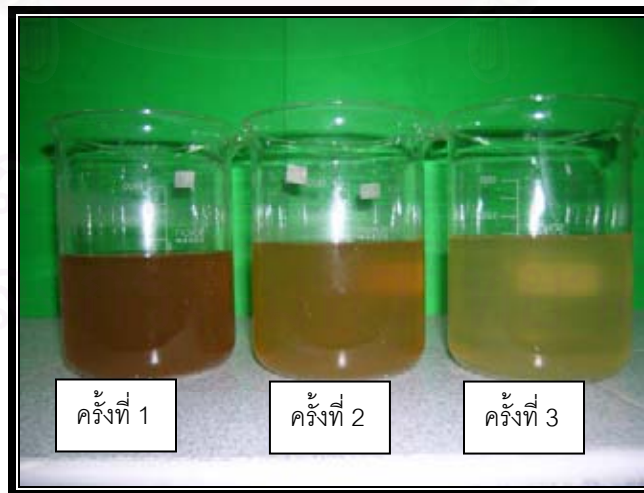
3.2.2.4.5 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 โดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การปรับสภาพขานอ้อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

การวิจัยนี้ได้ทำการปรับสภาพขานอ้อยในสภาวะเป็นกรดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ดังกล่าว รายละเอียดแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจุดประสงค์ของการปรับสภาพขานอ้อยในครั้งนี้เพื่อกำจัดน้ำตาลที่อยู่ในขานอ้อย เนื่องจากน้ำตาลมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาในการก่อตัว กล่าวคือ ในขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง ถ้ามีน้ำตาลละลายปนอยู่ประมาณ 0.03-0.15% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะทำให้การก่อตัวช้าลง แต่กำลังของคอนกรีตอาจจะไม่ลดลง และถ้าหากมีปนอยู่มากกว่า 0.25% โดยน้ำหนักต่อปูนซีเมนต์ กำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วันจะลดลง (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) เมื่อสังเกตสีของสารละลายที่ผ่านการต้มขานอ้อยพบว่าจะมีสีจางลงเรื่อยๆเมื่อผ่านการต้มจำนวนครั้งมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจุดประสงค์อีกประการของการปรับสภาพขานอ้อยก็เพื่อทำลายเซลล์โลสมากที่สุดที่จะทำให้ทำได้ออกมาเพื่อปล่อยลิกนินออกจากโครงสร้างของเซลล์โลส เพราะโมเลกุลขนาดใหญ่ของลิกนินสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ทำให้เกิดเสถียรและช่วยลดการชะละลายในขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง (Janusa, 2000)

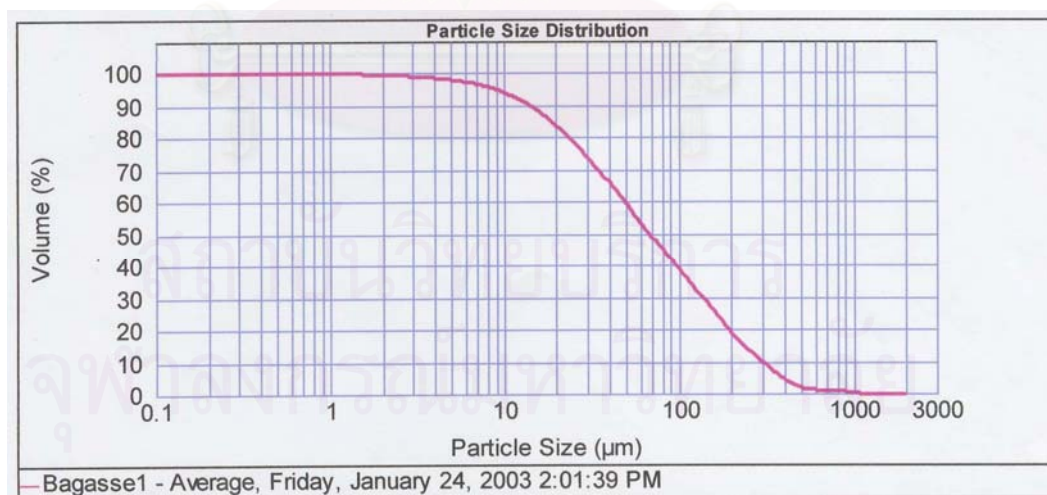


รูปที่ 4.1 สีของน้ำที่ผ่านการต้มอ้อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

## 4.2 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

### 4.2.1 ขนาดของชานอ้อย

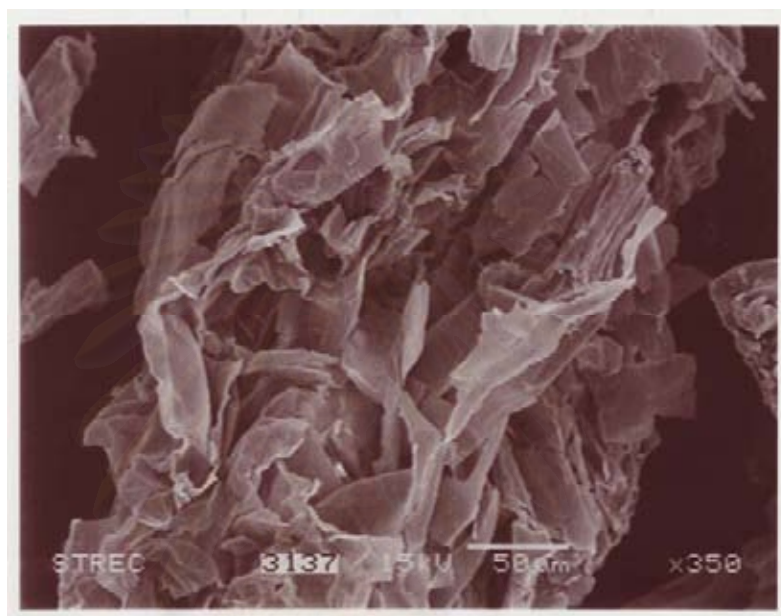
เมื่อนำชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 200 ไมครอนมาหาขนาดการกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนตามที่ต้องการนั่นคืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนมีจำนวนมากกว่า 80% งานวิจัยนี้เลือกใช้ชานอ้อยปรับสภาพที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 200 ไมครอน เนื่องจากงานวิจัยของ Gupta และ Ali (2000) พบว่าเมื่อขนาดของตัวดูดซับเล็กลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่ง Gupta และ Ali ทดลองใช้ตัวดูดซับ 3 ขนาด คือ 100-150 ไมครอน 200-250 ไมครอน และ 300-350 ไมครอน จากการทดลองพบว่า ขนาดของตัวดูดซับที่ดีที่สุดคือ ขนาดของตัวดูดซับที่เล็กที่สุด (100-150 ไมครอน) ส่วนตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ (300-350 ไมครอน) ประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำมาก เป็นเพราะเมื่ออนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี แต่การที่จะทำให้ขนาดของตัวดูดซับยิ่งเล็กลงเท่าไรก็เป็นการเปลืองค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวดูดซับมากขึ้น ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมของตัวดูดซับคือ 200-250 ไมครอน



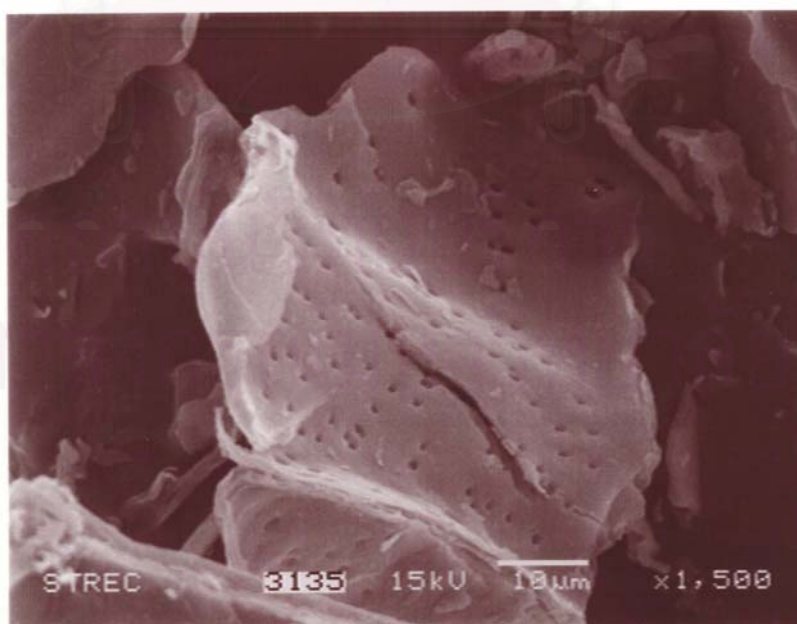
รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคชานอ้อย

#### 4.2.2 ลักษณะรูปร่างของชานอ้อย

จากการศึกษารูปร่างของชานอ้อยโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงว่ามีลักษณะอนุภาคเป็นชั้นเหลื่อม มีรูเล็กๆและโพรงที่ผิวอนุภาคเป็นจำนวนมาก ซึ่งค่าพื้นที่ผิวของชานอ้อยมีค่าเท่ากับ  $419.5 \text{ m}^2/\text{g}$ . (Rao และคณะ, 2002)



รูปที่ 4.3 ชานอ้อยที่กำลังขยาย 350 เท่า



รูปที่ 4.4 ชานอ้อยที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

### 4.2.3 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุวิเคราะห์จากการคำนวณมวลต่อปริมาตร มวลได้จากการชั่งน้ำหนักและปริมาตรหาโดยการแทนที่น้ำ โดยค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และความพรุนของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชานอ้อยปรับสภาพ และทราย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ชานอ้อยปรับสภาพมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชานอ้อยปรับสภาพและทราย

ชนิดของวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
ชานอ้อยปรับสภาพ	0.34
ทราย	2.65

จากการทดลองหาค่าการดูดซึมน้ำของชานอ้อยปรับสภาพ โดยได้ดำเนินการทดลองตามภาคผนวก ง.1 พบว่า ชานอ้อยปรับสภาพมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 353 %

### 4.2.4 องค์ประกอบทางเคมี

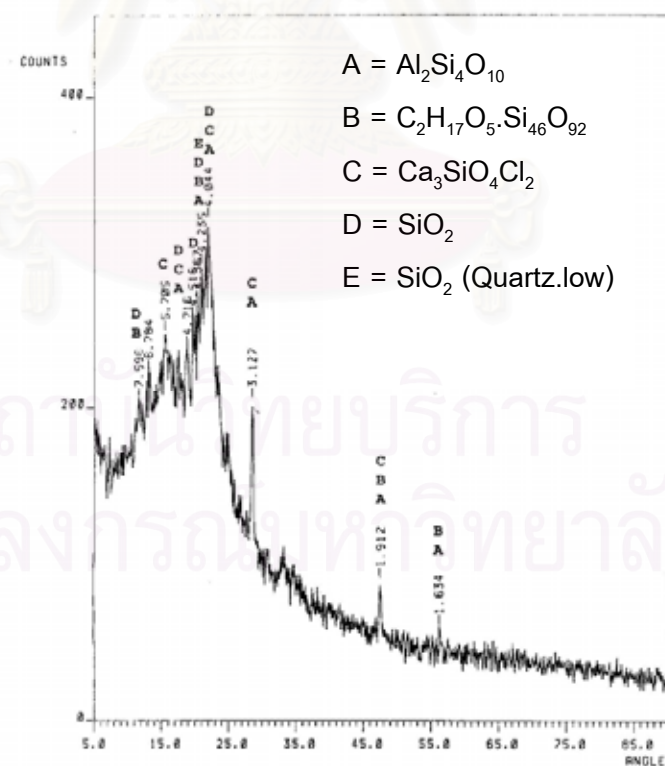
องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของชานอ้อย จะประกอบด้วย Cellulose 70%, lignin 20%, organic matter (น้ำตาล, pentosan, peptose, protein และอื่นๆ) 10% ที่เหลือจะเป็น Metal ions (Na, K, Fe, Al และอื่นๆ) 1% และจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีที่เป็น Metal ions ของชานอ้อยปรับสภาพในรูปออกไซด์โดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy ได้ผลดังแสดงในตารางที่

4.2

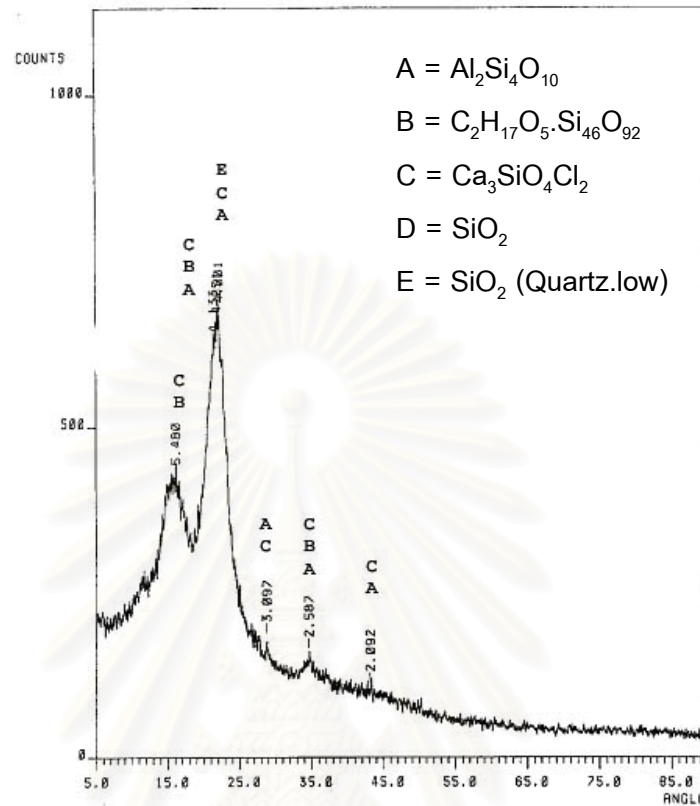
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของชานอ้อยในรูปออกไซด์

ส่วนประกอบของชานอ้อย	ร้อยละ
1. $\text{Al}_2\text{O}_3$	0.083
2. $\text{SiO}_2$	1.358
3. $\text{P}_2\text{O}_5$	0.07
4. $\text{SO}_3$	0.169
5. Cl	0.853
6. $\text{K}_2\text{O}$	0.108
7. CaO	0.194

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของชานอ้อยก่อนปรับสภาพ และชานอ้อยปรับสภาพโดย X-Ray Diffraction (XRD) จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าส่วนประกอบหลักของชานอ้อยก่อนปรับสภาพ และชานอ้อยปรับสภาพนั้นอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous หรือในรูปแก้ว)



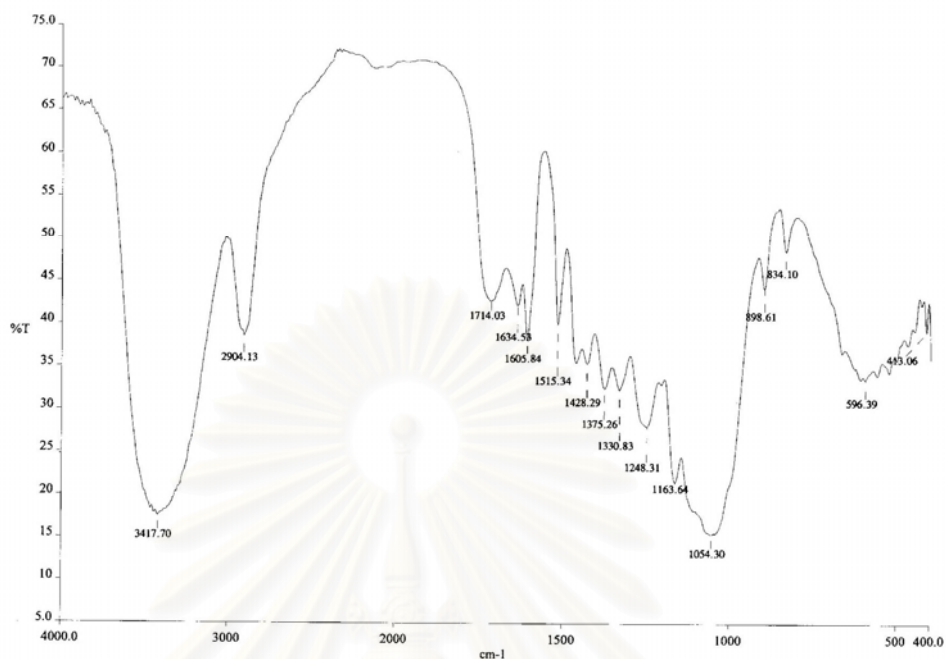
รูปที่ 4.5 ผล XRD ของชานอ้อยก่อนปรับสภาพ



รูปที่ 4.6 ผล XRD ของชานอ้อยปรับสภาพ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของชานอ้อยด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometry) พบว่าองค์ประกอบของชานอ้อยก่อนปรับสภาพ และชานอ้อยปรับสภาพสามารถเป็นสารประกอบได้หลายตัว เช่น  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_{17}\text{O}_5 \cdot \text{Si}_{46}\text{O}_{92}$ ,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_4\text{Cl}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 จึงทำให้ยากในการแปลค่า แต่ สารประกอบที่อยู่ในชานอ้อยก่อนปรับสภาพ และชานอ้อยปรับสภาพจะเป็นสารประกอบชนิดเดียวกัน แต่เมื่อดูจาก peak ของสารประกอบที่อยู่ในชานอ้อยก่อนปรับสภาพจะเห็นเด่นชัดกว่าชานอ้อยปรับสภาพ จึงอาจจะเป็นไปได้ว่า เมื่อมีการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของธาตุที่อยู่ในชานอ้อยได้





รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์โครงสร้างของชานอ้อยปรับสภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR)

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างของชานอ้อยปรับสภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์สารโดยใช้แสงอินฟราเรด (FTIR) พบว่าหน่วยโครงสร้างที่อาจจะเป็นไปได้ของชานอ้อยปรับสภาพคือ

- Alkyl Group -General
- Alkyl Group – Hydroxy or Possibly Amino Substituent
- Hydroxy or Amino Compound – General
- Aliphatic Alcohol – Primary or Secondary or Possibly Cyclic Hydroxy
- Carbonyl Compound

#### 4.3 ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่ว

การศึกษาเรื่องการดูดซับตะกั่วแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือการศึกษาผลของเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีต่อ

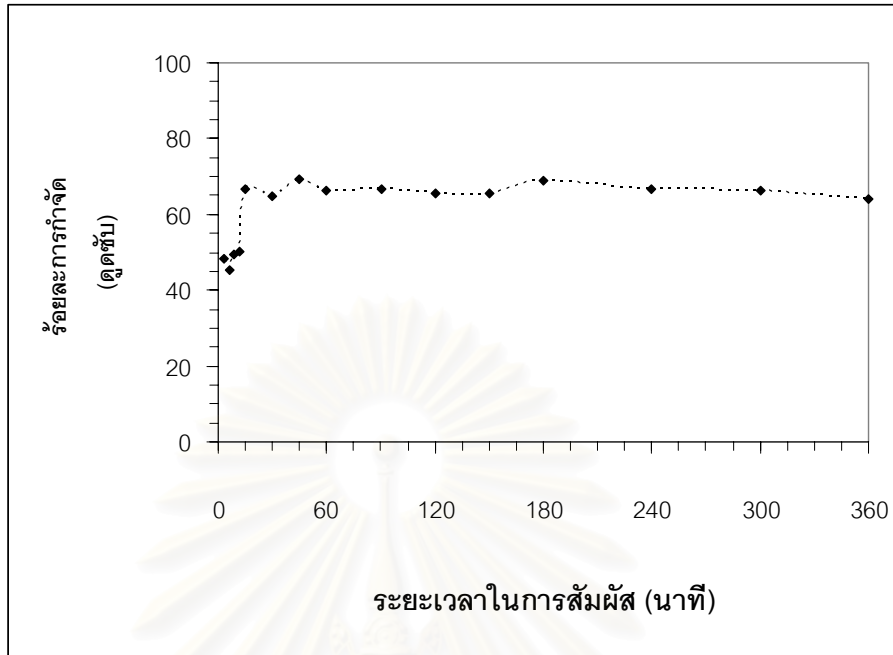
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วรวมถึงเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซโทมการดูดซับ และไอโซโทมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของชานอ้อยที่ใช้ดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์

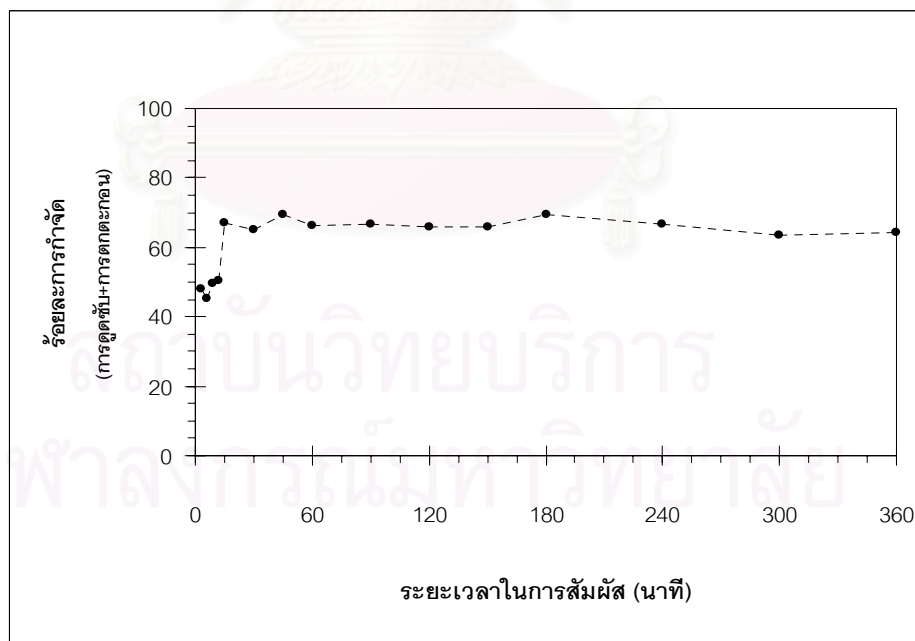
การทดลองนี้จะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ในการทดสอบการดูดซับนี้ใช้ชานอ้อยปรับสภาพเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการทดลองพิจารณาทั้งการกำจัดตะกั่วโดยการดูดซับและการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ และแสดงข้อมูลดิบของการทดลองนี้ในภาคผนวกตารางที่ ก.1 จากการศึกษาพบว่าการตกตะกอนเกิดขึ้นน้อยมาก ณ สภาวะที่ทำการทดลองดังกล่าวอัตราการกำจัดโดยการดูดซับและการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนจึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จากรูปจะเห็นได้ว่า การกำจัดตะกั่วจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ระยะเวลาในการเขย่า 15 นาทีสามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0 เปอร์เซ็นต์เป็น 66.81 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดซับและจาก 0 เปอร์เซ็นต์เป็น 67.08 เปอร์เซ็นต์สำหรับการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับ และหลังจาก 15 นาที การกำจัดตะกั่วจะเริ่มคงที่จนถึงสิ้นสุดระยะเวลาในการเขย่าซึ่งเท่ากับ 360 นาที จึงกล่าวได้ว่าเวลาสัมผัสที่ 15 นาทีคือเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วซึ่งเป็น ระยะเวลาที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ประมาณ 66 เปอร์เซ็นต์จากปริมาณเริ่มต้นทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสัมผัสกับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดยการดูดซับ ด้วยชานอ้อยปรับสภาพ ปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4

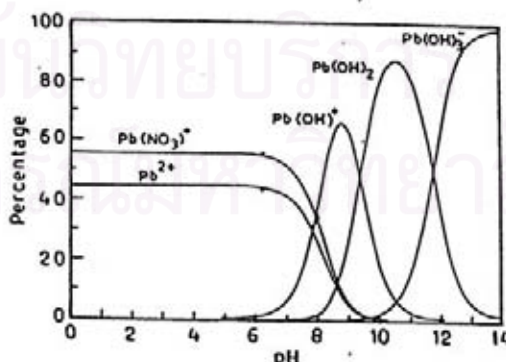
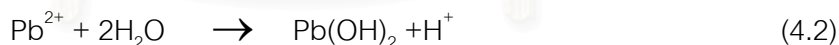
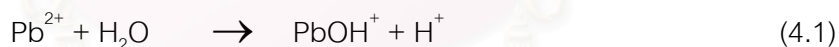


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสัมผัสกับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดยการดูดซับ ร่วมกับการตกตะกอน ด้วยชานอ้อยปรับสภาพ ปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4

#### 4.3.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อค่าร้อยละการกำจัดตะกั่วโดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพเป็นตัวดูดซับ

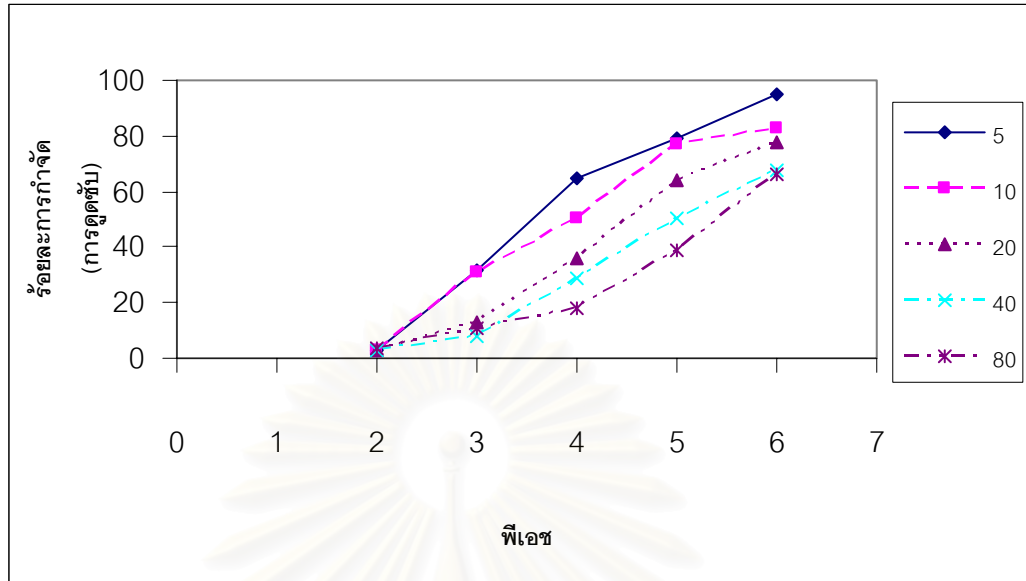
จากการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 510 20 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ถึง 6 ในการทดลองเรื่องการดูดซับจะใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยทำการเขย่าเป็นระยะเวลา 15 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 4.12 4.13 4.14 และ 4.15 และในภาคผนวกตารางที่ ก.2

ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งจากการดูดซับเพียงอย่างเดียวและจากการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนมีค่าร้อยละการกำจัดที่ใกล้เคียงกันมากในช่วงพีเอชที่ทำการทดลอง (พีเอช 2-6) โดยจากการทดลองทำให้ได้ทำการเขย่าน้ำเสียโดยไม่เติมชานอ้อยลงไป เพื่อศึกษาว่าเกิดการตกตะกอนของตะกั่วปริมาณเท่าใด และเนื่องจากช่วงพีเอชดังกล่าวไม่มีการตกตะกอนของตะกั่วโดยพิจารณาจากกราฟการละลายน้ำของตะกั่วดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากกราฟพบว่าตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนในรูป  $Pb(OH)_{2(s)}$  ในช่วงพีเอช 8 ถึง 14 และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการการละลายน้ำ (Hydrolysis) ของตะกั่ว ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2) พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ปริมาณตะกั่วอิสระ ( $Pb^{2+}$ ) จะลดลง โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ( $Pb(OH)^+$ ) แทน และเมื่อพีเอชมากกว่า 8.5 ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ( $Pb(OH)^+$ ) จะลดลงและเกิดตะกอน  $Pb(OH)_2$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยสาเหตุนี้เองที่พีเอชสูงๆ จะสามารถกำจัดตะกั่วได้ดี อาจกล่าวได้ว่าในช่วงพีเอช 2-6 ที่ทำการศึกษาคั้งนี้เกิดการดูดซับเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอาจมีการตกตะกอนร่วมด้วยแต่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการดูดซับ

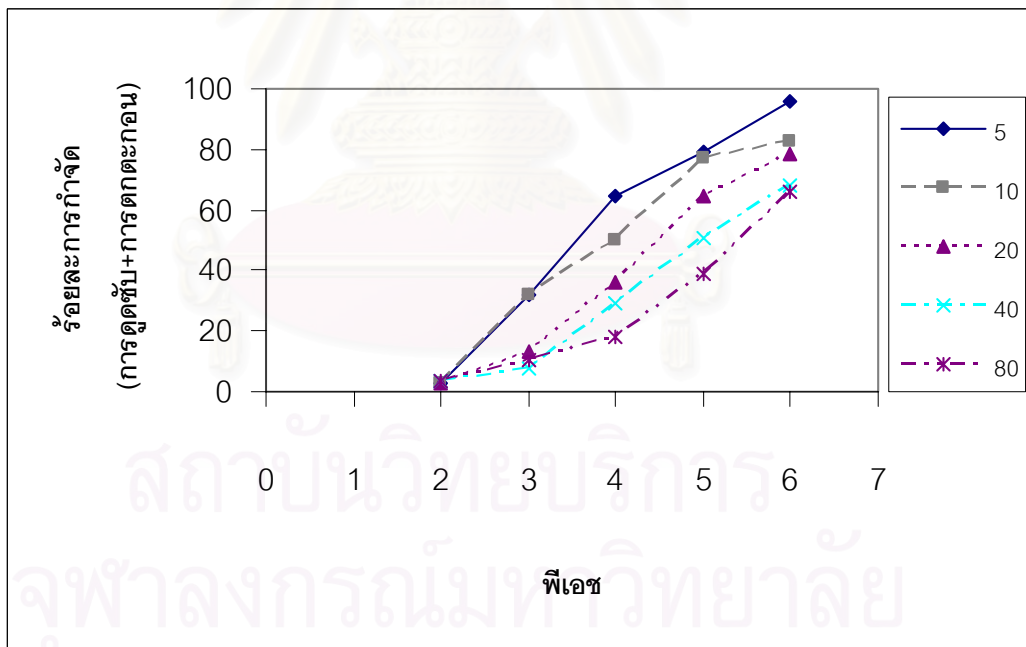


รูปที่ 4.10 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของตะกั่วที่พีเอชต่างๆ

(ที่มา: จันทรนา สงวนรุ่งวงศ์, 2539)



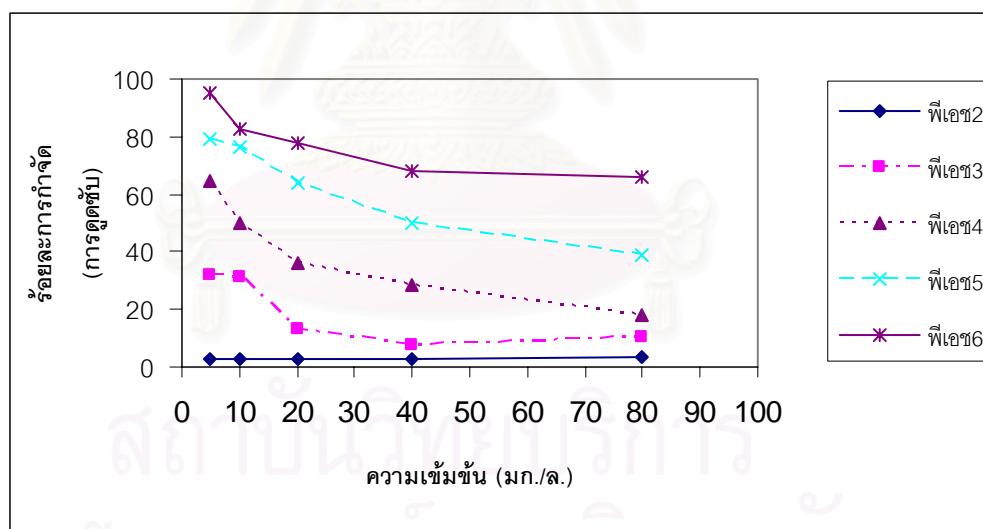
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดยการดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างกับพีเอสที่ความเข้มข้นต่างๆ



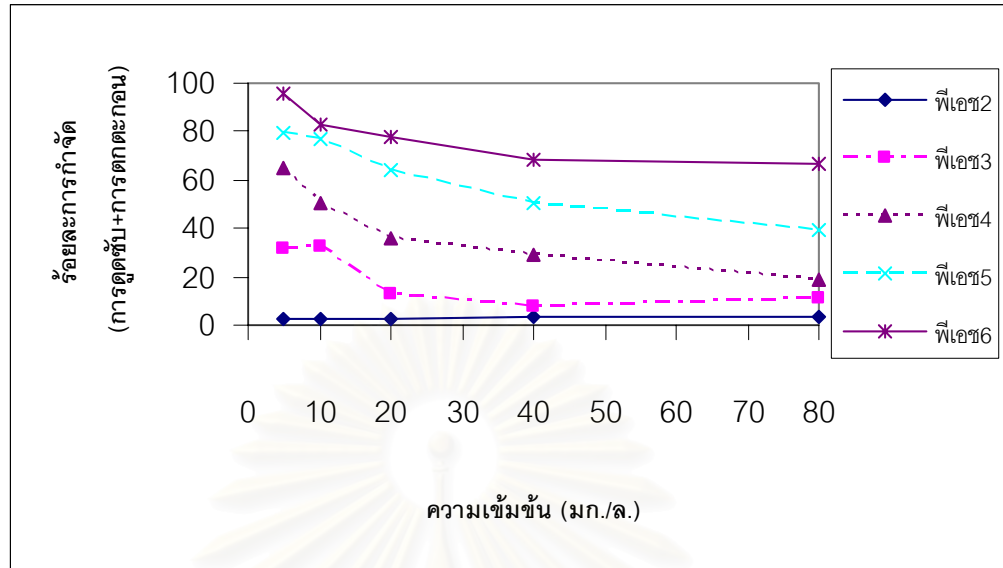
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดยการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างกับพีเอสที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า สำหรับที่ความเข้มข้น 5 10 20 40 และ 80 มก./ล. ที่พีเอส 2 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ คือสามารถกำจัดได้ร้อยละ 2.65 2.74 2.66 2.92 และ 3.35 ตามลำดับ

สำหรับการดูดซับเพียงอย่างเดียวและมีร้อยละการกำจัดเป็น 2.76 2.82 2.78 3.12 และ 3.61 ตามลำดับ สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ซึ่งพบว่าในการกำจัดตะกั่วด้วยกระบวนการดูดซับ และกระบวนการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกันมาก และประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นที่พีเอชเริ่มต้น 3 ถึง 6 โดยที่ความเข้มข้น 5 มก./ล. ร้อยละการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจาก 31.70 ถึง 95.18 สำหรับการดูดซับ และ ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 31.82 ถึง 95.63 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ร้อยละการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อพีเอชที่สูงขึ้น กล่าวคือ ร้อยละการกำจัดจะเพิ่มจาก 31.98 เป็น 82.52 สำหรับการดูดซับ และ 32.12 เป็น 82.98 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 20 มก./ล. ร้อยละการกำจัดจะเพิ่มจาก 12.89 เป็น 77.71 สำหรับการดูดซับ และ 13.02 เป็น 78.20 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 40 มก./ล. ร้อยละการกำจัดจะเพิ่มจาก 7.74 เป็น 67.77 สำหรับการดูดซับ และ 7.97 เป็น 68.29 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 80 มก./ล. ร้อยละการกำจัดเพิ่มจาก 10.48 เป็น 58.30 สำหรับการดูดซับ และ 10.74 เป็น 66.30 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน

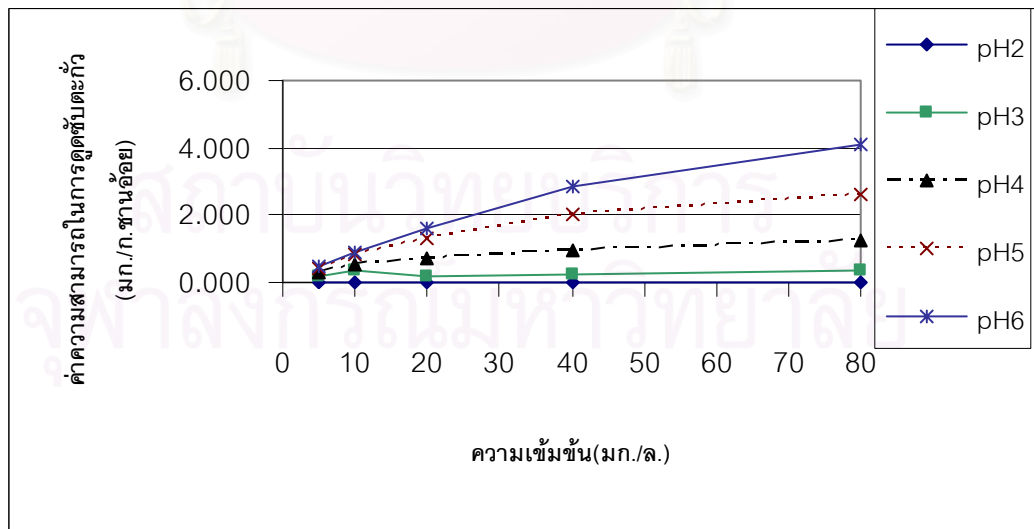


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดยการดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10ก./ล. น้ำตัวอย่างกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่พีเอชต่างๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยโดยการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10ก./ล. น้ำตัวอย่างกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่พีเอชต่างๆ

การที่ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น อาจเกิดเนื่องจากมีการแก่งแย่งไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ในการดูดซับตะกั่วคือ เมื่อพีเอชต่ำหรือมีความเป็นกรดสูง แสดงว่าในสารละลายมีไฮโดรเจนไอออนสูง ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะแย่งกันดูดซับบนผิวของชานอ้อยกับตะกั่วและปริมาณไฮโดรเจนไอออนจะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น ทำให้การแก่งแย่งเพื่อการดูดซับลดลง (Rao และคณะ, 2002)



รูปที่ 4.15 ค่าความสามารถในการดูดซับด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเทียบกับปริมาณชานอ้อยที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ที่ค่าความเข้มข้นของตะกั่วสูง ค่าความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นด้วย โดยที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 80 มก./ล. พีเอช 6 จะมีค่าความสามารถในการดูดซับมากที่สุดคือ 4.700 มก./ก.ชานอ้อย และจะลดลงตามความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นน้อยลง คือที่ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 40 มก./ล ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 2.787 มก./ก.ชานอ้อย ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 20 มก./ล. ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 1.594 มก./ก.ชานอ้อย ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 0.876 มก./ก.ชานอ้อย และ ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 5 มก./ล. ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.468 มก./ก. ชานอ้อย

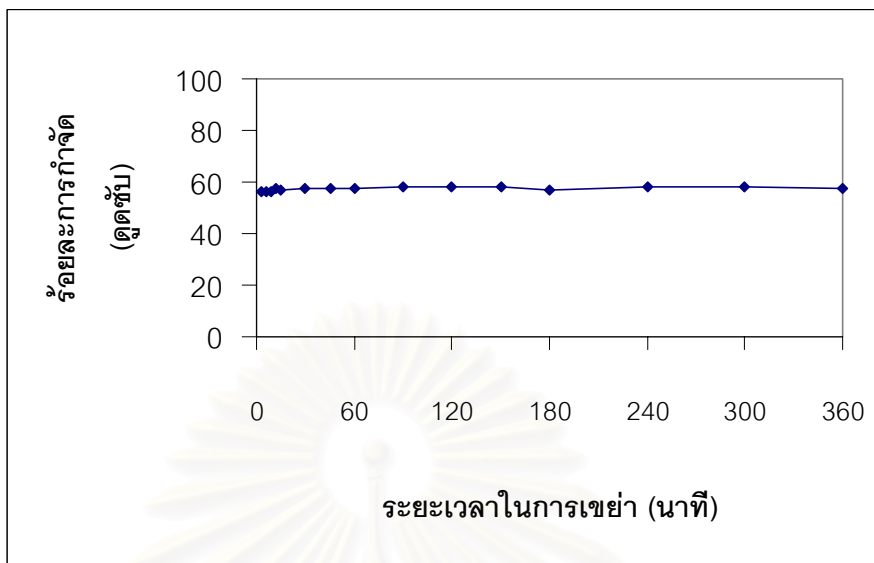
จากการทดลองพบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 6 จะให้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยสูงที่สุด คิดเป็น 4.700 มก./ก.ชานอ้อย ซึ่งจะเลือกค่านี้สำหรับการทดสอบศึกษาสมการการดูดซับในส่วนต่อไป

#### 4.3.3 ผลการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

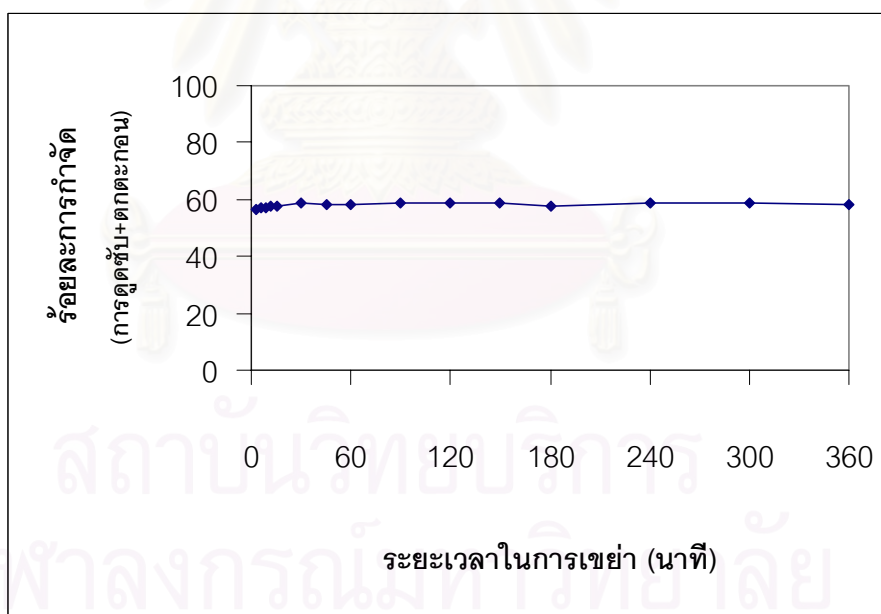
วัตถุประสงค์ในการทดลองขั้นตอนนี้คือหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับโดยเลือกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและค่าพีเอชเริ่มต้นที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลองที่ 4.3.2 กล่าวคือ ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 และปริมาณชานอ้อยปรับสภาพเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตรน้ำ ตัวอย่างโดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ และวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 และในภาคผนวกตารางที่ ก3 พบว่าการกำจัดตะกั่วจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากและเกือบจะคงที่ที่เวลาในการสัมผัสเท่ากับ 3 นาที โดยได้ค่าร้อยละการกำจัดเท่ากับ 56.07 สำหรับการดูดซับและ 56.72 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน จึงกล่าวได้ว่าเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วที่สภาวะดังกล่าวก็คือ 3 นาที





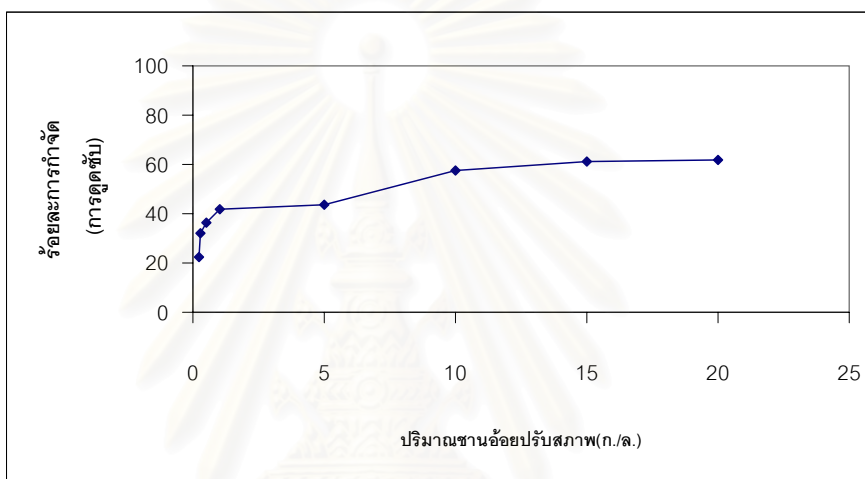
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดยการดูตัดด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอช 6



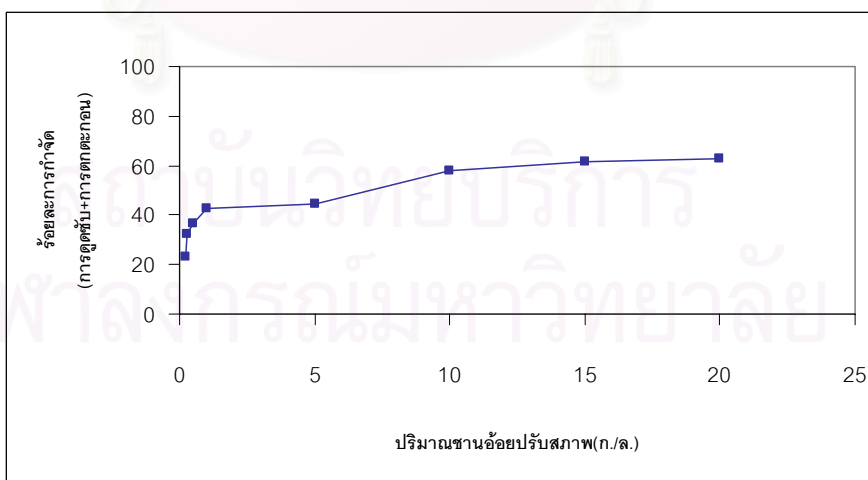
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วโดยการดูตัดรวมทั้งการตกตะกอนด้วยชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่างโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอช 6

#### 4.3.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองนี้ใช้สภาวะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่สุดจากการทดลองที่ 4.3.2 คือน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าปริมาณตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 เพื่อทดสอบการดูดซับตะกั่วด้วยชานอ้อยโดยปรับสภาพแปรเปลี่ยนปริมาณชานอ้อยปรับสภาพในช่วง 0.2 0.3 0.5 1 5 10 15 และ 20 กรัมต่อลิตรน้ำเสียตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 3 นาทีซึ่งเป็นระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลแล้วแน่นอน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 4.19 ตารางที่ 4.3 และในภาคผนวก ตารางที่ ก.4



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยปรับสภาพโดยการดูดซับกับปริมาณชานอ้อยปรับสภาพจำนวนต่างๆในน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 มก./ล.ที่พีเอช 6



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของชานอ้อยปรับสภาพโดยการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนกับปริมาณชานอ้อยปรับสภาพจำนวนต่างๆในน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 มก./ล.ที่พีเอช 6

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ด้วย  
 ฐาน้อยปริมาณต่างๆ

ปริมาณฐาน้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำตัวอย่าง)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกกำจัด	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.ฐาน้อย)
0.2	18.243	89.538
0.3	25.789	84.248
0.5	29.220	57.409
1	33.765	33.250
5	35.034	6.904
10	45.887	4.537
15	38.241	3.227
20	37.266	2.459

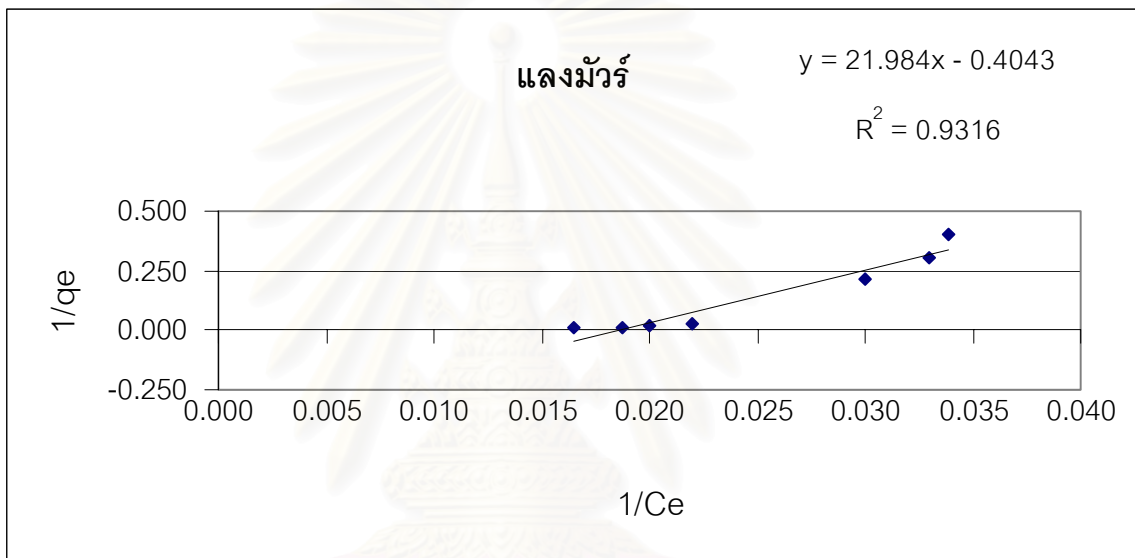
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณฐาน้อย ร้อยละการกำจัดตะกั่วจะมากขึ้น โดยที่ใช้ปริมาณฐาน้อย 20 กรัมต่อลิตรน้ำเสียตัวอย่างจะสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 62.08 สำหรับการดูดซับอย่างเดียวและร้อยละ 62.73 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน และร้อยละการกำจัดตะกั่วจะน้อยที่สุดเมื่อใช้ฐาน้อยปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตรน้ำเสียตัวอย่างคือสามารถกำจัดได้ร้อยละ 22.61 สำหรับการดูดซับอย่างเดียวและร้อยละ 23.26 สำหรับการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะขึ้นกับขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับและ ปริมาณของตัวดูดซับ เมื่อขนาดของอนุภาคเท่ากัน ปริมาณฐาน้อยที่มากกว่าจะสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่าฐาน้อยปริมาณน้อย

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.3 ปริมาณฐาน้อยที่ใช้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วลดลง และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองดังกล่าวมาพล็อตกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิชมีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าเป็น 0.932 และ 0.980 ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การดูดซับตะกั่วของฐาน้อยปรับสภาพสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมทั้งสองแบบ

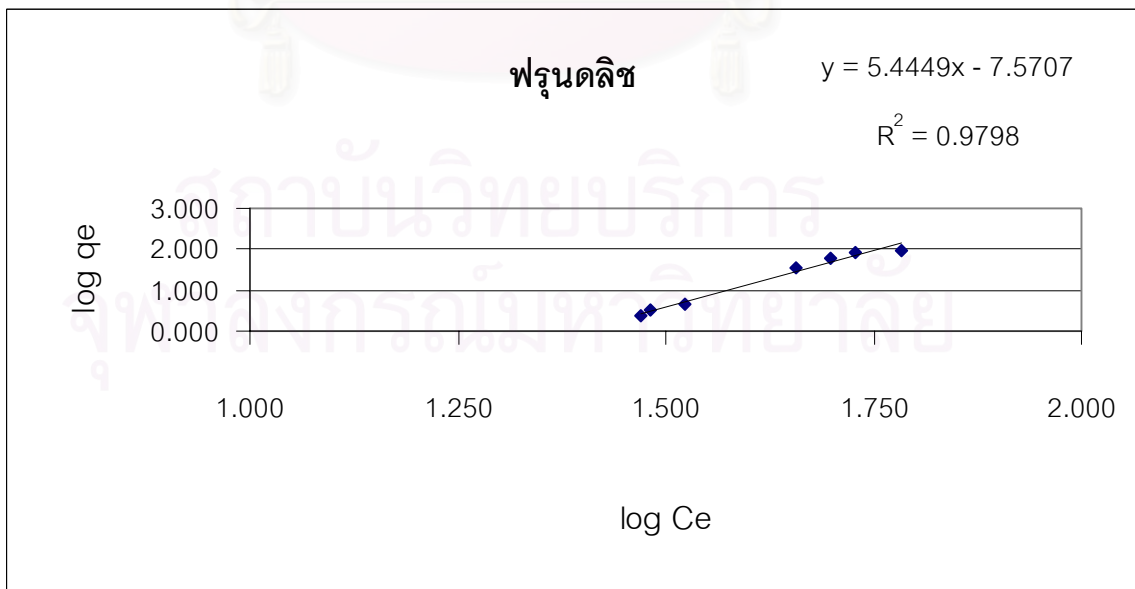
โดยสมการไอโซเทอมกำจัดตะกั่วแบบฟรอนดลิชโดยทั่วไปคือ  $q_e = KC^{1/n}$  สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการริ่ม ได้ดังสมการ 4.3 ดังนั้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของชานอ้อยแบบฟรอนดลิชสามารถเขียนได้ดังสมการ 4.4

$$\text{Log } q_e = \log K + (1/n) \log C \quad (4.3)$$

$$\text{Log } q_e = 5.445 \log C - 7.571 \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์



รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิช

จากสมการที่ 4.3 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_c$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 5.4449 และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $-7.571$  นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{Log } K &= -7.571 \\ 1/n &= 5.445 \\ n &= 0.184 \end{aligned}$$

จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่  $1/n$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  เกือบเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี นอกจากนี้ค่า  $n$  ยังใช้บอกความสามารถในการดูดซับและความจุของตัวดูดซับ กล่าวคือ  $n$  มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี  $n$  อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่า การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า  $n$  ดังกล่าว อาจกล่าวได้ว่าชานอ้อยปรับสภาพยังไม่ใช่ตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลการศึกษาขั้นตอนการทำให้เป็นก้อนแข็ง

แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

##### 4.4.1 ผลการศึกษาหาอัตราส่วนชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ศึกษาจากกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อมอร์ต้า ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากที่สุดคือ ใช้ชานอ้อยดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 80 มก./ล. และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง โดยใช้ชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแทนที่ปริมาณร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมชานอ้อยปรับสภาพ เท่ากับ 0.45 0.5 0.55 และ 0.6 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน

กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมชานอ้อย แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่

4.22 และ 4.23

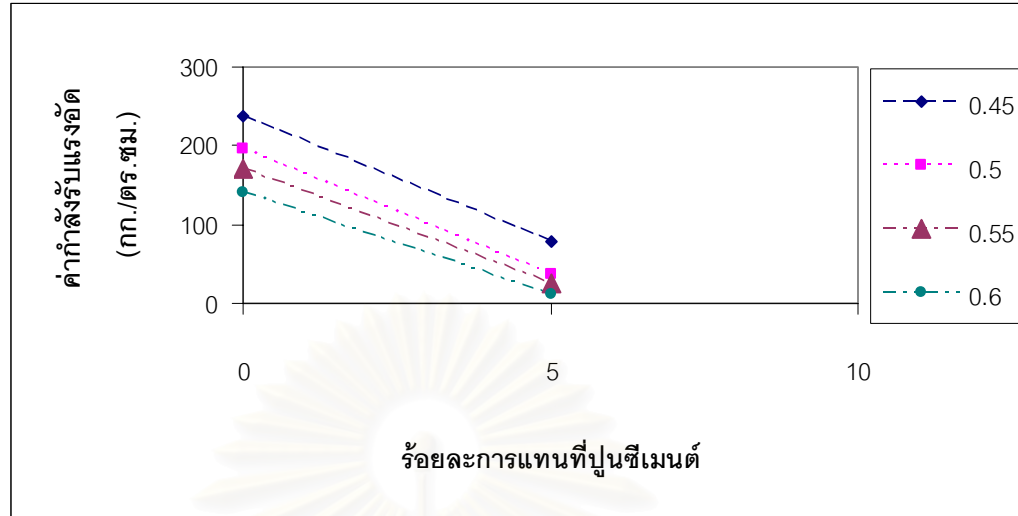
ตารางที่ 4.4 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมชานอ้อยปรับสภาพเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์(%)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)			
	w/c=0.45	w/c=0.5	w/c=0.55	w/c=0.6
0%	100	100	100	100
5%	32.48	18.75	14.28	8.69
10%	*	*	*	*
15%	**	**	**	**

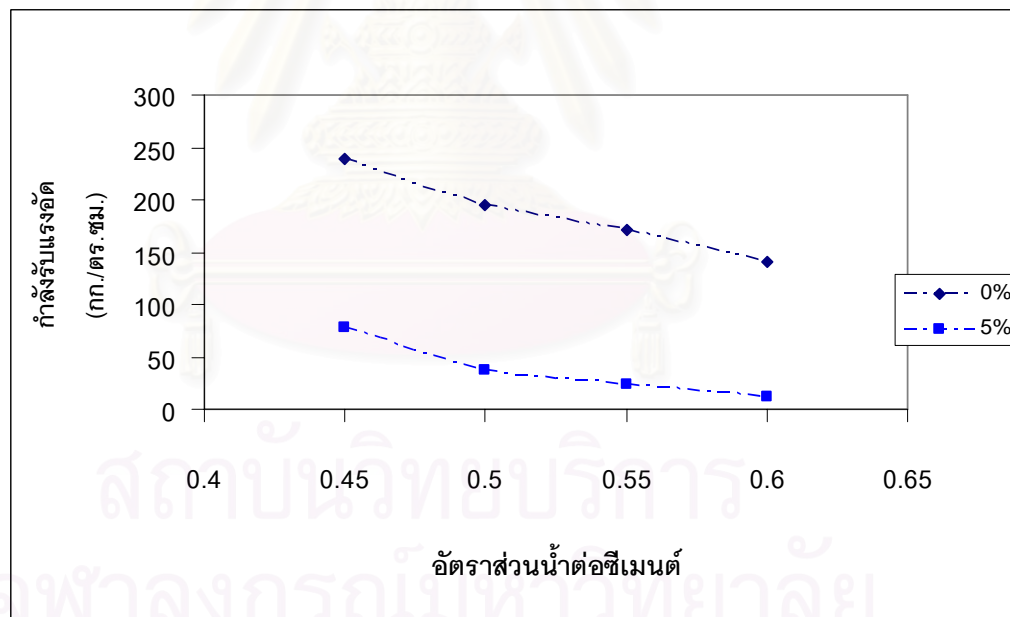
หมายเหตุ

\* น้อยมาก

\*\* ไม่สามารถขึ้นรูปได้



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าที่อายุการบ่มเท่ากันก้อนมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยขานอ้อยปรับสภาพ 5% มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยขานอ้อยทุกค่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำการศึกษา ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขานอ้อย เท่ากับ 0.45 0.5 0.55 และ 0.6 ที่อายุการบ่ม 7 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 77 37 24 และ 12 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ และมีค่ากำลังรับแรงอัดเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา คิดเป็นร้อยละ 32.48 18.75 14.28 และ 8.69 ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยขานอ้อยปรับสภาพสูงขึ้นเป็น 10% พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดน้อยมาก และที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์เป็น 15% ก้อนมอร์ต้าไม่สามารถขึ้นรูปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25

สาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าผสมขานอ้อยมีค่าต่ำมีอยู่หลายปัจจัย กล่าวคือ อาจเนื่องมาจากลักษณะของขานอ้อยที่นำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นน้อยมากและมีลักษณะเป็นเส้นใยดังกล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2.3 เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้มีลักษณะเป็นโพรงเล็กๆ ภายในก้อนมอร์ต้า ความสามารถในการรับแรงอัดจึงน้อยลง และสาเหตุอีกประการหนึ่งก็คือ เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น ปริมาณขานอ้อยที่อยู่ในก้อนมอร์ต้ามากขึ้น จะไปขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าลดลง และอาจจะมึ่น้ำตาลหลงเหลืออยู่ในขานอ้อย น้ำตาลอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ก้อนมอร์ต้าไม่สามารถรับแรงอัดได้



รูปที่ 4.24 ก้อนมอร์ต้าแทนที่ด้วยขานอ้อย  
ปรับสภาพ 10%

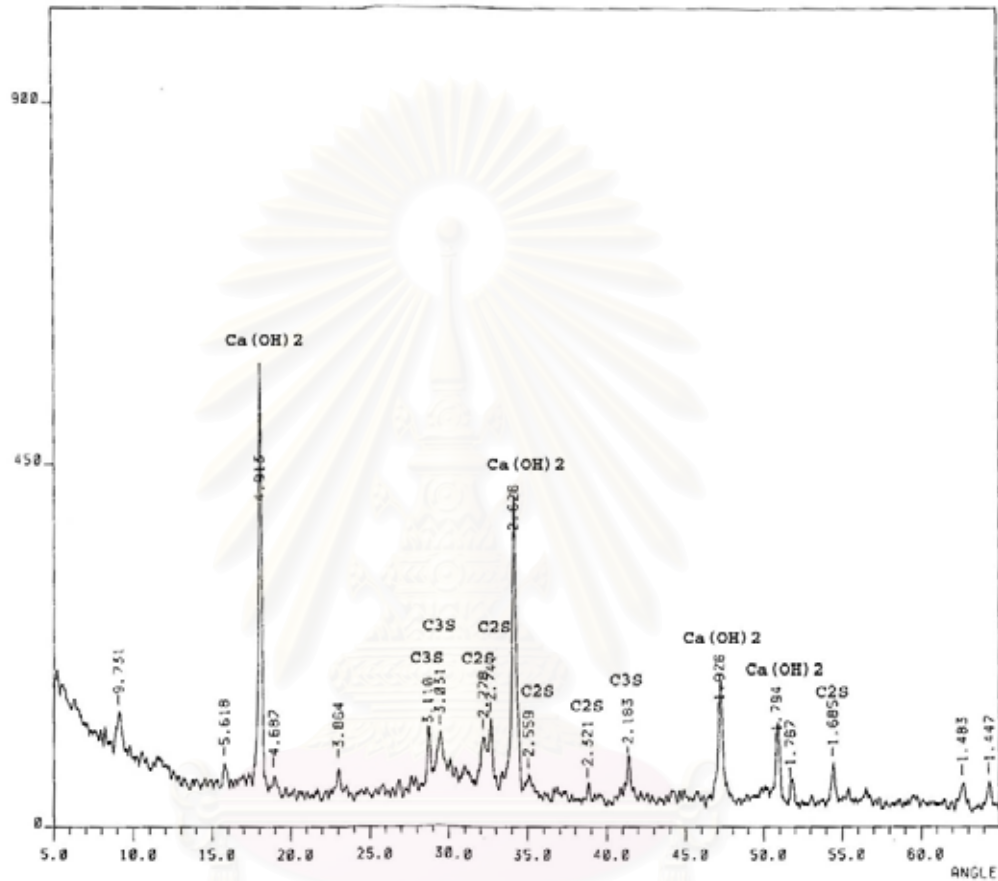


รูปที่ 4.25 ก้อนมอร์ต้าแทนที่ด้วยขานอ้อย  
ปรับสภาพ 15%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.23 ทั้งก้อนมอร์ต้าธรรมดาและก้อนมอร์ต้าที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่าความพรุนของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว ถ้ามีการเติมปริมาณน้ำในซีเมนต์น้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์และการเกิดผลึกไม่ดีและไม่เหมาะสมทั้งนี้ถ้าหากมีการเติมน้ำมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยา

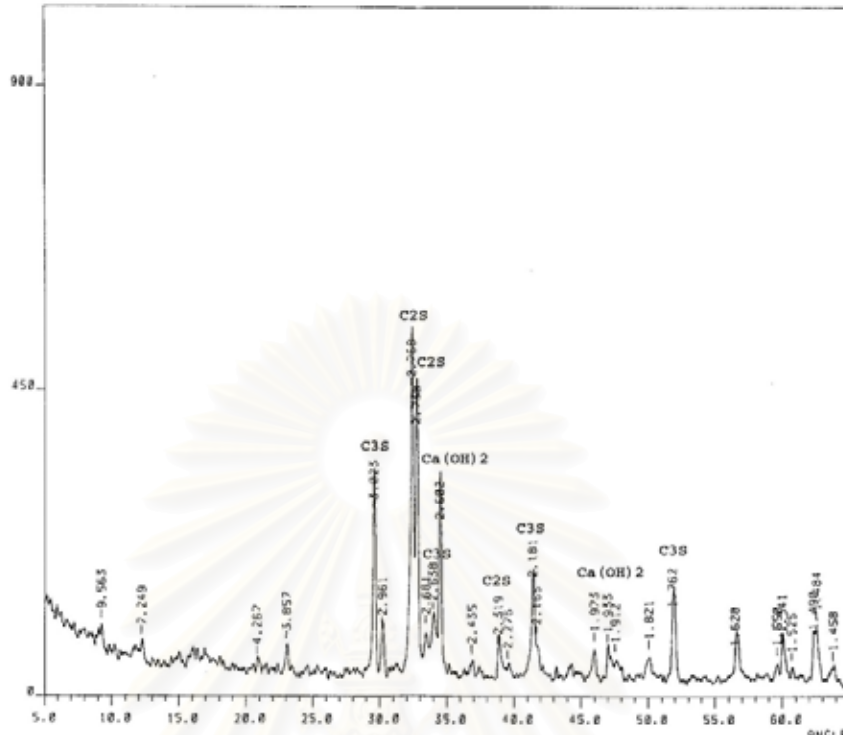


ไฮเดรชันและเกิดผลึกได้ดีขึ้น แต่ถ้าหากเติมมากเกินไปจะทำให้เกิด Capillary pores ทำให้มีผลต่อการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัด (Shin and Sujiwatthana, 1988)



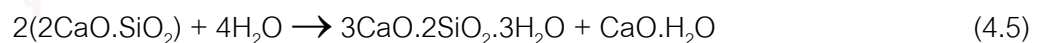
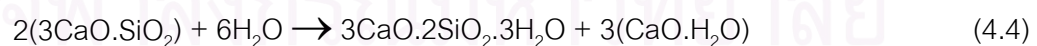
รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ 0% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ 5% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ เป็น 0 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน พบว่าส่วนประกอบส่วนใหญ่คือ  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังแสดงในสมการที่ 4.4 และ 4.5 สารประกอบ  $\text{C}_3\text{S}$  (ไตรแคลเซียมซิลิเกต :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) และ  $\text{C}_2\text{S}$  (ไดแคลเซียมซิลิเกต :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  :  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$  หรือ  $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$  :  $\text{CH}$ )



สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  ทำให้ซีเมนต์เฟสท์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม (วินิต ซ่อวิเชียร, 2539) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์

เป็น 5% พบว่าสารประกอบส่วนใหญ่เป็น  $C_2S$  และ  $C_3S$  และพบ  $Ca(OH)_2$  น้อยมากเมื่อเทียบกับ อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์เป็น 0% แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขาน้อยไป ชัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายสำหรับมอร์ตาร์ ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยขาน้อยในปริมาณร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดย น้ำหนักโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขาน้อย เท่ากับ 0.45 0.50 0.55 และ 0.6 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

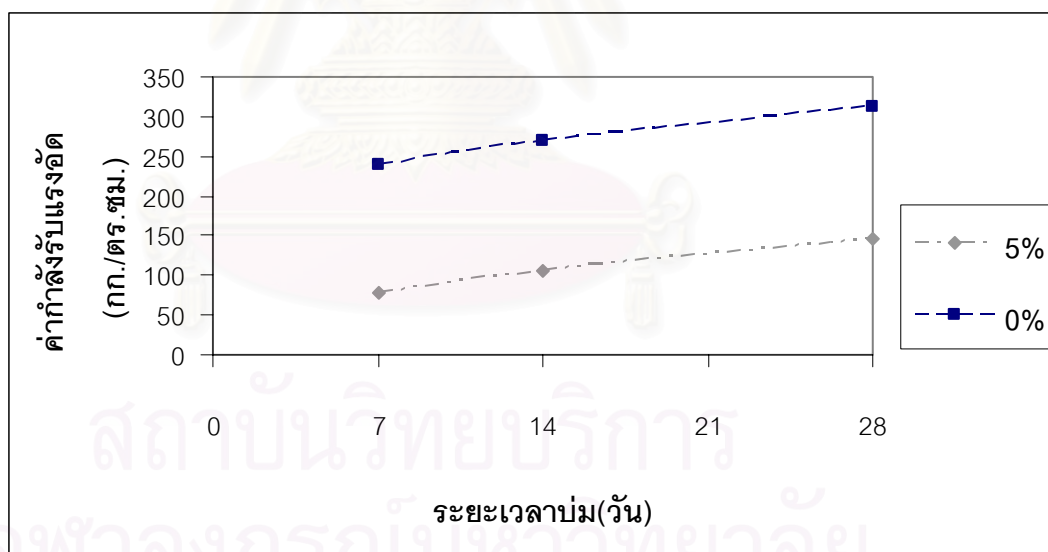
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย

อัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขาน้อยปรับ สภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วโดยน้ำหนัก	ค่าพีเอช	ตะกั่ว (มก./ล.)
0.45	0	12.31	N.D.
	5	12.23	N.D.
	10	12.05	N.D.
	15	12.23	0.010
0.50	0	12.22	N.D.
	5	12.12	N.D.
	10	11.98	N.D.
	15	11.99	0.009
0.55	0	12.21	N.D.
	5	12.12	N.D.
	10	12.04	0.004
	15	11.98	0.01
0.60	0	12.20	N.D.
	5	12.14	0.001
	10	12.23	0.011
	15	11.98	0.19

หมายเหตุ: N.D. = มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้แน่นอน

ค่าพีเอชของน้ำสกัดแสดงในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดของมอร์ตามีค่าค่อนข้างสูงอาจเกิดจากการละลายของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ เมื่อเพิ่มการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยชานอ้อยปรับสภาพพบว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าลดลงทุกอัตรา ส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมชานอ้อยปรับสภาพ สาเหตุมาจากส่วนผสมมีปูนซีเมนต์ลดลง คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ชะละลายได้มีค่าลดลง พีเอชจึงลดลง และจากตารางจะเห็นว่าปริมาณตะกั่วในน้ำชะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มก./ล.ตามค่ามาตรฐานในการสกัดสารของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนผสมของการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมชานอ้อยปรับสภาพ เท่ากับ 0.45 เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ใช้ในการทดลองต่อไป

4.4.2 ผลการศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่มโดยใช้อัตราส่วนชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มของมอร์ตาธรรมดาและมอร์ตาผสมชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

**ตารางที่ 4.6** ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมซังอ้อยปรับสภาพเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา

ร้อยละการแทนที่ ปูนซีเมนต์ (%)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด (%)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
0%	100	100	100
5%	32.79	38.96	46.45

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้ซังอ้อยปรับสภาพแทนที่ซีเมนต์ 5% ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ที่ทุกระยะเวลาบ่มจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 79 105 และ 145 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ร้อยละ 32.79 38.96 และ 46.45 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วันตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งก้อนมอร์ต้าที่ทุกระยะเวลาบ่มมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C109-95 กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.<sup>2</sup>

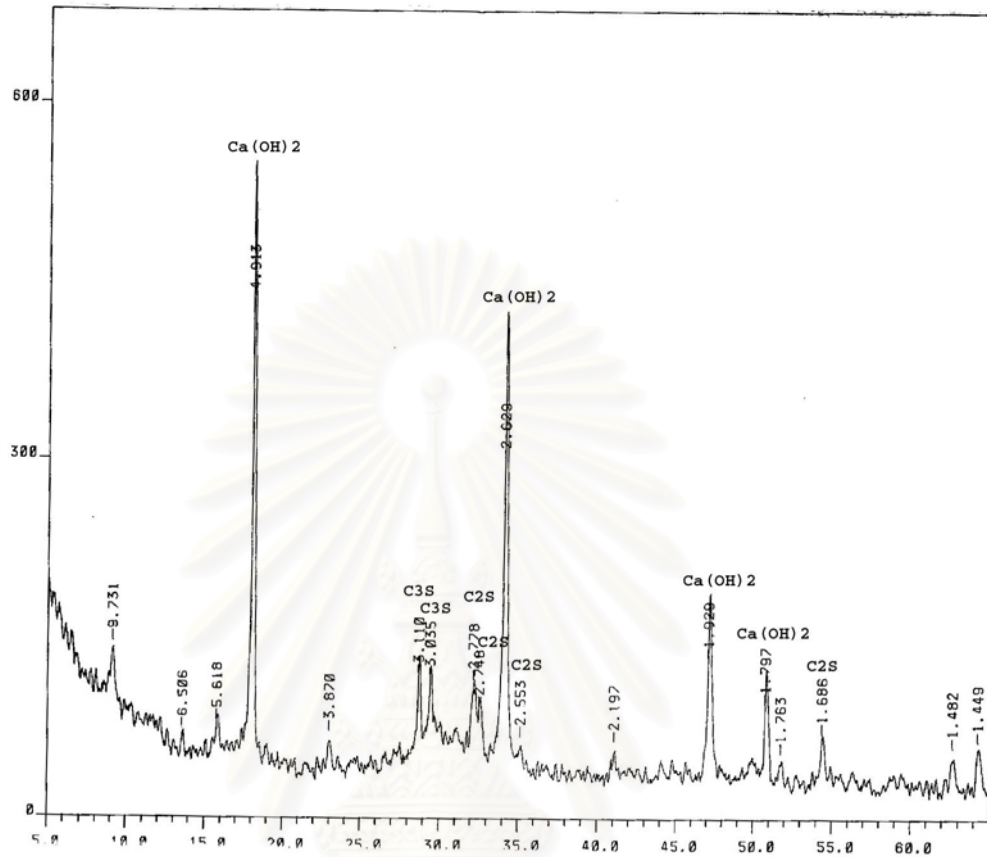
จะเห็นได้ว่าการที่ระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์นานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าจึงเพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 4.7** ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 5 % ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าพีเอช	ตะกั่ว (มก./ล.)
7	12.28	0.004
14	12.35	0.001
28	12.39	N.D.

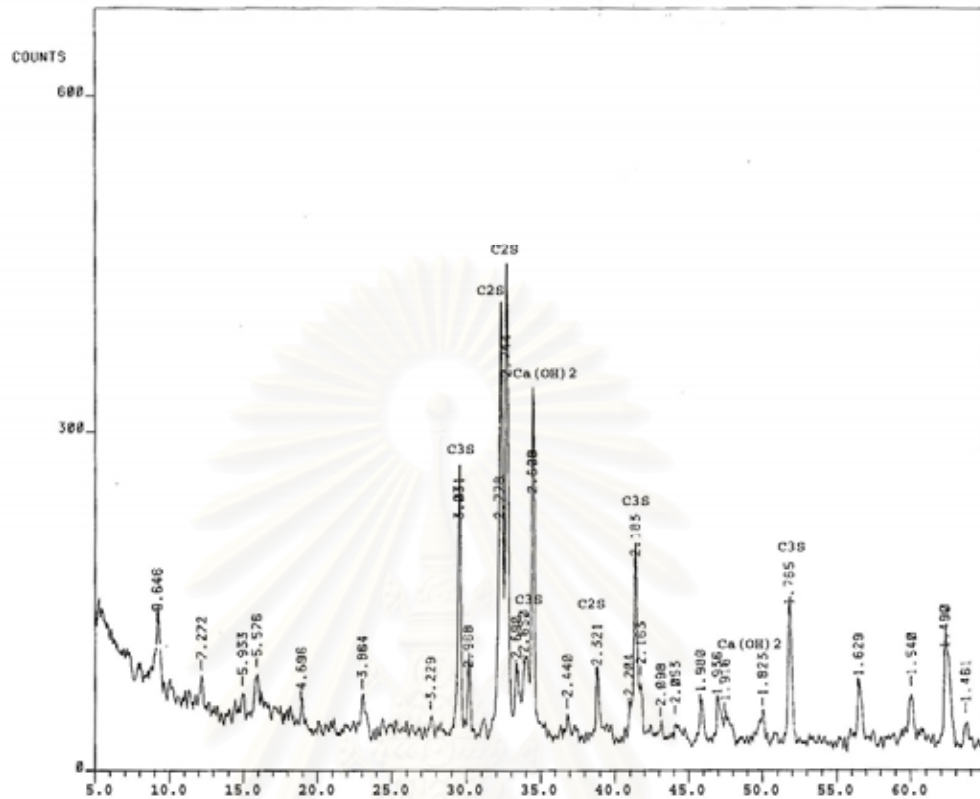
หมายเหตุ: N.D. = มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้แน่นอน

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าปริมาณตะกั่วในน้ำชะของก้อนมอร์ต้าทุกระยะเวลาบ่มอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มก./ล.ตามค่ามาตรฐานในการสกัดสารของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)



รูปที่ 4.29 ผลวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ 0% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

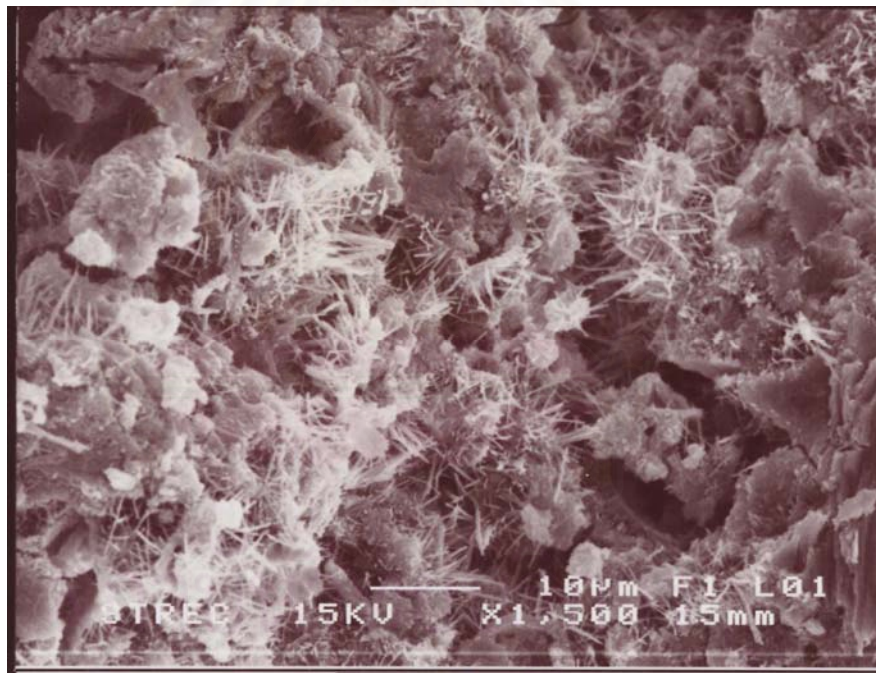
จากรูปที่ 4.29 พบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ของก้อนมอร์ต้า คือ  $\text{Ca(OH)}_2$  เช่นเดียวกับรูปที่ 4.26 แต่ปริมาณของ  $\text{C}_2\text{S}$  และ  $\text{C}_3\text{S}$  ซึ่งเป็นสารประกอบที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก  $\text{C}_2\text{S}$  และ  $\text{C}_3\text{S}$  จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน แล้วเกิดเป็น CSH gel



รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนการแทนที่ 5% อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

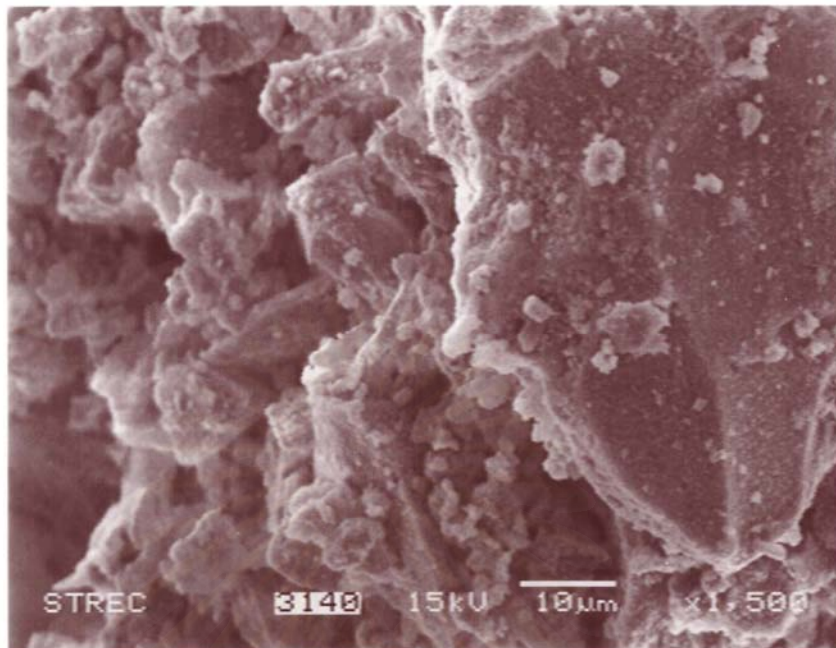
จากรูปที่ 4.30 สามารถอธิบายได้เหมือนกับรูป 4.27 คือเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยชานอ้อยปรับสภาพ 5% พบว่ามี  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อย และปริมาณของ  $\text{C}_2\text{S}$  และ  $\text{C}_3\text{S}$  ยังเหลือเป็นปริมาณมาก และเป็นปริมาณเท่ากับรูปที่ 4.27 ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ อาจเนื่องมาจาก ซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าชานอ้อย ไปอยู่ในรูพรุนของชานอ้อย และชานอ้อยสามารถดูดซับน้ำไว้ในปริมาณมาก ทำให้ปริมาณน้ำไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากรูปที่ 4.31 โครงสร้างของก้อนมอร์ตาธรรมดาที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันที่กำลังขยาย 1,500 เท่า จะสามารถพบ  $C_3S_2H_3$  (CSH gel) ซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นเข็มสั้นๆ การเกิดการขยายตัว ซึ่ง CSH gel นี้มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว แข็งและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ดังนั้นก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่เพิ่มปริมาณขึ้น ความพรุนของซีเมนต์จะลดลง สามารถรับแรงอัดได้ ขณะที่ก้อนมอร์ตาที่มีชานอ้อยอยู่ 5% ดังรูป 4.32 ซึ่งเป็นรูปของก้อนมอร์ตาที่มีชานอ้อยปรับสภาพอยู่ 5% โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันที่กำลังขยาย 1,500 เท่า จะไม่เห็นโครงสร้างที่เป็นเส้นใยของ CSH gel ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มปริมาณชานอ้อยลงไป ชานอ้อยจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะไปขัดขวางการเชื่อมประสานของซีเมนต์ ทำให้การก่อตัวเกิดได้ไม่ดี และทำให้ไม่สามารถรับแรงอัดได้



รูปที่ 4.31 ก้อนมอร์ตาที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน กำลังขยาย 1,500 เท่า

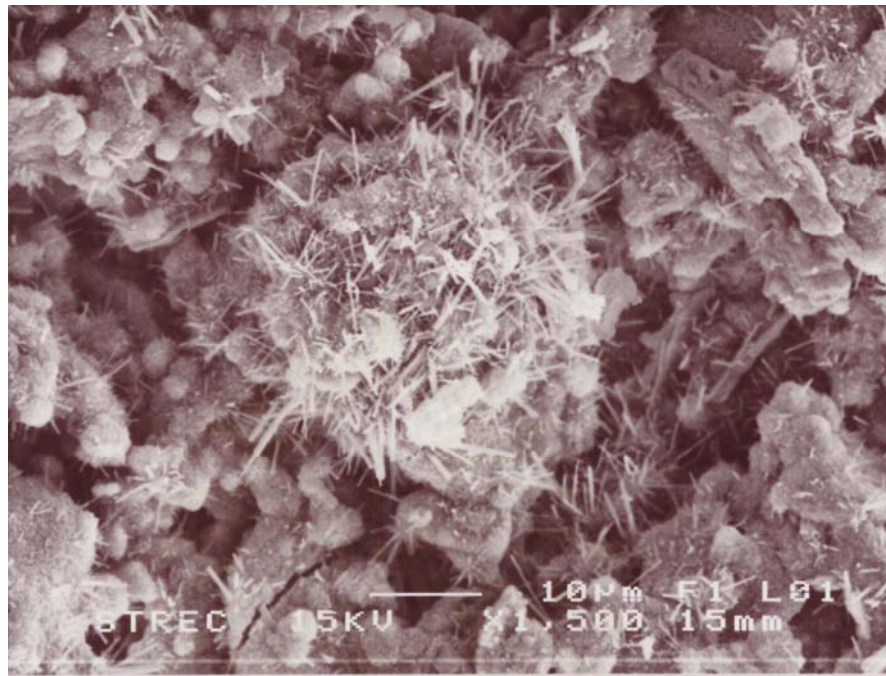




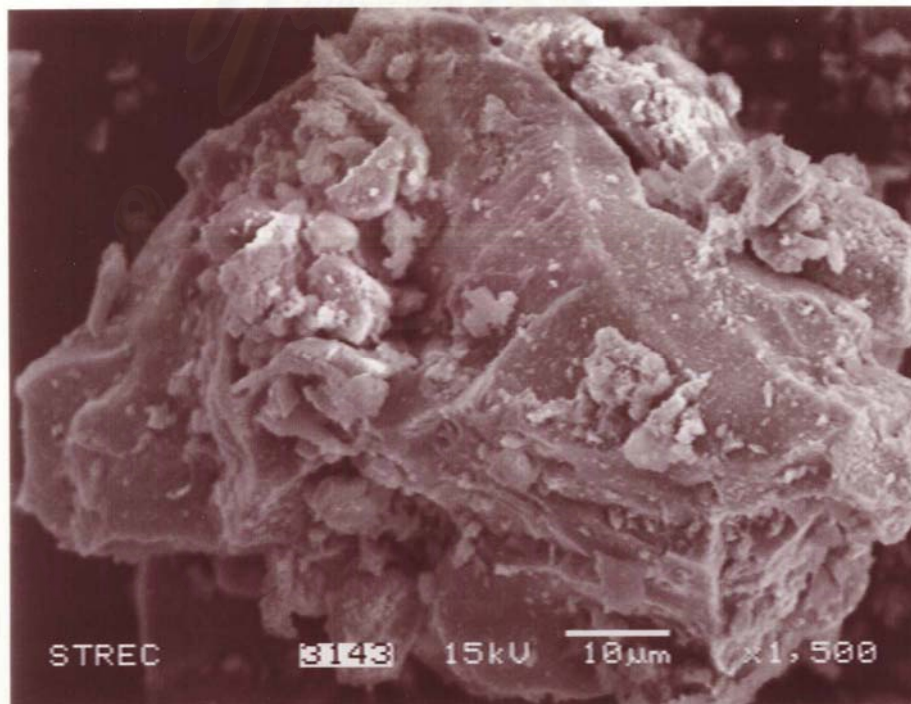
รูปที่ 4.32 ก้อนมอร์ต้าที่มีร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.33 เป็นรูปของก้อนมอร์ต้าธรรมดาที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า CSH gel ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มสั้นๆ เกิดการขยายตัวขึ้น เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.31 พบว่าความพรุนของซีเมนต์จะลดลง ดังนั้นจึงทำให้สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.34 ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างของก้อนมอร์ต้าที่มีขานอ้อยปรับสภาพอยู่ 5% โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า ไม่เห็นโครงสร้างของ CSH gel เช่นเดียวกับรูปที่ 4.32

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.33 ก้อนมอร์ต้าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.34 ก้อนมอร์ต้าที่มีร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% ด้วยขานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

## 4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานเบตเตอรีแห่งหนึ่ง โดยมีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 30 มก./ล. พีเอช 2

### 4.5.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายเมื่อใช้ชานอ้อยปรับสภาพดูดซับตะกั่วในน้ำเสียและนำชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วไปทำเป็นก้อนแข็ง

จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าเมื่อใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 มก./ล. จะต้องใช้ชานอ้อยปรับสภาพดูดซับตะกั่ว 2 ครั้ง จึงจะได้น้ำเสียที่ผ่านการดูดซับได้มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม คือต้องมีค่าน้อยกว่า 0.2 มก./ล.

เพราะฉะนั้นในการกำจัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. จะต้องใช้ชานอ้อยปรับสภาพเท่ากับ 20 กก.

#### 4.5.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพชานอ้อย

ในการปรับสภาพชานอ้อย 100 กรัม ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1M.จำนวน 1 ลิตร  
 ต้องการเตรียมชานอ้อยปรับสภาพ = 20 กก.  
 เพราะฉะนั้นจะต้องเตรียมสารละลาย 0.1M.HCl = 200 ลิตร

ในการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M. จำนวน 1ลิตร จะต้องใช้ กรดไฮโดรคลอริก 37% จำนวน 8.33 มล.

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ 37% HCl =  $8.33 \times 200$   
 = 1,666 มล.

ราคา 37% กรดไฮโดรคลอริก 2500 มล. เท่ากับ 350 บาท

เพราะฉะนั้นในการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม.ต้องใช้เงินในการปรับสภาพชานอ้อย = 234 บาท  
 ทั้งนี้ยังไม่ได้รวมค่าพลังงานที่ใช้ในการต้มในขั้นตอนการปรับสภาพชานอ้อย

#### 4.5.1.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอช

น้ำเสียจากโรงงานมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 จะต้องปรับพีเอชให้ขึ้นมาเท่ากับ 6 เนื่องจากการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าชานอ้อยปรับสภาพสามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 6 โดยในการทดลองคิดค่าใช้จ่ายใช้ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 100 มล. โดยใช้ NaOH 6N ปริมาตร 1.5 มล. ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณ NaOH เท่ากับ

$$\begin{aligned} (6 \times 1.5 \times \text{มวลโมเลกุล}) / 1000 &= (6 \times 1.5 \times 40) / 1,000 \\ &= 0.36 \text{ ก./100มล.} \\ &= 3,600 \text{ ก./ลบ.ม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้นน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้ NaOH} = 3,600 \text{ กรัม}$$

ราคาของ 50%NaOH อยู่ที่กิโลกรัมละ 8 บาท

เพราะฉะนั้นในการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้เงินในการปรับพีเอชเท่ากับ 60 บาท

ในการนำชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการดูดซับตะกั่ว ไปส่งบำบัดที่เจนโก้ ต้องเสียค่าใช้จ่าย 5 บาท /กก. เพราะฉะนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการส่งชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการดูดซับตะกั่วปริมาณ 20 กก.

$$= 20 \times 5 = 100 \text{ บาท}$$

ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวมในการใช้ชานอ้อยปรับสภาพบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่ว

$$= 234 + 60 + 100 = 394 \text{ บาท}$$

#### 4.5.1.3 ค่าใช้จ่ายในการใช้ชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับไปแทนที่ปูนซีเมนต์

- ใช้ชานอ้อยปรับสภาพแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในการฝังกลบ

ใช้ชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแทนที่ซีเมนต์ได้ถึง 10% เพราะในการทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification) และการปรับเสถียร (Stabilization) มีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้เพียง 3.5 กก./ซม.<sup>2</sup> เพราะฉะนั้นจึงสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ปริมาณมาก

ในการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. จะต้องใช้ชานอ้อยปรับสภาพ 20 กก.

$$\text{จะต้องใช้ปูนซีเมนต์} = \frac{90}{10} \times 20 = 180 \text{ กก.}$$

ราคาปูนซีเมนต์อยู่ที่กิโลกรัมละ 2.32 บาท

เพราะฉะนั้นในการทำเป็นก้อนแข็งชานอ้อย 20 กก. ต้องใช้เงิน เท่ากับ  $2.32 \times 180 = 417.6$  บาท

ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อน้ำที่ใช้ในการดูดซับโดยชานอ้อยด้วย แต่อาจจะใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้วมาใช้ในการชั่งตวงนี้ ดังนั้นไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายค่าน้ำ

ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวมเมื่อใช้ชานอ้อยปรับสภาพดูดซับตะกั่วในน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. และนำชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วไปทำเป็นก้อนแข็ง =  $234+60+418 = \underline{712}$  บาท

เมื่อพิจารณาพบว่าในการบำบัดน้ำเสียในปริมาณ 1 ลบ.ม. จะต้องใช้ชานอ้อยปรับสภาพสูงมาก คือ 20 กก. เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพและนำมาทำเป็นก้อนแข็ง พบว่าต้องจ่ายเงินมากกว่ากล่าวคือ เป็นจำนวนเงิน 712 บาทต่อน้ำเสีย 1ลบ.ม. ในขณะที่การบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์จะต้องใช้เงินเป็นจำนวน 85.25 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม.(ภาคผนวก ฉ.)แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยเป็นเพียงแนวทางหนึ่งที่จะนำชานอ้อยซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากโรงงานน้ำตาลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในอนาคตอาจจะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลดีต่อประเทศในระยะยาวมากกว่าการส่งเงินไป เป็นการส่งเสริมให้มีการพัฒนาที่ยั่งยืน และการปล่อยชานอ้อยทิ้งไว้โดยไม่นำมาใช้ประโยชน์จะก่อให้เกิดมลพิษเป็นอย่างมาก เป็นที่สะสมของเชื้อโรค แมลงวัน และสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรคอื่นๆ อีกทั้งกลิ่นของชานอ้อยที่ถูกทิ้งทับถมกันไว้นานก่อให้เกิดความรำคาญของชาวบ้านที่อาศัยอยู่ใกล้เคียง และโรงงานน้ำตาลยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดชานอ้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องเสียค่าที่ดิน ซึ่งนับวันจะมีเวลาแพงขึ้น เอาไว้เป็นที่ทิ้งชานอ้อยที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ที่ได้จากการวิจัยในหัวข้อ 4.4.2 จะเห็นว่าชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก เช่น คอนกรีตบล็อก ซึ่งมีค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดกำหนดไว้ที่ 25 กก./ซม.<sup>2</sup> แต่ในการผลิตคอนกรีตบล็อก จะต้องพิจารณาถึงสมบัติต่างๆ เปรียบเทียบราคาต่อก้อนว่าคุ้มหรือไม่

สำหรับการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก นอกจากจะคิดจากค่าวัสดุ เช่นค่าปูนซีเมนต์ ค่าทราย ค่าน้ำประปาแล้ว ยังต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น

- ค่าขนส่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางในการขนส่ง
- ค่าจ้างแรงงาน จากประกาศกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2546 พบว่าอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำเท่ากับ 133 บาท แต่หากเป็นแรงงานในท้องถิ่นกรุงเทพและปริมณฑล จะมีอัตราค่าจ้างแรงงาน

ขั้นต่ำที่สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 170 บาท ดังนั้นค่าจ้างแรงงานก็เป็นปัจจัยหนึ่งจะนำมาพิจารณาค่าต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก

นอกจากนี้ยังมีราคาค่าดำเนินการต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือ ค่าติดต่อประสานงานกับหน่วยงานอื่นๆ และค่าบริการอื่นๆ โดยค่าใช้จ่ายอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การดูดซับ

1. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของชานอ้อยปรับสภาพในน้ำเสีย พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพจะสูงขึ้น

2. ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่อยู่ในช่วงที่ทำการศึกษาที่มีผลกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของชานอ้อยปรับสภาพในน้ำเสีย พบว่าชานอ้อยปรับสภาพมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วในช่วงพีเอชเท่ากับ 4-6 โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 6

3. ผลของเวลาในการสัมผัสที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของชานอ้อยปรับสภาพ พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นจนถึงเวลาสัมผัสค่าขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

4. สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วด้วยชานอ้อยปรับสภาพ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 80 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6 และระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 3 นาที ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนดลิช

##### 5.1.2 การทำเป็นก้อนแข็ง

1. เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทำเป็นก้อนแข็งของชานอ้อยปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 0.45

2. เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยชานอ้อยปรับสภาพทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันของมอร์ต้าผสมชานอ้อยปรับสภาพ มีค่าต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดาทุกปริมาณการ

แทนที่ สำหรับมอร์ตาคตามสมชานอ้อยปรับสภาพที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เท่ากับ 77 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาคารธรรมดาเท่ากับร้อยละ 32.48 สำหรับมอร์ตาคตามสมชานอ้อยปรับสภาพที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าก่อนมอร์ตาคสามารถขึ้นรูปเป็นก้อนได้แต่ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยมาก และสำหรับมอร์ตาคตามสมชานอ้อยปรับสภาพที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนได้ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรมทุกปริมาณการแทนที่

3. ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่ทุกระยะเวลาบ่มของมอร์ตาคตามสมชานอ้อยปรับสภาพมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาคารธรรมดา โดยค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่ด้วยชานอ้อยปรับสภาพร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันมีค่า 145 กก./ซม.<sup>2</sup> ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาคารธรรมดา เพียงร้อยละ 46.45 ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

## 5.2 ความสำคัญทางงานวิศวกรรม

1. ชานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียทั้งทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากชานอ้อยมีโครงสร้างเป็นสามมิติ มีการกระจายขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม และมีการรวมตัวของ Active sites เช่น Carboxyl group, Hydroxyl group และ Phenolic group สามารถรวมตัวกับโลหะหนักที่พื้นผิวได้

2. เนื่องจากตะกั่วสามารถรวมตัวกับลิกนินที่อยู่ในชานอ้อย โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างลิกนินกับตะกั่ว จะเกิดการดูดติดผิวอย่างรุนแรงบนไตรแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่อยู่ในซีเมนต์ ดังนั้นจึงช่วยลดการชะละลายของตะกั่ว



### 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ตัวดูดซับที่ทำจากชานอ้อยมีความหนาแน่นน้อยมากคือ 0.34 ก./ซม.<sup>3</sup> ดังนั้นจึงทำให้ตกตะกอนและแยกออกจากน้ำเสียยาก ดังนั้นควรจะมีการเติมสาร binder ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความหนาแน่น
2. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักชนิดอื่นโดยใช้ชานอ้อย
3. ศึกษาการนำชานอ้อยไปบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกัน เพื่อทดสอบดูว่าโลหะหนักชนิดใดมีประสิทธิภาพการกำจัดสูง โดยใช้ปริมาณชานอ้อยปรับสภาพในปริมาณน้อย
4. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพที่มีการดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์
5. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของชานอ้อย ควรมีการศึกษาการเติมสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของชานอ้อย หรือเติมหมู่ฟังก์ชันเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุ เช่น ปรับสภาพชานอ้อยเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอเทอร์นารีไนซ์ครอสส์ลิงก์เซลลูโลส
6. เมื่อพิจารณาผลของกำลังรับแรงอัด พบว่าชานอ้อยมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้เมื่อใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์น้อยๆ หรืออาจใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) และการปรับเสถียร (Stabilization) ซึ่งควรทำการวิจัยในการทำผลิตภัณฑ์นั้นๆ ก่อนที่จะนำมาใช้จริง เพราะค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการหล่อก้อนมอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ย่อมต่างจากผลิตภัณฑ์ที่จะทำขึ้นโดยต้องพิจารณาถึงสมบัติในการใช้งานในด้านต่างๆที่เกิดจากการใช้ชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัด เปรียบเทียบกับราคาค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนการผลิต ให้เหมาะสมคุ้มค่าที่สุด
7. ควรศึกษาผลที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตต่างๆ ของคอนกรีตเมื่อใช้ชานอ้อยปรับสภาพผสมลงไปเช่น ความสามารถในการใช้งานได้ ความทนทาน ความสามารถในการซึมน้ำได้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ความต้านทานในการรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีต เป็นต้น
8. ควรเสริมคุณสมบัติของชานอ้อยปรับสภาพเพื่อให้เหมาะสมกับงานคอนกรีตเช่น เติมน้ำยาใดๆ เช่น ซิลิกาฟุ่ม ที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานที่ดีขึ้น และสามารถเพิ่มปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยชานอ้อยได้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กนกพร โภชะโยธิน.2545. การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- เกศสุชา พูลคำ.2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จันทร์นา สงวรรณรุ่งวงศ์ . 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ซีเมนต์อ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ . 2542. การกำจัดสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดควอเตอร์ไนท์ครอสส์ลิงก์เซลลูโลส ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนิตา เสมรัตน์. 2543. Color Removal Efficiency for Textile Mill Wastewater by Agricultural Wastes as Carbon Adsorbent.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ชลธา ไกรวัตนุสสรณ์ ลัดดา ยาวีร์ชน และศักดิ์จิตร ต้นสมบูรณ์.2538. การผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค).
- ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์. 2543. ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพดล ฉัตรตระกูล. 2543. การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานยางยืดโดยใช้ซีเมนต์อ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปรีชา เกียรติกระจาย.2532. การใช้ประโยชน์จากขานอ้อย. วารสารน้ำตาล ฉบับที่ 5 ปีที่25.

- ลัดดา ยาวีร์ชน. 2544. การกำจัดสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์ เซลลูโลส ที่ทำจากชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัศวิทย์ บัฒมะเวณ. 2540. ตามรอยน้ำตาล. กรุงเทพฯ : ที.พี.พี.รินทร์.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 6. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.
- อุบลรัตน์ วาวิวัฒน์นะ. 2544. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดุก. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

#### ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). C 109-95, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 69-73.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. C127-88. Annual book of ASTM standard. 04.02 Section 4: 47-68.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete. C 311-96a, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 184-190.
- Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. 1978. Carbon Adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science,
- Eckenfelder, W.W., Jr. 1989. Industrial Water Pollution Control 2<sup>nd</sup> ed (n.p.): McGraw-Hill.
- Fergusson, J. E. 1991. The Heavy Element: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects (n.p.): Pergamon Press.
- Garrels, R.M., and Christ, C.L. 1965. Solutions, Minerals, and Equilibria (n.p.): Harper.

- Gupta, V.K., and Ali, I. 2000. Utilisation of Bagasse Fly Ash (a sugar industry waste) for the Removal of Copper and Zinc from Wastewater. Separation and Purification Technology 18:131-140
- Gupta, V.K., and Ali, I. In press. Removal of Lead and Chromium from wastewater using Bagasse Fly Ash –a sugar industry waste. Journal of Colloid and Interface Science.
- Harison, R.M. and Laxen, D.P.H.1983 . Lead Pollution Caused and Control . London: Chapman and Hall.
- Janusa, M.A., Champagne, C.A., Fanguy, J.C., Heard, G.E., Laine, P.L. and Landry, A.A. 2000 . Solidification / Stabilization of Lead with the Aid of Bagasse as an Additive to Portland Cement. Microchemical Journal 65: 255-259
- Metcalf & Eddy.1991. Wastewater Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill Book.
- Rao, M., Parwate, A.V. and Bhole, A.G. 2002. Removal of Cr<sup>6+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution using bagasse and fly ash. Waste Management 22 : 824-830.
- Shin, H. S. and Sujiwattana, P. 1988. Factors affecting solidification of hazardous wastes materials. Hazardous waste: detection, control, treatment. (n.p.): 1549-1560
- Stumn, W., and Morgan, J.J. 1970. Aquatic Chemistry.Wiley-Interscience.(n.p.)
- Weng, C.H. and Haung, C.P. 1994 . Treatment of Metal Industrial Waste Water by Fly Ash and Cement Fixation. J. of Envi. Eng-ASCE. 120(6): 1470-1487.
- Yavada, K.P., Tyagi , B.S. and Singh, V.N. 1989. Fly-ash for the treatment of water enriched in lead (II). J. Envi. Sci . and Health. 7:783-808.
- Yu, B., Zhang, Y., Shukla, A., Shukla, S.S. and Dorris, K.L. 2001. The Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Sawdust Adsorption—removal of lead and comparison of its adsorption with copper. Journal of Hazardous Materials B84:83-94.

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- กฤษฎณ์ จารุชะวีย์. 2545. การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยขาน้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน.  
วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. 2520. รายงานขอศึกษาเรื่อง  
น้ำตาล. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2525 . คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง . พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัย  
สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชา สุริยพันธ์. 2523. ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากอ้อย. อ้อย, หน้า 242 – 254. กรุงเทพฯ :  
งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองแผนงาน กรมวิชาการเกษตร.
- ปรีชา สุริยพันธ์ และ สมเกียรติ พัฒนาเมธีกูร. 2523. การผลิตน้ำตาลจากอ้อย. อ้อย,  
หน้า 211 – 228. กรุงเทพฯ : งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองแผนงาน  
กรมวิชาการเกษตร.
- สถาบันวิจัยพลังงาน. 2541. รายงานการศึกษาเรื่องการใช้และประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาล.  
กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.ปรีชา สุริยพันธ์.
- อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย. 2539. การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้า  
ลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Janusa, M.A., Heard, G.E., Bourgeois, J.C., Kliebert, N.M., and Landry, A.A. 1998. Effects of  
Particle Size and Contact Time on the Reliability of Toxicity Characteristic  
Leaching Procedure for Solidified/Stabilized Waste. Microchemical Journal 59:  
326-332.
- Janusa, M.A., Heard, G.E., Bourgeois, J.C., Kliebert, N.M., and Landry, A.A. 1998. Effects of  
Curing Temperature on the Leachability of Lead Undergoing Solidification/

Stabilization with Cement. Microchemical Journal 60: 193-197.

Roy, A., Eaiton, H.C., Cartleedge, F.K., and Tittlebaum , M.E. 1991. Solidification /  
Stabilization of Heavy Metal Sludge by a Portland/Fly Ash Binding Mixture.  
J. of Hazardous Waste and Hazardous Material . 8:33-40.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.  
ตารางผลการทดลองขั้นตอนการดูตัดซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มก./ล. พีเอช 4 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง)	เวลาที่ใช้ ในการเขย่า (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			ไม่เติมชานอ้อย		เติมชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
				ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
10.020	4.12	10	0,0	10.020	4.12	10.020	4.12	0.000	0.000	0.000
10.020	4.12	10	0,3	10.000	4.12	5.204	3.97	48.397	48.067	0.485
10.020	4.12	10	0,6	9.999	4.12	5.473	3.96	45.163	45.383	0.453
10.020	4.12	10	0,9	9.997	4.12	5.048	3.96	49.387	49.617	0.495
10.020	4.12	10	0,12	9.995	4.12	4.983	3.97	50.023	50.273	0.501
10.020	4.12	10	0,15	9.993	4.12	3.299	3.95	66.809	67.079	0.669
10.020	4.12	10	0,30	9.997	4.12	3.487	3.94	64.970	65.200	0.651
10.020	4.12	10	0,45	9.939	4.12	3.051	3.95	69.294	69.554	0.694
10.020	4.12	10	1,0	9.997	4.12	3.366	3.95	66.177	66.407	0.663
10.020	4.12	10	1,30	9.996	4.12	3.340	3.94	66.581	66.821	0.667
10.020	4.12	10	2,0	9.993	4.12	3.325	3.89	65.425	65.695	0.656

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มก./ล. พีเอช 4 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง)	เวลาที่ใช้ ในการเขย่า (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ  (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			ไม่เติมชานอ้อย		เติมชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
				ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
10.020	4.12	10	2,30	9.996	4.12	3.437	3.89	65.455	65.695	0.656
10.020	4.12	10	3,0	9.994	4.12	3.081	3.90	68.995	69.255	0.691
10.020	4.12	10	4,0	9.997	4.12	3.332	3.87	66.513	66.743	0.666
10.020	4.12	10	5,0	9.997	4.12	3.660	3.88	66.243	66.473	0.664
10.020	4.12	10	6,0	9.998	4.12	3.564	3.88	64.214	64.434	0.643

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ  (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช		ไม่เต็มชานอ้อย		เต็มชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
			ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
5  4.916	2	10	4.911	2.05	4.780	2.03	2.654	2.764	0.013
	3	10	4.910	3.04	3.358	2.99	31.696	31.816	0.156
	4	10	4.906	4.06	1.728	3.90	64.657	64.857	0.318
	5	10	4.894	5.05	1.019	4.85	78.843	79.273	0.388
	6	10	4.894	6.03	0.215	5.40	95.181	95.631	0.468
	10  10.610	2	10	10.602	2.03	10.311	2.00	2.742	2.821
3	10	10.596	3.16	7.302	3.00	31.045	31.178	0.329	
4	10	10.588	4.04	5.276	3.9	50.063	50.273	0.531	
5	10	10.562	5.03	2.433	4.86	76.619	77.069	0.813	
6	10	10.562	5.97	1.806	5.45	82.520	82.975	0.876	

ตารางที่ก.2(ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วในน้ำ

เสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล.น้ำเสียตัวอย่าง)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช		ไม่เต็มชานอ้อย		เต็มชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
			ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
20 20.508	2	10	20.484	2.08	19.938	2.03	2.663	2.780	0.055
	3	10	20.235	3.04	17.837	2.99	12.890	13.023	0.264
	4	10	20.463	4.05	13.088	3.89	35.963	36.183	0.738
	5	10	20.418	5.03	7.305	4.86	63.941	64.381	1.311
	6	10	20.408	6.03	4.472	5.41	77.705	78.195	1.594
40 41.130	2	10	41.044	2.03	43.114	2.00	2.917	3.127	0.120
	3	10	41.035	3.04	39.692	2.99	7.741	7.971	0.318
	4	10	41.027	4.05	30.651	3.89	28.684	28.934	1.180
	5	10	40.941	5.01	21.224	4.86	50.330	50.790	2.070
	6	10	40.916	6.03	13.677	5.81	67.770	68.290	2.787

ตารางที่ก.2(ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10ก./ล. น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

สังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล.น้ำเสียตัวอย่าง)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ  (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช		ไม่เต็มชานอ้อย		เต็มชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
			ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
80	2	10	80.410	2.02	77.709	2.00	3.350	3.611	0.270
80.620	3	10	80.410	3.01	71.965	3.00	10.475	10.735	0.844
	4	10	80.370	4.03	65.803	3.90	18.069	18.379	1.457
	5	10	80.209	5.03	53.087	4.96	38.602	39.112	3.112
	6	10	79.959	6.02	32.957	5.59	58.300	59.120	4.700

ตารางที่ ก.3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง)	เวลาที่ใช้ ในการเขย่า (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			ไม่เติมชานอ้อย		เติมชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
				ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
79.220	6.01	10	0,0	79.220	6.01	79.220	6.01	0.000	0.000	0.000
79.220	6.01	10	0,3	78.705	6.01	5.204	5.98	56.073	56.723	4.442
79.220	6.01	10	0,6	78.713	6.01	5.473	5.98	56.188	56.828	4.451
79.220	6.01	10	0,9	78.689	6.01	5.048	5.97	56.470	57.140	4.474
79.220	6.01	10	0,12	78.689	6.01	4.983	5.97	57.231	57.901	4.534
79.220	6.01	10	0,15	78.665	6.01	3.299	5.96	56.941	57.641	4.511
79.220	6.01	10	0,30	78.665	6.01	3.487	5.96	57.788	58.488	4.578
79.220	6.01	10	0,45	78.681	6.01	3.051	5.95	57.298	57.978	4.539
79.220	6.01	10	1,0	78.713	6.01	3.366	5.95	57.686	58.326	4.57
79.220	6.01	10	1,30	78.721	6.01	3.340	5.90	57.959	58.589	4.592
79.220	6.01	10	2,0	78.713	6.01	3.325	5.89	58.237	58.877	4.614

ตารางที่ ก.3(ต่อ) ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6 โดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำเสียตัวอย่าง)	เวลาที่ใช้ ในการเขย่า (ชั่วโมง, นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ  (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			ไม่เติมชานอ้อย		เติมชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
				ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
79.220	6.01	10	2,30	78.729	6.01	3.437	5.89	58.253	58.873	4.615
79.220	6.01	10	3,0	78.745	6.01	3.081	5.88	56.839	57.439	4.503
79.220	6.01	10	4,0	78.721	6.01	3.332	5.87	57.880	58.510	4.585
79.220	6.01	10	5,0	78.721	6.01	3.660	5.87	57.952	58.582	4.591
79.220	6.01	10	6,0	78.721	6.01	3.564	5.86	57.374	58.004	4.545

ตารางที่ ก.4 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของชานอ้อยปรับสภาพ ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 5 มก./ล.และพีเอช 6 ที่ปริมาณชานอ้อยต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ปริมาณชานอ้อยที่ใช้ (ก./ล.น้ำเสียตัวอย่าง)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง				ร้อยละการกำจัด		ความสามารถ ในการดูดซับ  (มก./ก. ชานอ้อย)
ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช		ไม่เต็มชานอ้อย		เต็มชานอ้อย		การดูดซับ	การดูดซับ ร่วมกับ การตกตะกอน	
			ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้น โลหะหนัก (มก./ล.)	พีเอช			
5  4.916	6	0.2	4.906	6.02	4.438	5.44	9.438	9.723	2.320
	6	0.3	4.906	6.02	4.402	5.45	10.171	10.456	1.667
	6	0.5	4.906	6.01	3.727	5.45	23.895	24.18	2.350
	6	1	4.906	6.03	2.909	5.43	40.541	40.833	1.993
	6	5	4.906	6.03	0.893	5.45	81.550	81.828	0.802
	6	10	4.906	6.04	0.415	5.43	91.273	91.558	0.449
	6	15	4.906	6.03	0.543	5.42	88.67	88.954	0.291
	6	20	4.906	6.02	0.488	5.40	89.788	90.073	0.221





ภาคผนวก ข  
ตารางผลการทดลองขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ข1** ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของชานอ้อยปรับสภาพต่างๆ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์	สัดส่วนการ แทนที่ซีเมนต์	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลนิวตัน)				10 เปอร์เซ็นต์
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
0.45	0%	48*	59	58	58	5.9
	5%	19	19	15*	19	1.9
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.50	0%	46	47	51	48	4.8
	5%	9	11*	9	9	0.9
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.55	0%	40	42	44	42	4.2
	5%	6	6	6	6	0.6
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.60	0%	35	33	35	34	3.5
	5%	4*	3	3	3	0.3
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***

หมายเหตุ: \* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย

(3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

\*\* ขึ้นเป็นรูปก้อนมอร์ต้าได้แต่สามารถอ่านค่าได้น้อยมาก

\*\*\* สัดส่วนของก้อนมอร์ต้าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์	สัดส่วนการ แทนที่ซีเมนต์	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม. <sup>2</sup> )				10 เปอร์เซ็นต์
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
0.45	0%	196*	241	236	239	23.9
	5%	77	77	62*	77	7.8
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.50	0%	188	192	208	196	19.6
	5%	37	45*	37	37	3.7
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.55	0%	163	171	179	171	17.1
	5%	24	24	24	24	2.5
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***
0.60	0%	143	137	143	141	14.07
	5%	16*	12	12	12	1.2
	10%	**	**	**	**	**
	15%	***	***	***	***	***

หมายเหตุ: \* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย  
(3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

\*\* ขึ้นเป็นรูปก้อนมอร์ต้าได้แต่สามารถอ่านค่าได้น้อยมาก

\*\*\* สัดส่วนของก้อนมอร์ต้าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ข2** ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขาน้อยปรับสภาพ 0% และ 5% อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลนิวตัน)				10 เปอร์เซ็นต์
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
0%	7	45	47	43	45	4.5
	14	50*	59	58	58	5.9
	28	53	48	35*	51	5.1
5%	7	10	15*	11	10	1.1
	14	14	14	19*	14	1.4
	28	19	19	20	19	1.9

**หมายเหตุ:** \* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม. <sup>2</sup> )				10 เปอร์เซ็นต์
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
0%	7	238.80	252.70	229.73	240.41	24.04
	14	283.16	256.45	186.99*	269.80	26.98
	28	267.13*	315.21	309.87	312.54	31.25
5%	7	75.74	112.62*	82.59	78.83	7.88
	14	105.11	105.11	142.66*	105.11	10.51
	28	142.66	142.66	150.17	145.16	14.52

**หมายเหตุ:** \* กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด



ภาคผนวก ค.  
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก.)



(ข.)



(ค.)



(ง.)

### รูปที่ ค1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

(ก.) ชานอ้อย

(ข.) ชานอ้อยปรับสภาพขนาด 200 ไมครอน

(ค.) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราช้าง (Ordinary Portland Cement, OPC)

(ง.) ทรายละเอียด



(ก.)



(ข.)

รูปที่ ค2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพขาน้อยและขั้นตอนการดูดซับ

(ก.) เครื่องแยกขนาด

(ข.) เครื่องเขย่า (Shaker)



(ค.)



(ง.)

รูปที่ ค2 (ต่อ) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพขาน้อยและขั้นตอนการ  
ดูดซับ

(ค.) เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรมิเตอร์

(ง.) หลอดทดลองผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร





(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ ค3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง

(ก.) แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร<sup>3</sup>

(ข.) เครื่องผสมมอร์ต้าและคอนกรีต

(ค.) เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่าง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ ค4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก.) ขวดพลาสติกมีฝาปิด ขนาด 2 ลิตร

(ข.) เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator)



ภาคผนวก ง.  
วิธีการทดลองโดยละเอียด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง.1 การหาค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C127-88

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้วัสดุประมาณ 5 กก. ล้างให้สะอาดด้วยน้ำเพื่อกำจัดเศษฝุ่นที่ติดตามผิววัสดุ จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1-3 ชม. หลังจากนั้นนำวัสดุทั้งหมดแช่ในน้ำเป็นเวลา  $24 \pm 4$  ชม.
2. เมื่อนำวัสดุออกจากน้ำแล้ว เกลี่ยตัวอย่างวัสดุลงบนผ้าที่ซับน้ำได้ดี สังเกตกระทั่งแผ่นฟิล์มของน้ำที่เคลือบผิววัสดุหายไป ซึ่งถือเป็นวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง
3. ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและอบแห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส
4. คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุ

### การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = [(S-A) / A] \times 100$$

(% Absorption)

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (Over dry weight)  
 S = น้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry weight)

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ง.2****การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด**

อ้างอิงมาตรฐาน

ASTM C109-95

**ขั้นตอนการทดลอง****การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง**

1. ทาน้ำมันบางๆที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
2. ทาน้ำมันชนิดชั้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
3. เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
4. ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

**การหล่อก้อนตัวอย่าง**

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้โมลด์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup> โดยซึ่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่างในแต่ละการผสม
2. การผสมใช้วิธีการผสมด้วยเครื่องผสม โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน เมื่อเข้ากันดีแล้ว เติมน้ำลงผสมและทิ้งให้ซึมตัวด้วยน้ำ 30 วินาที เริ่มผสมให้เข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังจากผสมเสร็จ การหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมน้ำส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้ง ใช้ Tamper กระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ขึ้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

### การหาค่ากำลังรับแรงอัด

ให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เวลาที่ทดสอบ	ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
1 วัน	$\pm 1/2$ ชม.
3 วัน	$\pm 1$ ชม.
7 วัน	$\pm 3$ ชม.
28 วัน	$\pm 12$ ชม.

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้านที่สัมผัสกับพื้นตัวอย่างจะต้องเรียบ ในการให้แรงกดกับแท่งตัวอย่าง จะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ที่ 20-80 วินาที

### การคำนวณ

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในค่าของ กก./ตร.ซม. โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.1 กก./ตร.ซม. หรือ kPa

ก้อนตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ในการทดสอบแต่ละครั้ง หากมีผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างใดที่มีค่าเบี่ยงเบนเกินกว่า 10% ของค่าเฉลี่ย ควรตัดผลการทดสอบนั้นออกและนำก้อนใหม่มาวัดแทน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก.3 การทดสอบการชะละลายของสาร

อ้างอิงตามมาตรฐาน ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) หาค่าความเป็นกรดต่าง พีเอชของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. วัดค่าพีเอช และความนำไฟฟ้าของน้ำสกัด

#### ความสามารถในการถูกชะละลาย

$$L = W_i / W_0$$

โดยที่ L = ความสามารถในการถูกชะละลาย

$W_i$  = ปริมาณของสารในน้ำชะละลาย

$W_0$  = ปริมาณของสารในวัสดุที่มีในก้อนตัวอย่างทั้งหมด

### ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของสาร

$$E = [(L_0 - L_s) / L_0] \times 100$$

โดยที่ E = ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของสาร (%)

$L_0$  = ความสามารถในการถูกชะละลายของสารก่อนการทำลายฤทธิ์ (มิลลิกรัม/กรัม)

$L_s$  = ความสามารถในการถูกชะละลายของสารภายหลังการทำให้เป็นก้อน (มิลลิกรัม/กรัม)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก จ.  
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม  
และนิคมอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

“น้ำเสีย” หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

“การบำบัดน้ำเสีย” หมายความว่า กระบวนการทำหรือปรับปรุงน้ำเสียเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2535) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม แต่ทั้งนี้ห้ามมิให้ใช้วิธีการทำให้เจือจาง


มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังตารางที่ ๑1

### ตารางที่ ๑1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	- 5.5-9.0	- pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	- ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	- ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	- กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. อุณหภูมิ (Temperature)	- ไม่เกิน 40 °C	- เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
5. สีหรือกลิ่น	- ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	- ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	- ไม่เกิน 0.1 มก./ล.	- Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	- ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	- กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	- สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Amino-antipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	- Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตว์ (Pesticide)	- ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	- Gas- Chromatography
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	- ไม่เกิน 20 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	- Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5วัน

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
14. ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	- ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	- Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	- ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	-Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี 2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) 3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium) 4. ทองแดง (Cu) 5. แคดเมียม (Cd) 6. แบเรียม (Ba) 7. ตะกั่ว (Pb)	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล. - ไม่เกิน 0.25 มก./ล. - ไม่เกิน 0.75 มก./ล. - ไม่เกิน 2.0มก./ล. - ไม่เกิน 0.03 มก./ล. - ไม่เกิน 1.0 มก./ล. - ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	- Atomic Absorption Spectrometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductive Coupled Plasma : ICP



ภาคผนวก จ.  
การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่ว  
ด้วยวิธีตกตะกอน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ฉ. การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีตกตะกอน

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานแบตเตอรี่แห่งหนึ่ง โดยมี ความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 30 มก./ล. พีเอช 2

ในการกำจัดตะกั่วของโรงงานแบตเตอรี่ ใช้วิธีการปรับพีเอชขึ้นให้อยู่ในช่วงที่เป็นด่าง เพื่อให้ตะกั่วที่อยู่ในน้ำเสียตกตะกอนออกมา หลังจากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนตะกั่วออกไปแล้วมาปรับพีเอชอีกครั้ง ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง เพื่อให้พีเอชได้เท่ากับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ดังนั้นจึงมีการคำนวณค่าใช้จ่ายสารเคมีกรดและด่างที่ต้องใช้ในการปรับพีเอช และค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน  $Pb(OH)_2$  ที่เกิดขึ้น ดังนี้

#### การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอช

น้ำเสียจากโรงงานมีพีเอชเริ่มต้นประมาณ 2 ใช้ปริมาตรในการทดลองคิดค่าใช้จ่าย 100 มล. เริ่มต้นปรับพีเอชให้มาอยู่ในช่วงประมาณ 10 โดยใช้ NaOH 6N. ปริมาตร 2.0 มล. ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณ NaOH เท่ากับ (นพดล ฉัตรตระกูล, 2543)

$$\begin{aligned} (6N \times 2.0 \times \text{มวลโมเลกุล}) / 1000 &= 0.48 \text{ กรัม/100มล.} \\ &= 4800 \text{ กรัม/ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้ NaOH เท่ากับ 4800 กรัม

ราคาของ 50% NaOH กิโลกรัมละ 8 บาท

เพราะฉะนั้นการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้เงินเท่ากับ 77 บาท

ขั้นต่อไปนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์ นำไปปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ด้วยกรด  $H_2SO_4$  0.1N ปริมาตร 2 มล. และ  $H_2SO_4$  6N ปริมาตร 0.23 มล. ดังนั้นจะต้องใช้  $H_2SO_4$  เท่ากับ

$$(0.1 \times 2) / 1000 + (6 \times 0.23) / 1000 = 1.58 \times 10^{-3} N$$

$$\text{เพราะฉะนั้นน้ำหนักของ } H_2SO_4 = 1.58 \times 10^{-3} N \left[ \frac{(2 + 32 + 16)4}{2} \right]$$

$$= 0.077 \text{ กรัม/100 มล.}$$

$$= 770 \text{ กรัม/ลบ.ม.}$$

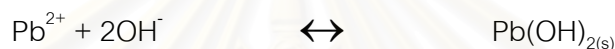
ดังนั้นน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เท่ากับ 770 กรัม

ราคาของ 80% $\text{H}_2\text{SO}_4$  อยู่ที่กิโลกรัมละ 6.7 บาท

เพราะฉะนั้นการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลบ.ม. ต้องใช้เงินเท่ากับ 6.5 บาท

### การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์

สมการตกตะกอนของตะกั่ว



จากสมการ  $\text{Pb}^{2+}$  1 โมล จะทำให้เกิด  $\text{Pb}(\text{OH})_{2(s)}$  1 โมล และน้ำเสียจากโรงงานมีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นประมาณ 30 มก./ล. คิดเป็น 0.145 ม.โมล/ล. ดังนั้นต้องเกิดตะกอนของ  $\text{Pb}(\text{OH})_{2(s)}$  เท่ากับ 0.145 ม.โมล/ล. ด้วย

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นจะเกิด } \text{Pb}(\text{OH})_{2(s)} &= 0.145 \times [207.17 + 2(16+1)] \\ &= 34.97 \text{ มก./ล.} \\ &= 0.035 \text{ กก./ลบ.ม.} \end{aligned}$$

กำหนดให้ sludge = 10% solid content

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นปริมาณ sludge} &= \frac{0.035}{0.1} \\ &= 0.35 \text{ กก./ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ราคาการกำจัด sludge  $\text{Pb}(\text{OH})_{2(s)}$  ซึ่งได้ทำการสอบถามจากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) (GENCO) อยู่ในอัตรา 5000 บาทต่อตัน หรือ 5 บาทต่อ กก.

ดังนั้นจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด sludge เท่ากับ

$$0.35 \times 5 = \underline{1.75} \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่าใช้จ่ายรวม} &= 77+6.5+1.75 \\ &= \underline{85.25} \text{ บาท/ลบ.ม.} \end{aligned}$$

แต่ทั้งนี้ยังไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายในการขนส่งกากตะกอนที่จะนำไปส่งเงินกู้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววันวิภา เผ่าสวัสดิ์ เกิดวันที่ 19 เมษายน 2520 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย