การนำเถ้าลอยชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง

นายภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4889-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Mr. Panupong Satidwattanaporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Enviromental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4889-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำเถ้าลอยชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง
โดย	นายภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

ภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร : การนำเถ้าลอยชานอ้อยไปใช้ดูดซับตะกั่วแล้วนำไปทำเป็นก้อนแข็ง (UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH AS ADSORBENT MATERIAL FOR LEAD REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION OF SPENT MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, 105 หน้า. ISBN 974-17-4889-2

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล เพื่อใช้กำจัดตะกั่ว จากนั้นนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ดูดซับตะกั่วแล้วมาทำเป็นก้อนแข็งโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา โดยในส่วนของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการทดลองแบบแบตช์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละความเข้มข้นจะทำการปรับเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 2 ถึง 6

ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและที่พีเอช 6 เป็นพีเอชที่กำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด โดยมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดในการทดลองนี้ คือ พีเอชเท่ากับ 6 มีเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 นาที โดยจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 99.46 มีความสามารถในการดูดซับคิดเป็น 8.019 มิลลิกรัมต่อกรัมเถ้าลอยชานอ้อย ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับทั้งแบบแลงมัวร์และแบบฟรุน ดลิช

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วแล้ว มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย ผลการทดสอบสมบัติของเถ้าลอยชานอ้อย สรุปได้ว่า เถ้าลอยชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วแล้วสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 67.10 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ภาควิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต .....ภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร.....

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

ปีการศึกษา.....2546.....

##4470453621 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : Adsorption / Cement replacement / Lead / Bagasse fly ash

PANUPONG SATIDWATTANAPORN : UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH AS ADSORBENT METERIAL FOR LEAD REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION OF SPENT METERIAL, THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 105 pp. ISBN 974-17-4889-2

The research was conducted to determine the efficiency of lead removal by bagasse fly ash, a waste product in sugar industry, before solidification with cement and adsorbed bagasse fly ash. Batch experiments were desgined to study the effect of initial concentration and initial pH value of synthetic wastewater containing lead at ambient temperature. The adsorption of lead was studied over a pH range of 2.0 to 6.0 at each initial concentration.

The results showed that adsorption capacity increased when the initial concentration increased. Considering the results of condition in terms of pH values, the highest removal efficiency was obtained at the pH range of 4 to 6. The best condition for lead removal was found at the concentration of 80 mg/l, the pH of 6, and the contact time of 3 minutes. Removal of the lead was achieved up to 99.46 percent under optimum condition. Bagasse fly ash adsorption capacity for lead was 8.019 mg/g. The adsorption isotherm for lead removal was best fitted both Langmuir and Freundlich model.

The experimental results of solidification of adsorbed bagasse fly ash by cement indicated that adsorbed bagasse fly ash could not be classified as a pozzolanic material according to ASTM C618 requirements. Adsorbed bagasse fly ash – cement mortars showed slightly lower compressive strengths than the control mortars. Adsorbed bagasse fly ash – cement mortars can be used to directly replace portland cement up to 10 percent by weight with a 1:2.75 ratio of binder to sand and a water to cement of 0.5. The 28-day unconfined compressive strength of this optimum mortar mix possessed satisfactory strength of about 67.10 percent of that of the control. Finally, the amount of all heavy metals in mortar leachates met the regulatory limits.

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

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 โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐพล อัษฎากร และบริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด ที่อนุเคราะห์เถ้าลอยชานอ้อยในงานวิจัยนี้

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรักความเข้าใจและกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ตะกั่ว	4
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	9
2.3 กระบวนการดูดติดผิว	11
2.4 การผลิตน้ำตาล	18
2.5 การหล่อแข็ง	22
2.6 วัสดุประสาน	24
2.7 เถ้าลอย	27
2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน	29
2.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	30
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย	35
3.1 แผนการวิจัย	35
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	40
3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเถ้าลอยชานอ้อย	41
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว	41
3.5 การดำเนินการทดลอง	41

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	44
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	44
4.2 ขั้นตอนการดูดซับ.....	53
4.3 ขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง.....	63
4.4 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ความสำคัญทางงานวิศวกรรม.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง.....	82
ภาคผนวก ข. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	96
ภาคผนวก ค. ภาพถ่ายเถ้าลอยชานอ้อยและก้อนมอร์ตา.....	101
ภาคผนวก ง. ภาพอุปกรณ์และเครื่องมือ.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 25
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 25
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 26
ตารางที่ 2.4 สารประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์,เถ้าลอยชานอ้อยและปูน
ซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่1..... 28
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองขั้นที่ 1..... 36
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองขั้นที่ 2..... 37
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองขั้นที่ 3..... 38
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองขั้นที่ 4..... 39
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 46
ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เถ้าลอยชานอ้อยและ
เถ้าลอยลิกไนต์..... 49
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยกับมาตรฐาน
การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96)..... 50
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของน้ำสกัด ของเถ้าลอยชานอ้อย.....51
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น
เป็น 6 ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ..... 60
ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับ
มอร์ตาธรรมดาที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน..... 63
ตารางที่ 4.7 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับ
มอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มเท่ากับ 7 วัน..... 64
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย..... 67
ตารางที่ 4.9 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับ
มอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน..... 68
ตารางที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยและร้อยละกำลัง
รับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ที่อายุการบ่ม 7 วัน..... 70

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน..... 71
ตารางที่ 4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนัก..... 71
ตารางที่ ก1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. พีเอช 4 โดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ..... 83
ตารางที่ ก2 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล. ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ..... 84
ตารางที่ ก3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6 โดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ..... 87
ตารางที่ ก4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของเถ้าลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 มก./ล. พีเอช 6 โดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณต่างๆ..... 88
ตารางที่ ก5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 89
ตารางที่ ก6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 89
ตารางที่ ก7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 90
ตารางที่ ก8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 90
ตารางที่ ก9 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 91

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก10 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 20โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 91
ตารางที่ ก 11 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ..... 92
ตารางที่ ก12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาธรรมดา โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน..... 93
ตารางที่ ก13 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน..... 94
ตารางที่ ก14 ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดของมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน 95
ตารางที่ ข1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... 97

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ..... 5
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี..... 6
รูปที่ 2.3 สมดุลการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส..... 7
รูปที่ 2.4 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของแข็ง..... 12
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์..... 14
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C/q_e และ C..... 16
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C$ 17
รูปที่ 2.8 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา..... 21
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคเถ้าลอยชานอ้อย..... 44
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อย..... 45
รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 45
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์..... 46
รูปที่ 4.5 เถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 750 เท่า..... 47
รูปที่ 4.6 เถ้าลอยชานอ้อยที่กำลังขยาย 1,500 เท่า..... 47
รูปที่ 4.7 เถ้าลอยลิกไนต์ที่กำลังขยาย 750 เท่า..... 48
รูปที่ 4.8 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อย..... 52
รูปที่ 4.9 ผล XRD ของตัวอย่างวัสดุที่อยู่ในรูปอสัณฐาน..... 52
รูปที่ 4.10 ผล XRD ของตัวอย่างวัสดุที่อยู่ในรูปควอทซ์..... 52
รูปที่ 4.11 ผล XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์..... 53
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4..... 54
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 4..... 54
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับ) ของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ..... 56

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ..... 56
รูปที่ 4.16 ผล XRD ของเถ้าลอยชานอ้อยก่อนนำมาดูดซับตะกั่ว..... 58
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 6..... 59
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อย 10 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ที่พีเอช 6..... 59
รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์..... 61
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช..... 61
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน..... 64
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆโดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน..... 65
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่มของมอร์ตาธรรมดาและมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5..... 68