

การนำถ้ำลอยซาน้อยไปใช้ดูตลับกำจัดโคโรเมียมแล้วนำไปทำให้เป็นก้อนแข็ง



นาย ธีระชัย วัฒนสกุลเอก

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4811-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Mr. Theerachai Wattanasakulake

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 974-17-4811-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำถ้ำลอยซานฮ้อยไปใช้ดูดซับกำจัดโครเมียมแล้วนำไปทำเป็น
ก้อนแข็ง
โดย นาย ชีระชัย วัฒนสกุลเอก
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาย วีระชัย วัฒนสกุลเอก: การนำเถ้าลอยชานอ้อยไปใช้ดูดซับกำจัดโครเมียมแล้วนำไปทำให้เป็นก้อนแข็ง (UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH AS ADSORBENT MATERIAL FOR CHROMIUM REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION OF SPENT MATERIAL)
 อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชกรกิจ, 114 หน้า. ISBN 974-17-4811-6.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพของเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล เพื่อใช้กำจัดโครเมียมจากนั้นนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ดูดซับโครเมียมแล้วมาทำเป็นก้อนแข็งโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ต้า โดยในส่วนของกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชต่างๆ แต่ละความเข้มข้นจะทำการปรับค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 6

ผลการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชของน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ลดลงความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มขึ้น และที่พีเอช 1 เป็นพีเอชที่กำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมคือที่ความเข้มข้นโครเมียมสูงกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ที่พีเอชเท่ากับ 1 ใช้เวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ซึ่งความสามารถในการดูดซับโครเมียมจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมที่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป จะได้ความสามารถในการดูดซับโครเมียมประมาณ 0.60 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมเถ้าลอยชานอ้อย แต่ในด้านประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นโครเมียม ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยพบว่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดโครเมียมแล้วมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ต้า ซึ่งสรุปผลการศึกษาดังกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยได้ว่า เถ้าลอยชานอ้อยไม่สามารถจัดเป็นวัสดุพอลิไซลันตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ต้าได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 79.67 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา

และสำหรับผลการวิเคราะห์การชะละลายโครเมียมในน้ำชะของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม พบว่า ค่าการชะละลายมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิติดี

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546.....

##4370342521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : ADSORPTION / CEMENT REPLACEMENT/ CHROMIUM / BAGASSE FLY ASH

THEERACHAI WATTANASAKULAKE : UTILIZATION OF BAGASSE FLY ASH AS ADSORBENT MATERIAL FOR CHROMIUM REMOVAL WITH SUBSEQUENT SOLIDIFICATION OF SPENT MATERIAL. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 114pp. ISBN 974-17-4811-6.

This research was conducted to determine the hexavalent Chromium removal efficiency of and the Chromium adsorption capacity by bagasse fly ash, a waste product from sugar industry, before solidifying with cement and adsorbed bagasse fly ash. The batch experiments were carried out to study the effect of initial concentration and initial pH values of synthetic wastewater containing Chromium. The adsorption of Chromium was studied over a pH range of 1.0 - 6.0 at each initial concentration.

The results show that the Chromium removal efficiency of and the Chromium adsorption capacity increased when the initial pH values of synthetic wastewater decreased. The highest Chromium removal efficiency was showed at pH of 1. The equilibrium adsorption was reach at 30 minutes for each initial concentration. The Chromium adsorption capacity was approximately 0.60 mg/g for each initial concentration over 20 mg/l. On the other hand, the result of condition in term of initial concentration showed the Chromium removal efficiency related to the initial concentration negatively. The adsorption isotherm for Chromium removal was fitted in the both, Freundlich and Langmuir isotherm.

The experimental results of cement fixation indicated 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. 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 percentages of the controlling sample.

Finally, the Chromium leachability of all adsorbed bagasse fly ash – cement mortars met the regulatory limits of the Department of Industries (1997).

DepartmentEnvironmental Engineering..... Student's signature

Field of studyEnvironmental Engineering..... Advisor's signature

Academic year2003.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วง

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

ขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถานที่ในการทำงานวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณบริษัทไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล จำกัด ที่อนุเคราะห์ถ้ำลอยชานอ้อย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ขอบพระคุณบิดา มารดา และน้อง ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	6
2.3 การดูดติดผิว.....	11
2.4 อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล.....	16
2.5 การหล่อแข็ง.....	23
2.6 วัสดุประสาน.....	25
2.7 ถ้ำลอย.....	28
2.8 ปฏิริยาไฮเดรชันและปฏิริยาปอซโซลาน.....	30
2.9 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	31
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 แผนการวิจัย.....	42
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อย.....	48
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	48
3.5 การดำเนินการทดลอง.....	48
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	51
4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมถ้ำลอย.....	63
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	64
4.4 ขั้นตอนการทำการเป็นก้อนแข็ง.....	72
4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์.....	82
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การใช้สารประกอบ โครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	26
ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	26
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	27
ตารางที่ 2.5 สารประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 1.....	43
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 2.....	44
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 3.....	45
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 4.....	46
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	52
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์	53
ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของ เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	59
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของ เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	59
ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยชานอ้อย และเถ้าลอยลิกไนต์.....	60
ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อย.....	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ.....	70
ตารางที่ 4.8 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมถ้ำลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา....	72
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ห้่น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย.....	75
ตารางที่ 4.10 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมถ้ำลอยชานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา...	76
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ห้่น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย.....	77
ตารางที่ 4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน.....	78
ตารางที่ 4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้ถ้ำลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา.....	79
ตารางที่ ก1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 20 (20.44)* มก./ล. พีเอช 1 โดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ.....	90
ตารางที่ ก2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 20 (20.38)* มก./ล. พีเอช 2 โดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ.....	91
ตารางที่ ก3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับ ของถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ในการกำจัดโครเมียม ในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	92
ตารางที่ ก4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 20 (20.68)* มก./ล. พีเอช 1 โดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ.....	94
ตารางที่ ก5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 20 (20.12)* มก./ล. พีเอช 2 โดยใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ.....	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข1	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ.....	97
ตารางที่ ข2	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่มต่างกัน.....	98
ตาราง ค	ข้อมูลการทดลองการชะละลายของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อย ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ.....	100
ตารางที่ ง	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	102

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.5 แผนภูมิการผลิตน้ำตาล.....	20
รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	21
รูปที่ 2.5 การเผาขานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา.....	22
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครสโคป ของเถ้าลอยขานอ้อย.....	54
(ก) เถ้าลอยขานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	54
(ข) เถ้าลอยขานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า.....	54
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครสโคป ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	55
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครสโคป ของเถ้าลอยเถ้าลอยลิกไนต์.....	55
รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยขานอ้อย.....	57
รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	57
รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสม โดยปริมาตรของเถ้าลอยขานอ้อย.....	58
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์.....	58
รูปที่ 4.8 ผล XRD ของเถ้าลอยขานอ้อย.....	62
รูปที่ 4.9 ผล XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์.....	62
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วยเถ้าลอยขานอ้อย 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 20 มก./ล. ที่พีเอช 1.....	65
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วยเถ้าลอยขานอ้อย 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 20 มก./ล. ที่พีเอช 2.....	66
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมของเถ้าลอยขานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	68
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดโครเมียมของเถ้าลอยขานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วยถ้ำลอยชานอ้อย 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 1.....	69
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ของถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 1.....	71
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ของถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มก./ล.ที่พีเอชเท่ากับ 1.....	71
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	73
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม ที่ปริมาณต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	73
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่ม ของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5.....	77
รูปที่ จ1 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง.....	107
รูปที่ จ2 เครื่องวัดพีเอช (pH meter).....	107
รูปที่ จ3 เครื่องผสมมอร์ต้า.....	108
รูปที่ จ4 แบบหล่อก้อนมอร์ต้า.....	108
รูปที่ จ5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	109
รูปที่ จ6 เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)	109
รูปที่ จ7 ตู้อบวัสดุ.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ จ8 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer).....	110
รูปที่ จ9 เครื่องเขย่า (Shaking machine).....	111
รูปที่ จ10 เครื่องทำน้ำ D.I.	111
รูปที่ จ11 ถ้ำลอยซานอ้อยก่อนร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200	112
รูปที่ จ12 ถ้ำลอยซานหลังร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200.....	112
รูปที่ จ13 ก้อนมอร์ต้าธรรมดาและก้อนมอร์ต้าผสมถ้ำลอยซานอ้อย ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมโดยแทนที่ซีเมนต์ ร้อยละ 10 , 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ w/c = 0.5 ระยะเวลา 7 วัน.....	113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสำคัญที่กำลังประสบในประเทศไทยปัญหาหนึ่ง เนื่องจากการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศและการขยายเศรษฐกิจภาคอุตสาหกรรมคือ ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ รวมทั้งการเร่งเพิ่มกำลังการผลิต ทำให้เกิดมลพิษต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศ ทางน้ำ หรือทางดินในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นตามกันไปด้วย โดยมลพิษที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดปัญหาที่สำคัญที่สุดคือ มลพิษทางน้ำหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั่นเอง โดยน้ำเสียที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสิ่งเจือปนหรือสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ปัญหาโลหะหนักที่เจือปนในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ถือว่าเป็นปัญหามลพิษที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่ต้องเร่งทำการแก้ไข เนื่องจากไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อมยังก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำ และยังสามารถถ่ายทอดสารพิษผ่านห่วงโซ่อาหารอีกด้วย ซึ่งน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

สำหรับการจัดการกับปัญหาโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียปัจจุบันจากแต่ละโรงงานอุตสาหกรรมจะเลือกใช้วิธีการบำบัดโลหะหนักที่แตกต่างกันไป โดยวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณโลหะหนักให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำใกล้เคียง ซึ่งวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน หรือใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน ซึ่งวิธีส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงเนื่องจากต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง ดังนั้นหากเราสามารถพัฒนาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียวิธีใหม่ที่สามารถแก้ไขจุดบกพร่องของวิธีที่เลือกใช้ในปัจจุบันได้ก็น่าจะเป็นหนทางที่ดีทางหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสามารถนำของเสียหรือวัสดุเหลือใช้จากขั้นตอนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้พัฒนาเป็นตัวช่วยในการกำจัดโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ยิ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์คุ้มค่าเป็นทวีคูณ

ปัจจุบันน้ำตาลถือว่าเป็นผลผลิตส่งออกที่สำคัญของประเทศเป็นอันดับต้นๆ โดยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลในประเทศไทยจะใช้อ้อยซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศเป็นวัตถุดิบในขั้นตอนการผลิต โดยเริ่มแรกอ้อยจะถูกทำให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วจึงนำเข้าเครื่องหีบนำอ้อยออกมา ซึ่งน้ำอ้อยที่ได้จะนำไปผ่านกระบวนการทำให้สะอาดและนำเข้าหม้อต้มระเหยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลต่อไป ซึ่งเศษวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นก็คือ เศษอ้อยที่ผ่านการหีบน้ำตาลแล้วหรือที่เรียกว่า ชานอ้อย ซึ่งในปีการผลิตหนึ่งๆจะมีชานอ้อยที่เหลือทิ้งในปริมาณที่สูงกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของชาน

อ้อยเหล่านี้ จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับหม้อต้มระเหยในโรงงานน้ำตาลเอง ซึ่งภายหลังจากการเผาไหม้จะเกิดเถ้าลอยขึ้นประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ จึงประมาณได้ว่าเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีประมาณ 60,000 ถึง 120,000 ตันต่อปี

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในปริมาณมากมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่พบว่าสามารถนำเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้ประโยชน์ในด้านการดูดซับโลหะหนักหลายชนิด ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้เป็นสารดูดซับในการกำจัดโลหะหนักโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดังกล่าว และการนำเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับแล้วไปทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการศึกษาสถานะของน้ำเสียเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก รวมถึงสถานะที่เหมาะสมในการทำเป็นก้อนแข็ง ซึ่งหากการกำจัดโลหะหนักดังกล่าวในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพที่สูงพอที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง ก็น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาเพื่อผลิตสารดูดซับที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เถ้าลอยขานอ้อยเป็นตัวดูดซับ

1.2.2 ศึกษาผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

1.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลที่ผ่านการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1.2.4 ศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านกระบวนการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ไปทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้ำลอยชานอ้อยมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมมาทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ถ้ำลอยชานอ้อยจัดว่าเป็นของเสียจากโรงงานน้ำตาลในขั้นตอนการเผาไหม้ชานอ้อยเพื่อได้เป็นพลังงานความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งถ้ำลอยชานอ้อยที่นำมาใช้ทำการวิจัยครั้งนี้มาจากบริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด

ขั้นตอนการศึกษาการนำถ้ำลอยชานอ้อยมาใช้เป็นสารดูดติดผิว ใช้ถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 กรัม/ลิตรของน้ำเสียตัวอย่าง เพื่อใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจากโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดติดผิวของถ้ำลอยชานอ้อยจากน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในช่วงค่าพีเอชตั้งแต่ 1 ถึง 6 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดผิว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการดูดซับของการกำจัดโครเมียมอีกด้วย

ขั้นตอนการศึกษาการนำถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมมาทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น จะนำก้อนแข็งที่ได้ดังกล่าวมาทดสอบสมบัติดังนี้คือ ระยะเวลาการบ่ม กำลังรับแรงอัด รวมถึงการชะละลาย โดยการทดลองจะแปรเปลี่ยนค่าปริมาณถ้ำลอยชานอ้อยหลังจากการดูดซับโครเมียมที่ใช้นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 ค่า คือ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

การวัดปริมาณโครเมียมในน้ำเสียในขั้นตอนการดูดซับและขั้นตอนการชะละลาย ใช้วิธี อะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) และการวัดค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง ใช้เครื่องมือทดสอบการรับแรงอัด (Compressive Strength Testing Machine)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการนำถ้ำลอยชานอ้อย ซึ่งถือว่าเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ไม่ว่าจะในด้านการนำมากำจัดโครเมียมในน้ำเสียและ/หรือการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

1.4.2 เป็นการนำสารดูดติดผิวชนิดใหม่ที่ได้จากของเสียที่มีราคาถูกมาใช้แทนถ่านกัมมันต์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันที่มีราคาค่อนข้างแพง

1.4.3 ผลที่ได้จากการทดลองนี้ อาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียรวมถึงการจัดการกากตะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักโครเมียมเจือปนอยู่

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โดยทั่วไปโลหะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ โลหะหนักส่วนใหญ่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว สะท้อนแสงได้ดี และมีความเหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนักคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ และเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ จะทำให้โลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในน้ำ ดิน อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จากนั้นจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตและร่างกายมนุษย์โดยถ่ายทอดผ่านทางห่วงโซ่อาหาร ซึ่งโลหะหลายชนิดมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

2.1.1 โครเมียม

โครเมียมในรูปธาตุอิสระ (Cr) เป็นสารที่ไม่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะพบในรูปสารประกอบออกไซด์ของสินแร่ Chromite อยู่ในรูป Chromic oxide (Cr_2O_3) ร่วมกับ FeO มีสูตรโดยทั่วไปเป็น $FeO \cdot Cr_2O_3$ สินแร่ Chromite นอกจากจะมี Cr_2O_3 และ FeO เป็นองค์ประกอบแล้วยังมี Magnesium, Aluminium และ Silica ปะปนอยู่ด้วย

โครเมียมเป็นโลหะทรานซิชัน อยู่ในหมู่ VI B มีเลขอะตอมเท่ากับ 24 มีน้ำหนักอะตอม 51.9961 จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,890 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเท่ากับ 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขออกซิเดชันหลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +6 และมีลักษณะสีขาวนวลสุกใส มีความฝืดต่ำ ไม่เป็นสนิม จึงนำมาผสมหรือชุบที่ผิวโลหะอื่น เพื่อป้องกันสนิมหรือเพิ่มความแข็งและเพิ่มความสวยงาม นอกจากนี้ยังมีนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นอย่างกว้างขวาง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ (Ullmann's, 1986 อ้างถึงใน
อดิศักดิ์, 2543)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แคตาไลส, ออกซิไดซ์ สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมการชุบโลหะ	โครเมียม(VI) ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียม (III) อะซิเตต, โครเมียม (III) ฟลูออไรด์	ย้อมสีผ้า

โครเมียมตัวสำคัญที่พบในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำในธรรมชาติมีเพียงโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ซึ่งพบมาก ส่วนโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันค่าอื่นจะพบน้อยมาก นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมปริมาณโครเมียมในน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) เป็นสิ่งสำคัญในการคงอยู่ของโครเมียมในสิ่งแวดล้อม

2.1.2 โครเมียมในสิ่งแวดล้อม

โครเมียมถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเหล็ก วัสดุอัลลอย อลูมิเนียม โลหะ สีย้อมและสีต่างๆ สารเคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม และใช้ในโรงงานฟอกหนัง การแพร่กระจายของโครเมียมเข้าสู่สิ่งแวดล้อม เกิดจากการทิ้งของเสียที่มีการปนเปื้อนของโครเมียมในการผลิตทางอุตสาหกรรม การทิ้งน้ำเสียที่มีโครเมียมปะปนอยู่ โดยโครเมียมที่อยู่ในรูปประจุ +3 และ +6 เป็นสภาวะที่พบมากในธรรมชาติ ซึ่งโครเมียมในรูปประจุ +3 (Trivalent chromium) หรือ Cr (III) สามารถเปลี่ยนรูปเป็นโครเมียมประจุ +6 (Hexavalent chromium) หรือ Cr (VI) ซึ่งเป็นสารพิษที่ไม่คงตัวในสภาพ

ธรรมชาติ สามารถเคลื่อนที่ในดินเป็นการเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.3 การแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

การเปลี่ยนรูปไอออนของโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ขึ้นกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน

1) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเปลี่ยนรูปจากโครเมียม (III) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (VI) พบว่า สารประกอบที่เป็นตัวออกซิไดซ์โครเมียมในน้ำคือ แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ก็สามารถออกซิไดซ์โครเมียมได้

2) ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (VI) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (III) พบว่า สารประกอบที่เป็นตัวรีดิวซ์โครเมียมคือ ซัลไฟด์, การเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์และเหล็ก (II) โดยปฏิกิริยารีดักชันนี้เกิดขึ้นในสภาพเป็นกรด มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2-3

เนื่องจากโครเมียมมีการเปลี่ยนรูปได้ในสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจในกระบวนการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (III) ไปเป็นโครเมียม (VI) ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งโครเมียม (VI) มีความเป็นพิษมากเป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคือง และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ทุกทาง ส่วนสารประกอบโครเมียม (III) มีอันตรายน้อยมากเกือบจะไม่เป็นพิษ ไม่สามารถดูดซึมเข้าสู่ทางเดินอาหาร ไม่ทำให้เกิดบาดแผล หรือโรคผิวหนัง

2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในหลายๆด้าน ดังนี้คือ

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
 - คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
 - พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
 - ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
 - ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่
- ซึ่งสามารถสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้วทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับ โลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาว หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาดังสมการ

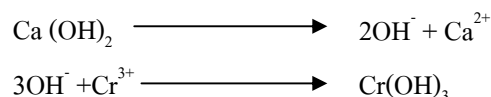


โดย M^{++} คือ โลหะไอออน

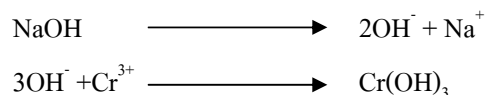
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วง พีเอชกว้าง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอชประมาณ 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีก ถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนไปจากค่าพีเอชที่ตกตะกอน

โดยทั่วไปการตกตะกอนโครเมียม (III) จะอยู่ในรูปโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ บางครั้งในการตกตะกอนทางเคมีก็มีการใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอน เช่น โพลีเมอร์ เพื่อช่วยในการตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น ได้แก่

ปูนขาว เป็นสารที่มีราคาถูก สร้างตะกอนได้ดีเกิดตะกอนมาก ทำให้พีเอชสูง ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 3 – 60 นาที ขึ้นกับคุณภาพของปูนขาว โดยปูนขาวจะทำปฏิกิริยาโซดาไฟ กับความเป็นด่างในและฟอสฟอรัสน้ำเสีย เกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียม โดยปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับโครเมียม (III) เป็นดังสมการ



โซดาไฟ เป็นสารที่มีราคาแพงกว่าปูนขาว แต่เป็นสารที่เหมาะสมกว่าเพราะการใช้ปูนขาวไม่คุ้มเนื่องจากอุปกรณ์เติมปูนขาวมีราคาแพง โดยปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟกับโครเมียม (III) เป็นดังสมการ



การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย M^{++} คือ โลหะไอออน

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อ เทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือเรื่องกลิ่นของก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออน นี้จะมีทั้งได้จากธรรมชาติ และชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเรซินนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และ จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกัน ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกันนี้เป็นไอออน ที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะ เรียกว่า แคทไอออนเอกเชนจ์ (Cation exchange) และถ้าเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนจ์ (Anion exchange)

วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัด สูงนิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือถ้ามีสาร ปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถังเรซินเพื่อทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูง ที่สุด และยังมีข้อเสียที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

2.2.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)

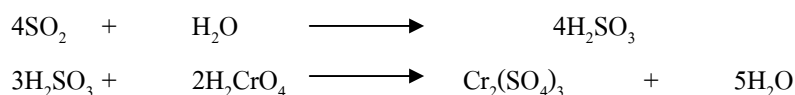
วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยหลักการความแตกต่างของแรงดัน ระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซิเตด และโพลีเอไมด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการ ออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศ ดังนั้นแผ่น เมมเบรนจึงต้องทนความดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออก ซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการ ล้างภาพ

2.2.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction).

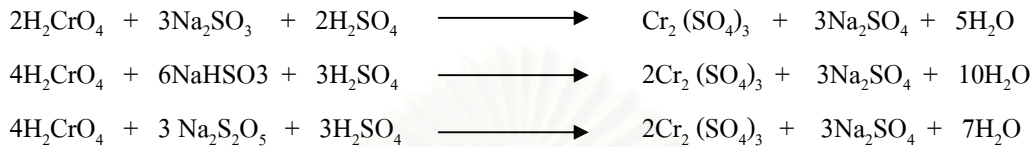
วิธีการนี้เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือ รีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่น ที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมต และไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิด รีดักชันได้แก่ เหล็ก (II) ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับตัวอย่าง การบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีออกซิเดชันได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะโดยใช้ คลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ส่วนตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชันได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจาก โรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกเจือปนอยู่โดยใช้เหล็ก (II) ซัลเฟต โดย ต้องทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำกว่า 3 หลังจากนั้นจึงเติมปูนขาวลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะ เห็น ได้ว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียม (VI) มีดังนี้

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) นิยมใช้เพราะมีราคาถูก แต่พบว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ เนื่องจากเป็นแก๊สพิษซึ่งสามารถรั่วซึมออกสู่ภายนอกได้ เมื่อใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟูรัส (H₂SO₃) จึงไม่จำเป็นต้องเติมกรดอีก ดังสมการ

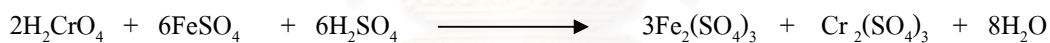


สารประกอบซัลไฟต์ ได้แก่ โซเดียมไบซัลไฟต์ (Na_2SO_3), โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (NaHSO_3), โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) เป็นสารรีดิวซ์จะทำให้เกิดต่างขึ้น ฉะนั้นจึงต้องเติมกรดเพื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 – 3 ปฏิกริยารีดักชันระหว่างโครเมียมกับสารประกอบซัลไฟต์ และกรดซัลฟูริกเป็นดังสมการ



เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) อยู่ในรูปของของแข็ง หรืออาจเตรียมเป็นสารละลายก่อนใช้รีดิวซ์โครเมียม (VI) โดยใช้ร่วมกับกรดซัลฟูริกที่พีเอช 2 – 3 แต่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตจะทำให้เกิดตะกอนมากกว่าใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เนื่องจากเหล็ก (II) จะออกซิไดซ์เป็นเหล็ก (III) มาทำปฏิกิริยากับโครเมียม (VI) และเกิดได้เร็วกว่าที่พีเอชต่ำกว่า 3

ดังนั้นเมื่อกำจัดโครเมียม ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์จะเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) มาก ปฏิกริยารีดักชันระหว่างโครเมียม (VI) กับเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และกรดซัลฟูริก เป็นดังสมการ



2.2.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด (ขั้วบวก) และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนด (ขั้วลบ) ตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงาน ไฟฟ้าสูงมาก

2.2.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นการระเหยเอาน้ำออกซึ่งเป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา และการระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ วิธีการบำบัด แบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

2.2.7 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออน ร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่น เมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีข้อเสีย ตรงมีค่าต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการ ได้

2.2.8 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูด ติดผิว ที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำโดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 Å^o กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ด สามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนถึงระดับที่ยอมรับได้ในน้ำดื่ม

2.3 การดูดติดผิว

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูด ติดผิว (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเคลื่อนที่เข้าใกล้สารดูดติด ผิว

การเกาะจับของผิวโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยการเกาะติดผิวด้วยแรงทาง ภายภาพ หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองร่วมกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดูดติดผิวทางกายภาพที่เกิดขึ้นมาจากผลแตกต่างของพลังงานและ/หรือแรงดึงดูดติดผิวทางไฟฟ้า (Van Der Waals force) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับ โมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้น โมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสาร ถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลาย การดูดติดผิวทางกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากการดูด ติดผิวมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูด

ติดผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของ แรงดูดติดผิวระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิว การหลุดออกของสารถูกดูดติดผิวสามารถ เกิดขึ้นได้เมื่อแรงดังกล่าวมีค่าน้อย

การดูดติดผิวด้วยแรงทางเคมี เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของสารดูดติดผิวเกิดเป็นสาร ประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนา ของชั้นโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้าง สารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจาก ปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง

สารที่มีอำนาจดูดติดผิวโมเลกุลต่างๆ ได้ หรือสารดูดติดผิวมีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. **ประเภทสารอนินทรีย์** เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก แอคติเวตเต็ด ซิลิกา(Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามสารดูดติดผิว ประเภทนี้มีข้อเสียคือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสาร ดูดติดผิวประเภทนี้มีจำกัดมาก

2. **ถ่านกัมมันต์** อันที่จริงสารดูดติดผิวชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3. **ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์** ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่ สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแอคติเวตเต็ดคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตามเรซินมี ข้อได้เปรียบกว่าคือสามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายกว่ามากและสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมักเป็น สารราคาถูกลง ความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดติดผิวอาจมีมากกว่าแอคติเวตเต็ดคาร์บอนเมื่อคำนึง ถึงข้อจำกัดในเรื่องการฟื้นฟูสภาพ

ปัจจุบันได้มีการผลิตสารดูดติดผิวสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมากมายหลายชนิด เพื่อใช้ ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งที่มีความสามารถในการดูดติดผิวและความคล่องตัวในการใช้งานน้อยกว่าแอคติเวตเต็ดคาร์บอน

2.3.1 กลไกการดูดติดผิว

กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดติดผิวมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาสารดูดติดผิว

2) การแพร่ภายนอก (External diffusion หรือ Film diffusion) เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงสารดูดซับซึ่งตามปกติจะมีฟิล์มของของเหลวหุ้มไว้โดยรอบคล้ายเยื่อต่างๆ โมเลกุล ต้องแทรกผ่านฟิล์มของของเหลวให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวของสารดูดซับ

3) การแพร่ภายใน (Internal diffusion หรือ Pore diffusion) เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ที่โพรง หรือช่องว่างภายใน โมเลกุลของตัวถูกละลายจึงต้องแทรกเข้าไปให้ถึงช่องว่างภายในของสารดูดซับจึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

4) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมกเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น ความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

2.3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้ โมเลกุลสารเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้ Pore diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ด้วยเหตุนี้ในกรณีความปั่นป่วน สูงอัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ Pore diffusion และในกรณีความปั่นป่วนต่ำอัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ Film diffusion

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive capacity)

3) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่นจึงเป็น สารที่ยากต่อ

การดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของสาร ดูดติดผิวได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถกล่าวได้เต็มที่มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวและความสามารถในการละลายน้ำ

4) ขนาดของสารที่ถูกดูดติดผิว

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรง ของสารดูดติดผิว จากการวิจัยพบว่า การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรง เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะ ถูกดูดเข้าไป ในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง

5) พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผล กระทบต่อการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็น ไอออนที่สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

6) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการ ดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยา แบบคายความร้อน

2.3.3 การดูดติดผิวที่สภาวะสมดุล (Adsorption Isotherm)

สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดกระบวนการดูดติดผิวว่า การดูดติดผิวที่จุดสมดุล ความสามารถของสารดูดติดผิว(Adsorption Capacity) สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในน้ำ (C_e) ที่อุณหภูมิคงที่ สมการความสัมพันธ์นี้เรียกว่า “Adsorption isotherm”

ความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความสามารถของสารดูดติดผิวและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในน้ำนั้นถือว่า โมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิวนั้นถูกดูดติดผิวที่ผิวของสารดูดติดผิวเพียงชั้น เดียว (Monolayer) อย่างไรก็ตามกระบวนการดูดติดผิวอาจจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยโมเลกุลของสารดูดติดผิวจะถูกดูดติดกับชั้นโมเลกุลก่อนหน้า

สมการของ Langmuir , สมการของ BET และ สมการของ Freundlich (Kenneth, 1992)

สมการของ Langmuir ถือว่าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนสมการของ Brunauer, Emmett, Teller (BET) ถือว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น และสมการของ Freundlich เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว

สมการของ Langmuir

$$Q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

สมการของ BET

$$Q_e = \frac{B C_s Q_0}{\{C_s - C_e\} [1 + (B-1)(C_e/C_s)]} \quad (2)$$

สมการของ Freundlich

$$Q_e = K C_e^{1/n} \quad (3)$$

โดยที่

Q_e	=	สมรรถนะของสารดูดซับคิดเป็นจำนวน โมล หรือน้ำหนักของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
m	=	น้ำหนักของสารดูดซับเป็นหน่วยกรัม
C_e	=	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล
C_s	=	ความเข้มข้นที่อิ่มตัวของสารถูกดูดซับในน้ำ
B	=	ค่าคงที่พลังงานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในการดูดซับ
Q_0, b	=	ค่าคงที่

สมการที่ 1, 2 และ 3 อาจเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4, 5 และ 6

สมการของ Langmuir

$$C_e/Q_e = 1/Q_0 b + C_e/Q_0 \quad (4)$$

สมการของ BET

$$C/[Q_e(C_s - C_e)] = 1/BQ_0 + (B-1)C_e/(BQ_0C_s) \quad (5)$$

และสมการของ Freundlich

$$\log Q_e = \log K + (1/n)\log C_e \quad (6)$$

2.3.4 ประโยชน์ของการดูดติดผิว

สารดูดติดผิวชนิดต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสีย เพื่อประโยชน์ดังต่อไปนี้

- 1) กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และ กรดฟัลวิก
- 2) กำจัดคลอรีนในน้ำ
- 3) กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- 4) กำจัดยาฆ่าแมลง
- 5) กำจัดผงซักฟอก
- 6) กำจัดฟีนอลและสารประกอบฟีนอล
- 7) กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะสารไฮโดรคาร์บอนแบบลูกโซ่อิ่มตัว

แม้ว่า ถ่านกัมมันต์จะเป็นสารดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาการใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารดูดติดผิวแทน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ ในการนำถ่านกระดุกมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในการบำบัดโลหะหนัก

2.4 อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล

2.4.1 การผลิตน้ำตาล

- 1) กระบวนการผลิตน้ำตาล

แผนภูมิโรงงานผลิตน้ำตาลแสดงในรูปที่ 2.3 และกระบวนการผลิตน้ำตาลแสดงใน รูปที่ 2.4 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อย ออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็น ผอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

- การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมาก ที่ ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อย ออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรม น้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้น ประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไป แปรรูป เป็น เชื้อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

- การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ขุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่าง อ่อน ดังนั้น จึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำให้น้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกโดยผ่าน กระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลางและ ปูนขาวจะจับ กับสารละลายต่างๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วน ตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อย ซึ่งยังมีความหวานกลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยก ออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

- การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไป ประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (Evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (Syrup) ในหม้อสุดท้าย มีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อม หลังจากผ่านตะแกรงกรอง แล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (Vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อม อิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสควิท (Massecuite) เมื่อทำให้แมสควิทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบ ตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมที่จะนำไปแยกผลึกต่อไป

- การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสคิวทิตที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆขนาด 400 - 600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเม็คน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดัง เพื่อการจำหน่ายต่อไป

2.4.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอนและเล้าลอยขานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

1) กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของ โรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียม อินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับขานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

2) กากอ้อยหรือขานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี่ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้น โดยปริมาณขานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณขานอ้อยทั้งหมด ที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ขานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือขานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

3) กากตะกอนอ้อย (Filter cake)

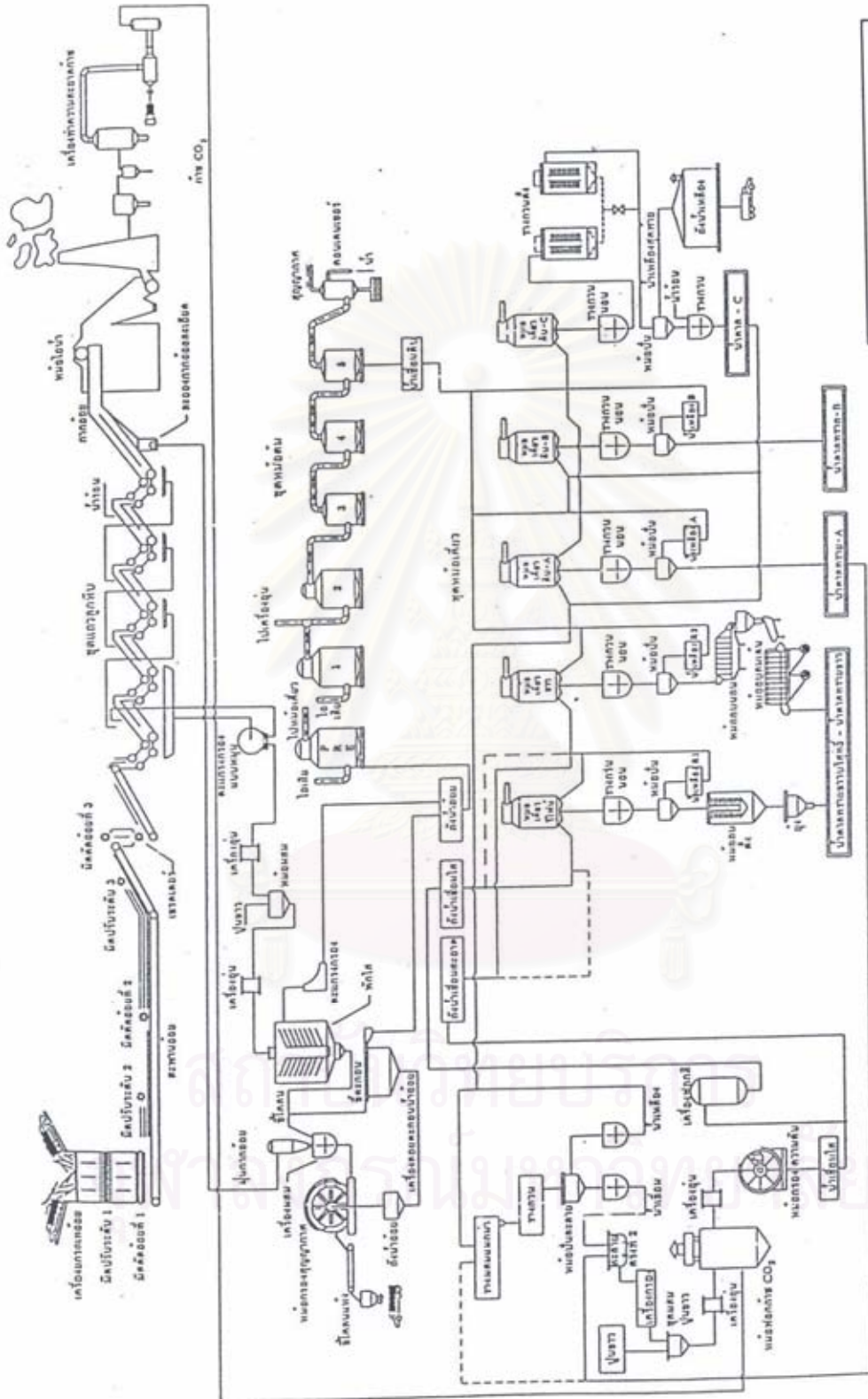
เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล หลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

4) เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

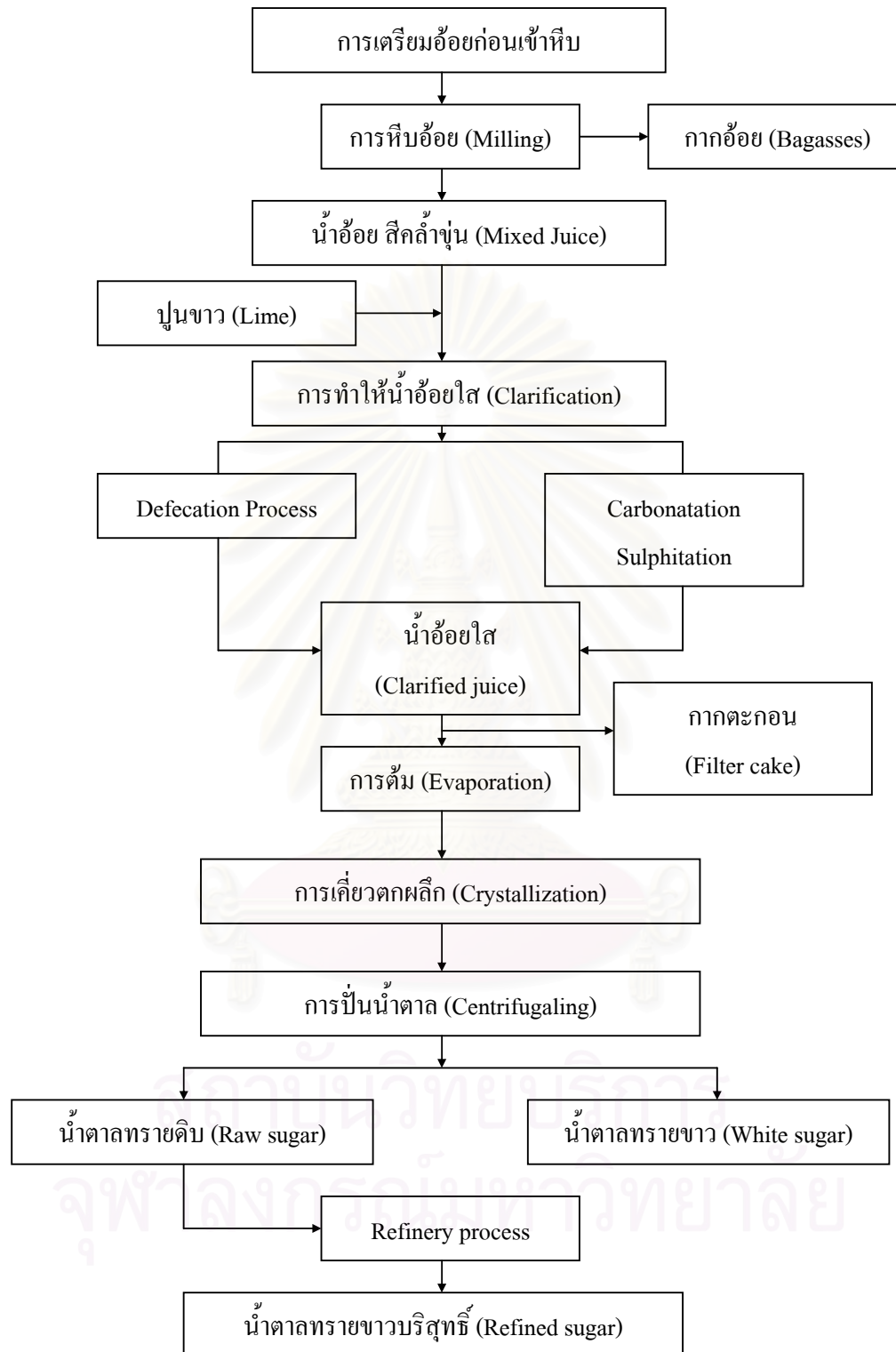
เถ้าลอยนี้ เกิดจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจาย จึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอย ให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง

2.4.3 การเผาขานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้น

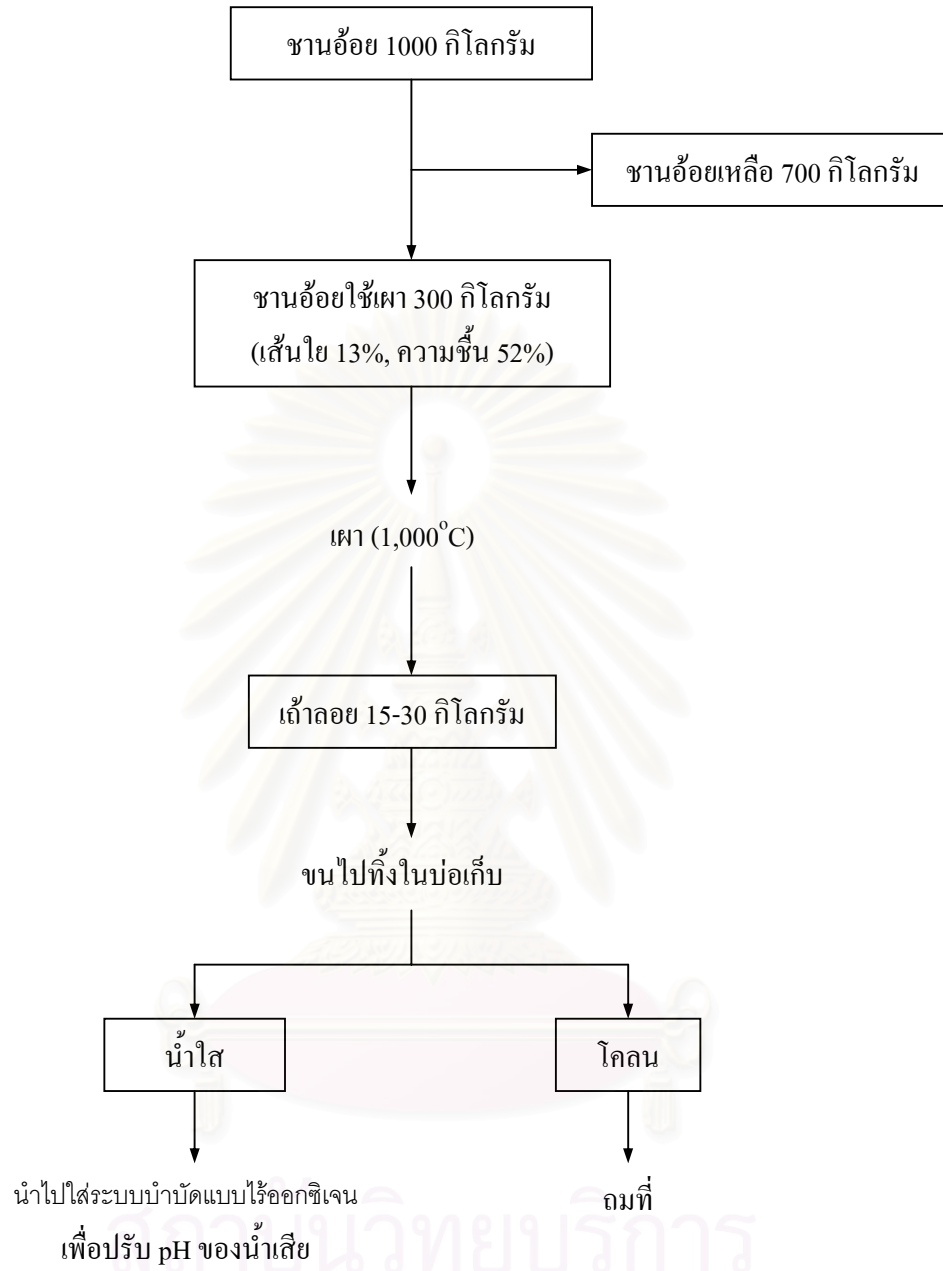
ขานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อย จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำใน โรงงาน น้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิด เถ้าลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนเถ้าที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพาน ส่งขึ้นรถบรรทุก เพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้ ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.1, 2.2 และ 2.3



รูปที่ แผนภูมิการผลิตน้ำตาล
ที่มา : สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาล (ที่มา: ดัดแปลงจาก อัสวิทย์, 2540)



รูปที่ 2.3 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา

2.5 การหล่อแข็ง

2.5.1 คำนิยาม

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environment Protection Agency : US EPA) ได้ให้ความหมายของการทำเป็นก้อนแข็งไว้ว่า เป็นเทคนิคที่ใช้กักเก็บ (Encapsulate) ของเสียไว้ในโครงสร้างที่มีความมั่นคงแข็งแรงคล้ายหิน (Monolithic) การกักเก็บอาจจะใช้ของเสียที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Microencapsulation) หรือใช้กับของเสียขนาดใหญ่ (Macroencapsulation) การหล่อแข็งไม่จำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างของเสียและตัวยึดประสาน (Solidifying material) แต่จะเชื่อมประสานของเสียให้อยู่ในรูปของแข็งคล้ายหิน การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจะถูกจำกัดโดยการลดขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการชะละลาย (Leaching) และ/หรือ โดยการแยกของเสียไปเก็บไว้ในแคปซูลที่ของเสียไม่สามารถซึมผ่านออกมาได้

จุดประสงค์ของการหล่อแข็ง เพื่อเตรียมกากของเสียอันตรายให้มีคุณสมบัติที่ดึกดำวคือ เพื่อป้องกันการบำบัดปฏิบัติทางทนต่อสภาวะแวดล้อม ลดการชะละลายของของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม และก้อนหล่อแข็งที่ได้สามารถลดกำลังแรงอัด หรือมีความแข็งแรงพอสมควร สามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย

วัสดุประสาน (Solidifying material) ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการหล่อแข็งเพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- เพิ่มกำลังรับแรงอัด (Strength)
- ลดความสามารถในการอัดแน่น (Compressibility) ของก้อนหล่อแข็ง
- ลดความต้านทานและการซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ของของเสีย

2.5.2 เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย

เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายมีดังนี้

1) Cement-based technique

เป็นกระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นๆ เช่นเถ้าแกลบ เถ้าลอย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ช่วยลดการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งได้ เมื่อหล่อแข็งแล้ว กากของเสียจะมีสภาพเป็นของแข็งคล้ายหิน วิธีนี้เหมาะสมกับการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก การผสมกับซีเมนต์ที่พีเอชสูงจะมีแนวโน้มที่จะตรึงโลหะหนักไว้ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ หรือเกลือคาร์บอเนตไอออนของโลหะหนักอาจเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของสารยึด

ประสาน หรืออาจถูกดูดซับหรือถูกดูดกลืนไว้ในโครงผลึกของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้

2) Lime-based technique

เป็นการหล่อแข็งด้วยปูนขาวผสมกับกากตะกอนของเสีย โดยอาศัยปฏิกิริยาการจับตัวแข็งระหว่างปูนขาว (Lime) กับผงซิลิกอนละเอียดและน้ำ การแข็งตัวใช้เวลานาน เหมาะที่จะใช้กับกากของเสียพวกสารอนินทรีย์มากกว่าพวกสารอินทรีย์ เนื่องจากกากของเสียพวกสารอินทรีย์ เมื่อผ่านกรรมวิธีการกำจัดแล้ว ภายหลังจากบ่มจะได้กากของแข็งที่มีความแข็งแรงลดลง และอาจมีการแพร่ซึมเพิ่มขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement-based จะพบว่าก่อนหล่อแข็งที่ได้จากวิธี Lime-based ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถรับกำลังอัดได้น้อยกว่า

3) Thermoplastic technique

เป็นกระบวนการหล่อแข็งที่ใช้บิโทเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทิลีน ผสมกับกากของเสียแห้ง อนุกรมที่มีสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน เมื่อปล่อยให้ อนุกรมมีลดลง กากของเสียจะถูกบรรจุหรือถูกเคลือบด้วยสารเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติจะใช้กับกากกัมมันตภาพรังสี

4) Organic polymer technique

เป็นการหล่อแข็งโดยใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์ เป็นเทคนิคการทำโพลีเมอร์เรซินระหว่างโมโนเมอร์กับกากของเสียโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนที่จะบรรจุและบำบัดต่อไป โมนิเมอร์ที่ใช้คือ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และวินิลเอสเตอริสไตรีน โมนิเมอร์

5) Encapsulation technique

เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำและสภาพแวดล้อมได้ดี ข้อเสียคือ เป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงใช้ในการกำจัดของเสียที่มีพิษสูงเท่านั้น

6) Self-cementing technique

เป็นการหล่อแข็งที่ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลไซต์ 8-10 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิด Plasterike

7) Classification

ใช้สำหรับการหล่อแข็งคากสารกัมมันตภาพรังสีโดยใช้กากตะกอนผสมกับซิลิกา แล้วหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของแก้วหรือวัตถุที่เป็นเซรามิก

2.6 วัสดุประสาน

ในการหล่อแข็งด้วยเทคนิคการใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน วัสดุประสานที่ใช้คือปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสร้างงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

1) วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

2) องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วย ออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัฆวาลัย, 2539)

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

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัฆวาลัย, 2539)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium silicate)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	33-55
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium silicate)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	15-35
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium aluminate)	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	7-15
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5-10

3) อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ต้าหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

คุณสมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ 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	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็น ตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ต้าหรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X-ray diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate; C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัวแข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

2.6.2 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan material)

วัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุธรรมชาติ หรือวัสดุสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยซิลิกาในรูปที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา มี Pozzolanic activity กล่าวคือสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดสารประกอบซีเมนต์

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-96 “ปอซโซลาน” หมายถึง วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปสารปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious property) แต่ถ้าสารปอซโซลานนั้นมีความละเอียดมากและมีน้ำที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

2.6.2.1 ประเภทของสารปอซโซลาน

สารปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม

1) สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ เถ้าภูเขาไฟ, หิน Tuff, หินพูน, Diatomaceous earths, Opaline และ Chert เป็นต้น

2) สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ได้แก่ วัสดุที่ได้จากการเผาวัสดุคืบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว, หินเชลล์, หินซิลิกา, เถ้าลอย และเถ้าแกลบ เป็นต้น

สารปอซโซลานบางชนิดอาจทำให้เกิดปัญหาเวลานำมาใช้ เพราะคุณสมบัติทางกายภาพของมันเอง เช่น Diatomaceous earths เพราะว่าอนุภาคเป็นเหลี่ยมเป็นมุมและมีความพรุนสูง จึงต้องใช้น้ำในการผสมมาก สามารถเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาหรือปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 550-1100 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-96 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบเถ้าลอยถ่านหินและปอซโซลานธรรมชาติ หรือปอซโซลานธรรมชาติที่ได้จากการเผาเพื่อใช้เป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral admixture) ในคอนกรีต ได้จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 ระดับ คือ

1) Class N ได้แก่ สารปอซโซลานตามธรรมชาติ หรือปอซโซลานตามธรรมชาติที่ผ่านการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น Diatomaceous earths, Opaline, Chert, Tuff, Volcanic ashes, Pumicites, $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$ และ Clay

2) Class F ได้แก่ เถ้าลอยโดยปกติที่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส เถ้าลอยในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolanic activity)

3) Class C ได้แก่ เถ้าลอยโดยปกติ เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์หรือกึ่งบิทูมินัส เถ้าลอยในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน และมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious property)

2.7 เถ้าลอย

เถ้าลอยคือเถ้าส่วนละเอียดสุดจากการเผาไหม้ มีขนาดเล็กมาก และอาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติเถ้าลอยแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าลอยบางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ จึงมีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

หน่วยงานวิจัยหลายแห่งได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่นใน สหรัฐอเมริกามี American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นต้น นอกจากนี้ที่สหรัฐอเมริกาแล้ว ที่อังกฤษ แคนาดา เยอรมัน เนเธอร์แลนด์ ญี่ปุ่น และอีกหลายประเทศทั่วโลกล้วนมีมาตรฐานของตนเองในการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

2.7.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยมาใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ ค่าของสารประกอบออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยชานอ้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ เถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.5

2.7.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่สำคัญต่อคุณภาพคอนกรีตคือ ขนาดของอนุภาคเถ้าลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเผาไหม้และลักษณะการเผาไหม้ โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 จนถึง 0.15 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.5 สารประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

%สารประกอบออกไซด์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริยญา, 2528)	เถ้าลอยลิกไนต์ (อุคม, 2532)	เถ้าลอยชานอ้อย
SiO_2	20.20	35.43	51.96
Al_2O_3	5.42	28.27	1.37
Fe_2O_3	2.92	14.57	0.82
CaO	68.82	11.92	7.26
K_2O	0.46	2.48	1.32
MgO	1.52	2.13	1.74
SO_3	2.55	2.35	0.11
L.O.I.	2.72	2.56	33.17

2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.8.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยมีสารตั้งต้นคือซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Calcium silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์และน้ำ (H₂O) เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่เรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ประกอบด้วยซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Calcium silicate hydrate; C-S-H) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร และซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; Ca(OH)₂) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับซิลิเกตไฮดรอกไซด์ เพราะมีปริมาณสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ มีผลึกหยาบ ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนในรูป สมการเคมี ได้ดังนี้



ปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อเนื่องโดยที่ซิลิเกตออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจากซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CaO·SiO₂) เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) ได้ซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) และซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือสารประกอบซิลิเกตไฮดรอกไซด์ถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

ซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม ส่วนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก หากมีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.8.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ ซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) จากเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามทฤษฎีพื้นฐานนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิเกตไฮดรอกไซด์อิสระ เพื่อจะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาจะต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากถ้าอยู่ในรูปผลึก (Crystalline) จะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก อัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Pozzolanic activity) และอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40 โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีผลต่อการเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า จึงทำให้คอนกรีตซึ่งใช้เถ้าลอยบางชนิด (Class F) แทนที่ซีเมนต์บางส่วน มีสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปกติ จึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าจึงทำให้เกิดการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย แต่ในกรณีของเถ้าลอยบางชนิด (Class C) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งในลักษณะเชื่อมประสาน (Cementitious) และปอซโซลาน (Pozzolanic) การพัฒนากำลังในช่วงต้นอาจไม่แตกต่างมากนัก ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานมักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

2.9 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโครเมียม

อัญชลี จันทวรรณกุล, 2534 ได้ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบดและสารทำให้เกิดตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คอลัมน์ที่ใช้ทดลองทำด้วยคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 3.45 เมตร บรรจุด้วยทรายขนาด 0.8-1.2 มิลลิเมตร ความสูงเบด 1, 1.5 และ 2 เมตร ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมระดับพีเอช 8.5, 9.0 และ 9.5 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดให้มีความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับ คือ 5, 10, 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่า ความสูงเบด, พีเอช จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้กำจัดโครเมียม พีเอชที่เหมาะสมคือ 9.0 ความสูงของเบดที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดได้ดีที่สุด คือ ความสูง 2 เมตร กำจัดโครเมียมได้ 45-60% ยกเว้นความเข้มข้นโครเมียม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอต่อการตกผลึก

กลไกการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีนี้ จะเกิดกลไกการถ่ายเทมวลสารและการตกผลึกบนผิวเม็ดทรายสำหรับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการวิจัยนี้ จะทำให้เกิดตะกอนเบาอัดตัวไม่แน่นบนผิวเม็ดทรายของแข็งแขวนลอยจึงมีมากในน้ำที่ผ่านการบำบัด

เยาวนุช สุจริตรธรรม, 2536 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการตกตะกอนฟล็อกโครเมียมจากน้ำเสียฟอกหนังโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ และใช้ปูนขาวร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ และใช้สารร่วมตะกอน 3 ชนิด คือ โพลีเมอร์ประจุลบ โพลีเมอร์ประจุบวก และโพลีเมอร์ไร้ประจุ โดยใช้น้ำฟอกโครม 2 ชนิด คือ มีและไม่มีสารช่วยตรึงโครเมียม ผลการศึกษาพบว่าการใช้สารตกตะกอนฟล็อกทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือ 98-100 % แต่ปริมาณตกตะกอนฟล็อกไม่เท่ากัน โดยแมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับปูนขาว ให้ปริมาณตกตะกอนฟล็อกมากกว่าการใช้แมกนีเซียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว พิเศษที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาสำหรับน้ำเสียที่ไม่มีสารช่วยตรึงโครเมียมของแมกนีเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์อ่อน และแมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับปูนขาว คือ 8.4-8.5, 8.9 และ 7.4-7.5 ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียที่มีสารช่วยตรึงโครเมียม พิเศษที่เหมาะสมเท่ากับ 8.5, 8.6 และ 7.8 ตามลำดับ

พุทธิสาร ชัยพันธุ์, 2538 โลหะหนักโครเมียมที่อยู่ในสารละลายในรูปของโครเมตไอออน ปล่อยออกมาจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก ถูกนำมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้เรซิน QUARON AU-808 และ DOWEX MSA-1 สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนกับโครเมียม (VI) และใช้เรซิน QUARON JU-707 และ DOWEX MSC-1 สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นที่ระดับต่างๆลดลงเหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีอัตราไหลที่เหมาะสมระหว่าง 10-40 เท่าของปริมาตรเรซินที่ใช้ต่อชั่วโมง และทำการสกัดกลับโครเมียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเรซิน QUARON AU-808 มีประสิทธิภาพต่อการรีเจนเนอเรตต่ำ เนื่องจากเรซินถูกออกซิไดซ์โดยกรดโครมิก ส่วนเรซิน DOWEX MSA-1 สามารถรีเจนเนอเรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5-7 ที่อัตราไหล 2 เท่าของปริมาตรเรซินที่ใช้ต่อชั่วโมง

เมื่อนำเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นไปใช้แยกไอออนโครเมตในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยความเข้มข้นของโครเมตและโครเมียมที่เส็ดลอดออกมาอยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

เครื่องต้นแบบชนิดแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้จับโครเมตนี้ มีต้นทุนดำเนินการต่ำเปลี่ยนน้ำทิ้งให้เป็นน้ำดี และสามารถนำโครเมตและน้ำดีกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นการรักษาสสิ่งแวดล้อม

ธิดารัตน์ ดำรงสอน, 2539 ได้ศึกษาการตกตะกอนโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งใช้น้ำเสียที่มีค่าโครเมียมเริ่มต้น 15 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แมงกานีสซัลเฟตเป็นสารรีดักชัน และใช้ฟิเอชในการตกตะกอน 3 ค่า คือ 8, 9 และ 10 ด้วยโซดาไฟ ผลการศึกษาพบว่าฟิเอชในการตกตะกอนทั้ง 3 ค่าดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เพ็ญประภา คำป้อม, 2541 ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมไอออนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โดยวิธีตกตะกอนด้วยซีเมนต์ลอย โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ลอยแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 0, 1, 1.25, 2.5, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และทำการศึกษาที่ฟิเอช 7 ระดับคือ 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12

ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดยการตกตะกอนที่พีเอชเท่ากับ 9 โดยใช้ขี้เถ้าลอย 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 95.79 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โดยวิธีตกตะกอนด้วยขี้เถ้าลอยที่อุณหภูมิบรรยากาศ (24-25°C), 27, 30, 33, 35 และ 37°C เปรียบเทียบกับ 60°C โดยใช้พีเอชเท่ากับ 11 และใช้ปริมาณขี้เถ้าลอย 1 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิดังกล่าวข้างต้นทั้ง 7 ระดับ มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์, 2543 ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานด้วยตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์ การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนแรกศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและความสามารถในการกำจัดโครเมียม (VI) โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (VI) ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4, 6 และ 8 ตามลำดับขั้นตอนที่สอง ศึกษาความเป็นไปได้ในกรณีพื้นอำนาจตัวกลางด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก พีเอช 4

จากการทดลองในขั้นตอนแรก พบว่า ทรายเคลือบแมกนีไทต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (VI) ได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งปริมาณโครเมียม (VI) ที่ทรายเคลือบแมกนีไทต์สามารถกำจัดได้เท่ากับ 1.74 มิลลิกรัมต่อทรายเคลือบแมกนีไทต์ 1 กรัม

จากการทดลองขั้นที่สอง พบว่า การพื้นอำนาจตัวกลางด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก พีเอช 4 สามารถนำกลับโลหะหนักได้ โดยที่ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์สามารถนำกลับมาใช้งานได้ต่อโดยประสิทธิภาพจะลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ในครั้งแรก และ 50 เปอร์เซ็นต์ในครั้งต่อไป

Nikolov และ Papozov, 1970 ได้ศึกษาการตกตะกอนโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังด้วยสารละลายปูนขาว (Ca(OH)₂) โดยใช้ น้ำเสียที่มีปริมาณโครเมียมระหว่าง 3,000-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปูนขาว 1 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อโครเมียม 1 มิลลิกรัม พบว่าในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น โครเมียม 99.6-100 % ตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₃) ในเวลา 24 ชั่วโมง ตะกอนมีความชื้น 94.1% ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ตะกอนที่มีความชื้น 87.11% ตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ถูกนำมาละลายด้วยกรดซัลฟูริก 1.9 กรัม สำหรับโครเมียม 1 กรัม แล้วจึงนำสารละลายนี้กลับไปใช้ในกระบวนการฟอกหนังต่อไป

Mamakov, 1973 ได้ทำการตกตะกอนโครเมียมด้วยสารละลายปูนขาว (Ca(OH)₂) โดยใช้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นโครเมียม 130 มิลลิกรัมต่อลิตรนำมาปรับพีเอชด้วยปูนขาวให้ได้เท่ากับ 7-8.8 และใช้โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) 300 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 300 °C แล้วทำการแยกตะกอนออกจากน้ำโดยวิธีอิเล็กโทรโฟเดชัน จากนั้นละลายตะกอนด้วยกรดซัลฟูริกในอัตราส่วนน้ำหนัก H₂SO₄ : Cr

เท่ากับ 1:1 กรองตะกอนที่เหลือทิ้ง นำสารละลายที่มีโครเมียมนี้ไปปรับความเข้มข้นแล้วนำกลับไปใช้ในกระบวนการใหม่ได้

Simoncini, 1977 อ้างตาม ปธาน บรรจงปฐ, 2536 ได้ศึกษาการนำกลับโครเมียมโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยเติมสารทั้ง 3 ดังกล่าวในอัตราส่วน 6.5-12.5, 8.5-16.8 และ 3.1-6.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ลงในสารละลายที่มีโครเมียม 8 กรัมต่อลิตร ในรูป Cr_2O_3 พบว่าเกิดการตกตะกอนที่พีเอช 9 แล้วทำการละลายตะกอนด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10.7 กรัมต่อลิตรของสารละลายตะกอน

Langerwerf, 1978 ทดสอบการตกตะกอนโครเมียมจากน้ำเสียในการฟอกโครมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าเกิดตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถตกตะกอนเร็ว (250 มิลลิตร/ชั่วโมง) และได้ตะกอนแน่น (Cr 10 % ต่อน้ำหนักเปียก) และสามารถแยกน้ำใสได้โดยการรินน้ำส่วนบน น้ำส่วนบนมีโครเมียมเหลือน้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

Aoki และ Munimori, 1982 ได้ศึกษาการนำกลับมาของโครเมียม (VI) จากน้ำเสียด้วยเหล็กไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาเฉพาะกลไกการดูดซับของโครเมียม (VI) บนเหล็กไฮดรอกไซด์

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของโครเมียม (VI) บนเหล็กไฮดรอกไซด์ จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอชในช่วงพีเอชต่ำกว่า 8.5 เล็กน้อย โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง และ ที่พีเอชมากกว่า 8.5 จะไม่มีการดูดซับเกิดขึ้น ที่ pH_{ZPC} ของเหล็กไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8.5 ประจุที่ผิวเป็นบวก HCrO_4^- จะแลกเปลี่ยนกับ OH^- ของเหล็กไฮดรอกไซด์ ซึ่งถือว่าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

Diagle และ Bennett, 1986 รายงานว่าโครเมียมถูกนำกลับจากน้ำเสียจากการฟอกหนังโดยเพิ่มพีเอชเป็น 8.7-9.0 ด้วย 30% โซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำใสจะมีโครเมียมน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Eckenfelder และ William Wesley, 1989 พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน Cr^{3+} อยู่ในช่วงระหว่าง 8.5-9.5 และการใช้ปูนขาวเป็นสารช่วยให้เกิดตะกอนในน้ำทิ้งที่มีพีเอชระหว่าง 8-12 สามารถตกตะกอน Cr^{3+} ออกจากน้ำทิ้งได้มากกว่าร้อยละ 99 เมื่อใช้เวลากการตกตะกอนประมาณ 12 ชั่วโมง

Lin, Zhao และ Yuan, 1990 ได้ศึกษาถึงปฏิกิริยาในการบำบัดโครเมียม ที่ปนอยู่ในน้ำเสียจากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ขึ้นอยู่กับพีเอช โดยโครเมียมจะอยู่ในรูปที่ต่างกันเมื่อพีเอชต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้เฟอร์รัส (II) ในการทำให้โครเมียม (VI) เปลี่ยนเป็นโครเมียม (III) ก่อนแล้วจึงทำให้โครเมียม (III) ตกตะกอนด้วยการปรับพีเอชที่ต่าง ๆ กัน ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนในการศึกษาครั้งนี้คือที่พีเอชเท่ากับ 6.7 โดยจะตกตะกอนโครเมียม (III) ได้มากที่สุด

Bailey และคณะ, 1992 ได้ศึกษาการดูดซับและการนำกลับมาของโครเมียม (VI) โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กไฮดรอกไซด์ ในการเคลือบทรายสามารถเตรียมได้จากสารทั้ง 2 ชนิด คือ เตรียมจาก เฟ

อริคไนเตรทและเฟอริคคลอไรด์ แต่ที่นิยมใช้กันมากโดยทั่วไปจะเป็นเฟอริคไนเตรท สำหรับน้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียม (VI) เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไพล์ฟารนคอลลัมน์ด้วยอัตราไหล 2 มิลลิตรต่อนาที และทำการฟื้นอำนาจด้วยรีเจนเนอเรนต์ 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน คือ สารละลายที่พีเอช 5 และ NaOH 1.0 M

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ทรายที่เคลือบเฟอริคคลอไรด์สามารถดูดติด โครเมียม (+6) ได้ดีกว่ากรณีของการเคลือบโดยใช้เฟอริคไนเตรทเล็กน้อยเท่านั้น และการฟื้นอำนาจด้วยสารละลายที่มีพีเอช 9.5 จะให้ผลดีกว่าการใช้ NaOH 1.0 M แต่หากดูตามอายุการใช้งานจะพบว่า ตัวกลางทรายจะมีอายุการใช้งานนานกว่าเมื่อฟื้นอำนาจด้วยสารละลายที่มีพีเอช 9.5

Visvanathan, 1993 ได้ศึกษาแยกโครเมียม ทองแดง และนิกเกิล จากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก โดยการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้เรซิน Purolite C-100 และ A-100 พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย ไม่แนะนำให้รีเจนเนอเรนต์เนื่องจากมีความยุ่งยาก

Sathphy และคณะ, 1995 ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้สารละลายเฟอริคไนเตรทผสมกับทราย จากนั้นนำไปอบแห้ง แล้วนำไปเป็นตัวกลางบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 2 ชนิด คือ น้ำเสียที่มีแคดเมียมปนเปื้อนกับน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อน

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโครเมียม (III) ได้เป็นอย่างดี และเมื่อเปรียบเทียบกับโครเมียม (VI) พบว่าสามารถกำจัดโครเมียม (II) ได้ดีกว่าโครเมียม (VI) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นตามพีเอช และจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 8.5

Khaodhian, 1997 ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียม (VI) โดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์ และใช้วิธีแบบ complete mix batch reactor ซึ่งการเคลือบทรายจะเตรียมจากสารละลายเฟอริค ไนเตรท สำหรับน้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียม (VI) ละลายอยู่ ทดลองที่ความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 0.10, 0.20, 0.38, 0.58 และ 0.77 mM โดยแปรตามพีเอชต่างๆดังนี้ 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, และ 6.5 และยังแปรตามค่าของปริมาณตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์คือ 6, 12, 20, 30 และ 40 กรัมต่อลิตร

วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ในสารละลาย โดยใช้ ICP-AES. ในส่วนของโครเมียม (III) สามารถคำนวณได้โดยสมดุลย์สมการ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือโครเมียม(+3)จะไม่ละลายออกมาในสารละลาย ทำให้ค่าที่วัดได้เป็นค่าของโครเมียม (VI) แต่เพียงอย่างเดียว (Azizian, 1993)

2.9.2 งานวิจัยที่ใช้ถ้ำลอยขานอ้อยในกระบวนการดูดซับ

จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539 ได้ทำการศึกษาการนำขี้ถ้ำลอยขานมาใช้ในการกำจัดนิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้ง 33 ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับพีเอช เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้น ดังนี้ การกำจัดนิกเกิล พบว่าปริมาณขี้ถ้ำลอยที่เหมาะสมคือ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้

ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลคือใช้เวลาในการกวน 10 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 10 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 99.52 แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาพที่เหมาะสมคือใช้เวลาในการกวน 10 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 9 และ 8 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 98.68 และ 84.62 ตามลำดับ

การกำจัดแคดเมียม พบว่าปริมาณซีเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 2.5 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการกวน 30 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 10 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 99.52 ซึ่งยังไม่สามารถบำบัดแคดเมียมให้ได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาพที่เหมาะสมคือใช้เวลาในการกวน 10 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 10 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมร้อยละ 98.15 และ 81.82 ตามลำดับ

การกำจัดตะกั่ว พบว่าปริมาณซีเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 1 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการกวน 5 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 10 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.55 แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาพที่เหมาะสมคือใช้เวลาในการกวน 5 และ 10 นาที ตามลำดับ ที่พีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมร้อยละ 98.23 และ 89.11 ตามลำดับ

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์, 2539 ได้ศึกษาการใช้ซีเถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสี โดยใช้สีย้อม 7 ประเภท ดังนี้คือ สีเอซิด สีเบสิก สีรีแอคทีฟ สีซัลเฟอร์ สีไดเรกต์ สีดีสเพอร์ส และสีฟิกเมนต์ พบว่าการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายสีในช่วง 4-8 ไม่ค่อยมีผลต่อการดูดซับสีของซีเถ้าลอยลิกไนต์มากนัก แต่ประเภทสีเอซิดมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของอออนประจุลบ ในส่วนประกอบของสีกับผิวภายนอกของซีเถ้าลอย และได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีด้วยซีเถ้าลอย พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำในธรรมชาติของประเทศไทย จะมีผลต่อการดูดซับสีเพียงเล็กน้อย สำหรับค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอได้นั้น สีต่างชนิดจะมีค่าซีไอที่แตกต่างกัน คือซีไอเริ่มต้นอยู่ในช่วง 42-146 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่า ซีเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ระหว่างร้อยละ 20.8-89.4

อุบลรัตน์วาริวิวัฒนะ, 2544 ศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และ โครเมียมด้วยถ่านกระดุกที่เตรียมจากการเผากระดุก โคกระบือ โดยทำการทดลองแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่า ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมแต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้โดยถ่านกระดุกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่การเตรียมถ่านกระดุกที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดในการทดลอง

ถ่านกระดุกสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยคิดเป็น 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดุกที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ส่วน

แคดเมียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดุกที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ถ่านกระดุกพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรินดริชและการกำจัดแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

ในส่วนการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าสำหรับการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 85.28 และ 1,851.43 เท่าของปริมาณเบด สำหรับแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 2.62 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดุก และสามารถบำบัดน้ำได้ประมาณ 308.57 และ 137.14 เท่าของปริมาณเบด

Panday และคณะ, 1987 ได้ศึกษาการใช้ซีลีไธลอยในการกำจัดแคดเมียมโดยวิธีดูดซับ (adsorption) โดยใช้ซีลีไธลอยปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร แล้วหาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่โดยวิธี Dithizone method ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้พีเอชเท่ากับ 8.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.80 เป็นร้อยละ 89.82 และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจาก 4 เป็น 8.5 ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่าสามารถกำจัดแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นโดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.85 เป็นร้อยละ 89.82

Edwards และ Benjamin, 1989 ได้ศึกษาการกรองแบบดูดติดผิวโดยใช้ทรายเคลือบ เปรียบเทียบกับทรายธรรมดาและสารดูดติดผิวที่เรียกว่า Ferrihydrite และได้ศึกษาถึงลักษณะสมบัติของทรายเคลือบที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีที่ต่างกัน 2 วิธี คือ การเคลือบด้วยวิธีการตกผลึก และการเคลือบโดยใช้ความร้อน จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การเคลือบทรายโดยใช้ความร้อน จะใช้ปริมาณเหล็กในการเคลือบมากกว่า แต่มีข้อดีคือทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดติดผิวได้มากกว่าการเคลือบทรายโดยวิธีการตกผลึก นอกจากนี้ยังมีความคงทนมากกว่าเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่เป็นกรด โดยสารที่เคลือบอยู่จะไม่สามารถถูกละลายออกไปได้ง่าย

ในการศึกษาการกรองแบบดูดติดผิวนี้นอกจากศึกษาถึงลักษณะสมบัติของทรายเคลือบแล้ว ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดด้วย โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักต่างๆเจือปนอยู่ เช่น Pb, Cu, Ni, Cd และ Cr (III) นำมาปล่อยให้ไหลผ่านคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร ความสูงของชั้นตัวกลางประมาณ 15 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละคอลัมน์จะมีขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอนด้วยกัน ประกอบด้วย การกำจัด การล้างย้อน การฟื้นฟูอำนาจตัวกลาง และการเตรียมตัวกลางเพื่อนำไปใช้สำหรับกำจัดในครั้งต่อไป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ทรายเคลือบมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะได้ดีกว่าตัวกลางอีก 2 ชนิด และสามารถกำจัดโลหะที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้อีกด้วย ในขณะที่ตัวกลางทรายที่เป็น

ธรรมดาไม่สามารถกำจัดโลหะได้ โลหะที่ถูกกำจัดสามารถนำกลับมาได้ จากการล้างและฟื้นฟูน้ำด้วยสารละลายกรด ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับพีเอช โดยให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 8.5-10

Yavada และคณะ, 1989 ได้ทำการศึกษาโดยการใช้น้ำจืดในการบำบัดตะกั่วในน้ำ โดยใช้น้ำจืดจากโรงงานไฟฟ้า Obara ในประเทศอินเดีย โดยการนำน้ำจืดมาเติมปริมาณ 1 กรัมมาเข้าในสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C และที่พีเอชเท่ากับ 6.4 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6 มิลลิกรัมต่อลิตรจะกำจัดตะกั่วได้ลดลง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงจากร้อยละ 88.10 เป็นร้อยละ 75.0 และเมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 20 °C เป็น 40°C โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากำจัดตะกั่วได้ลดลงจากร้อยละ 83.60 เป็นร้อยละ 68.10

เมื่อทำการทดลองหาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วด้วยน้ำจืด โดยใช้น้ำจืดที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30°C พบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 3 เป็น 6 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.85 เป็นร้อยละ 88.10

Lagnese และ Dzombak, 1993 ได้ศึกษาการใช้ Ash sedimentation pond ในโรงไฟฟ้าที่อาศัยพลังงานจากถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเป็นขั้นตอนหนึ่งของการบำบัดน้ำภายในโรงไฟฟ้าที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยอาศัยปฏิกิริยาการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของน้ำจืดและ/หรือ Iron Oxyhydroxide โดยในการทดลองนี้จะเน้นการกำจัดอลูมิเนียม แมงกานีส และอาร์เซนิก ในน้ำ โดยใช้น้ำจืดและน้ำที่ผ่านการควบคุมพีเอช ภายใต้สภาวะที่มีการรบกวนน้อยที่สุด (Weak mixing condition) รวมทั้งมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อส่งเสริมการดูดซับบน Iron Oxyhydroxide ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าควรควบคุมค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัดให้อยู่ในช่วง 8-8.5 จะทำให้ค่าแมงกานีสที่มีในน้ำลดลงจาก 2 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 จะทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชนี้การเติมเฟอร์ริกคลอไรด์จะไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำ แต่กรณีที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7.5 จะพบว่ามีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหลือในน้ำสูงมากขึ้น ส่วนผลการทดลองของอลูมิเนียมจะให้ผลใกล้เคียงกับแมงกานีส แต่ต่างกันคือที่พีเอชใกล้เคียงกับ 7 จะทำให้มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่เหลืออยู่ในน้ำต่ำที่สุดคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

Mavros และคณะ, 1993 ได้ทำการศึกษาโดยนำน้ำจืดจากอุตสาหกรรมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงใช้ในการกำจัดนิเกิล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดโดยใช้น้ำจืดจากโรงไฟฟ้าคาร์เดียร์และเมกาโปลิส ซึ่งอยู่ทางเหนือและภาคใต้ของประเทศกรีซตามลำดับ

โดยใช้น้ำจืดที่มีความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้นในการทดลองเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที ที่ค่าพีเอช 8.5-9 จะสามารถกำจัดโลหะนิเกิลได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงค่าพีเอชกลางๆ พบว่า การกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำจืดที่ถูกเติมลงในสารละลายเป็นสำคัญ

นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์อีกด้วย เช่น ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 พบว่าซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าการเคียวสามารถกำจัดนิเกิลได้ร้อยละ 60 ในขณะที่ซีเมนต์จากโรงไฟฟ้าเมกาโลโปลิส สามารถกำจัดได้เพียงร้อยละ 10

การทดลองในขั้นต่อมา ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของซีเมนต์กับการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์และคาร์บอน พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักนิเกิลได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอชต่ำๆ ส่วนการใช้คาร์บอนพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่าการใช้ซีเมนต์ที่มีค่าพีเอชต่ำกว่าค่าพีเอชของการตกตะกอน

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำเป็นก้อนแข็ง

กฤษณ์ จารุทะวัย, 2545 ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ต้า ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด คือ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนากำลังรับแรงอัด และใช้หลักการเลี้ยวเบนโดยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) เพื่อวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบลักษณะของน้ำชะจากเถ้าลอยแต่ละชนิดและก้อนมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด ตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เพื่อความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมในการนำ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้ประโยชน์

ผลการทดสอบสมบัติของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยขานอ้อย สรุปได้ว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุพอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าลดลง ส่วนความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ต้าได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ส่วนมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยให้กำลังรับแรงอัด ต่ำกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดาในทุกปริมาณการแทนที่ และทุกอายุการบ่ม ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอย ขานอ้อย รวมทั้งมอร์ต้าผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

Weng และ Huang, 1944 ศึกษาถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ในการดูดซับ และการทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement fixation) ผลการศึกษา

แสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับโลหะสังกะสีและโลหะแคดเมียมในน้ำเสียที่เจือจาง ได้ผลดังต่อไปนี้คือ

ประสิทธิภาพในการดูดซับของสังกะสี เท่ากับ 0.27 mg/g

ประสิทธิภาพในการดูดซับของแคดเมียมเท่ากับ 0.27 mg/g

และเมื่อทดลองผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ในอัตราส่วน 90 :10 แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่าต้องใช้เวลา 65 วัน จึงจะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ และจากการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency Extraction Procedure, USEPA- EP) แสดงว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่าในมาตรฐานน้ำดื่มและสามารถสรุปผลการทดลองจากการหา Compressive strength และ Leaching test แล้วเสนอว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็น Secondary construction materials ได้

Shively และคณะ, 1986 ได้ทำการทดลองนำกากตะกอนโลหะหนักมาบำบัดด้วยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 เป็นวัสดุประสาน มีการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัด กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้มีการสังเคราะห์ขึ้นโดยโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม ตะกั่ว และ โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมรวมกัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน พบว่าก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการนำกากตะกอนที่มีอาร์เซนิกและแคดเมียมเป็นองค์ประกอบมาทำให้เป็นก้อนจะให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่กากตะกอนที่ประกอบด้วยโครเมียมหรือตะกั่วไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด การทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง น้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำนายจากความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ประมาณ 100 ถึง 10,000 เท่าและพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ US EPA (สำหรับการสกัดในครั้งแรก) ทั้งในกรณีที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ การละลายของโลหะหนักสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อเริ่มสกัด แคดเมียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์จะทำให้หน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้ในการสกัดให้เป็นกลาง ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองค่าพีเอชลดลงเหลือน้อยกว่า 6.0จะมีค่าการละลายของโลหะหนักสูงสุด สำหรับในช่วงที่สาม เมื่อทำการสกัดต่อไปค่าพีเอชยังคงน้อยกว่า 6.0 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำเริ่มจะละลายออกมา โดยโลหะหนักที่ละลายออกมาจากการสกัดแต่ละครั้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

Roy และคณะ, 1991 ได้ทำการศึกษาโครงสร้างภายหลังจากการที่มีการทำให้โลหะหนักคงรูปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยถ่านลิกไนต์ โดยในการทดลองได้ใช้กากตะกอนที่มีโลหะหนัก 4 ชนิด คือ โครเมียม นิกเกิล แคดเมียม และปรอท ผลการทดลองเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อเถ้าลอย (F-grade) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1.43 เมื่อใช้เครื่อง SEM (Scanning electron microscope), XRD (X-ray diffraction) และ EDM (Energy dispersive X-ray spectrometry) พบว่าแคดเมียมซิติเลตไฮเดรตซึ่ง

เป็นสารที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ ซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่ในเถ้าลอยผ่านหินลิกไนต์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ มีลักษณะเป็น Irregular และจาก XRD จะพบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium aluminate hydrate) และยิปซัม (Gypsum)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการขยะอันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 แผนการวิจัย

3.1.1 การวางแผนการทดลอง

- 1) การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 2) การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อย
- 3) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
- 4) การดำเนินการทดลอง
- 5) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

การวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาการดูดซับโครเมียม โดยทำการทดลองแบบแบดจ์หลังจากนั้น นำถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมแล้วไปทำเป็นก้อนแข็ง โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแบ่งการทดลองเป็น ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การดูดซับโครเมียม แบ่งเป็น 4 การทดลอง

การทดลองที่ 1 การศึกษาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของถ้ำลอยซานอ้อยที่ใช้ดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมของถ้ำลอยซานอ้อย

การทดลองที่ 3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

การทดลองที่ 4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโครเมียม

ขั้นตอนที่ 2 การทำเป็นก้อนแข็ง แบ่งเป็น 3 การทดลอง

การทดลองที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยทุกส่วนผสมจะใช้อัตราบ่ม 7 วัน

การทดลองที่ 2 การศึกษาระยะเวลาการบ่ม โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลการชะละลาย

3.1.3 ตัวแปรในการทดลอง

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆในแต่ละการทดลองในขั้นตอนที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.1-3.4

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 1

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	1, 3, 6, 9, 12, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 และ 360 นาที
ตัวแปรควบคุมคงที่	
1. ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น	
- ความเข้มข้นโครเมียม	20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าพีเอช	2
2. ปริมาณน้ำเสียที่ใช้	50 มิลลิลิตร
3. ปริมาณเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้	20 กรัมต่อลิตร
4. ความเร็วในการกวนผสม	120 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ พีเอช
2. ความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก	ร้อยละการกำจัด

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 2

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้น โครเมียม - ฟิเอช 	10, 20, 30, 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 1, 2, 3, 4, 5 และ 6
ตัวแปรควบคุมคงที่	
1. เวลาที่ใช้ในการทดลอง 2. ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ 3. ปริมาณเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ 4. ความเร็วในการกวนผสม	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 1) 50 มิลลิลิตร 20 กรัมต่อลิตร 120 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง 2. ความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ ฟิเอช ร้อยละการกำจัด

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	1, 3, 6, 9, 12, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 และ 360 นาที
ตัวแปรควบคุมคงที่	
1. ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นโครเมียม - ค่าพีเอช 2. ปริมาณน้ำเสียที่ใช้	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2) (เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2)
3. ปริมาณเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้	20 กรัมต่อลิตร
4. ความเร็วในการกวนผสม	120 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง	ปริมาณ โลหะหนักที่เหลือ พีเอช
2. ความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก	ร้อยละการกำจัด

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ 4

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
ปริมาณเถาลอยขานอ้อยที่ใช้	5, 10, 20, 30 และ 40 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรควบคุมคงที่	
1. ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้น โครเมียม - ค่าพีเอช 	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2)
2. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 2)
3. ปริมาณน้ำเสียที่ใช้	(เลือกค่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ 3)
4. ความเร็วในการกวนผสม	50 มิลลิลิตร
	120 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง	ปริมาณ โลหะหนักที่เหลือ
	พีเอช
2. ความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก	ร้อยละการกำจัด

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องวัดพีเอช
- ตะแกรงแยกขนาด
- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
- เครื่องเขย่า
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์, AA-S (Atomic absorption spectrophotometer)
- ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
- หลอดทดลองผสมสารขนาด 50 มิลลิลิตร
- เตาอบวัสดุ
- ขวดเก็บน้ำเสียนขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
- แผ่นกรองใยแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน, SEM (Scanning electron microscope)
- เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน, XRD (X-ray diffraction spectrometer)
- เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสยสังเคราะห์ ได้แก่ $K_2Cr_2O_7$
- สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ HNO_3
- สารเคมีที่ใช้เป็นบัฟเฟอร์ ได้แก่ สารละลาย CH_3COONa , สารละลาย CH_3COONa ผสม CH_3COOH และสารละลาย $NaCl$ ผสม HCl

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อย

ลักษณะทางกายภาพ วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน ของถ้ำลอยซานอ้อย ด้วยเครื่อง SEM (Scanning electron microscope) และวัดค่าพีเอชด้วยเครื่อง pH meter

ลักษณะทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน และซิลิกาที่มีในถ้ำลอยซานอ้อย ด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffraction spectrometer)

3.4 การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

เตรียมสารละลายโครเมียมเข้มข้นจากการชั่งโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 294 ปริมาณ 0.282 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมโซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa) ปริมาณ 13.608 กรัมเพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ที่พีเอชเท่ากับ 5-6, โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa) ปริมาณ 13.608 กรัมและปรับพีเอชด้วยกรดอะซิติก (CH_3COOH) เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ที่พีเอชเท่ากับ 3-4 และโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 9.708 กรัม ($NaCl$) และปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ที่พีเอชเท่ากับ 1-2 หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโครเมียมความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการในการทดลอง

3.5 การดำเนินการทดลอง

3.5.1 ขั้นตอนการดูดซับ

1) การศึกษาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของถ้ำลอยซานอ้อยที่ใช้ดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียดังเคราะห์

ทำการทดลองโดยชั่งถ้ำลอยซานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรน้ำเสียดังเคราะห์ และเติมน้ำเสียดังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในหลอดเขย่านำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดในตาราง 4.1 เมื่อครบตามเวลานำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2) การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมของถ้ำลอยขานอ้อย

ทำการทดลองโดยชั่งถ้ำลอยขานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ และเติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในหลอดเขย่า นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 แล้วเมื่อครบตามเวลานำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3) การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมสำหรับการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ

ทำการทดลองโดยชั่งถ้ำลอยขานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ และเติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 ลงในหลอดเขย่า นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดในตาราง 4.1 เมื่อครบตามเวลานำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4) การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโครเมียม

ทำการทดลองโดยชั่งถ้ำลอยขานอ้อยปริมาณ 5, 10, 20, 30 และ 40 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์และเติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 2 ลงในหลอดเขย่า นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 แล้วเมื่อครบตามเวลานำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.5.2 ขั้นตอนการทำการเป็นก้อนแข็ง

1) การศึกษาอัตราส่วนถ้ำลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยทุกส่วนผสมจะใช้อัตราบ่ม 7 วัน

ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนถ้ำลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนที่ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 จากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการชะละลาย

2) การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่มโดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และแปรค่าระยะเวลาบ่มที่ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน จากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการชะละลาย

3) การศึกษาผลการชะละลาย

ทำการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540

- บดลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดในปริมาณต่างๆ ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
- นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4.5.2.3.1 หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าพีเอชของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
- เขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุนด้วยอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
- วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในของเหลวที่ผ่านการกรอง ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีหาโดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy โดยตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลของบริษัทน้ำตาลสระบุรี จำกัด ในรูปออกไซด์ รวมทั้งนำส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแสดงด้วยเพื่อเปรียบเทียบกัน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของ เถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์กับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า เถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์ มีแคลเซียม (CaO) อยู่เพียงร้อยละ 3.63 และ 11.92 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอยู่ถึงร้อยละ 63.82 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมนี้ จะทำปฏิกิริยาน้ำ (H_2O) ซึ่งก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวขึ้น ดังนั้น เถ้าลอยทั้ง 3 ชนิดจึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เถ้าลอยขานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) โดยมีอยู่ร้อยละ 67.94 โดยน้ำหนัก และมีผลรวมของซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับร้อยละ 74.30 โดยน้ำหนัก สารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยาปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เมื่อเปรียบเทียบผลรวมของ ซิลิกา อลูมินาและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) นี้ กับของเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.54 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อยมาก

ค่า LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยขานอ้อย มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าค่าตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) ที่กำหนดชั้นคุณภาพ F และ C ให้มี LOI มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดย LOI หรือคาร์บอนในเถ้าลอยนี้จะควบน้ำเมื่อทำการผสมเพื่อทำมอร์ต้า ทำให้น้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ เถ้าลอยขานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	เถ้าลอยขานอ้อย	เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
Na ₂ O	0.43	-	0.26
MgO	1.23	2.13	1.50
Al ₂ O ₃	4.75	28.27	5.42
SiO ₂	67.94	35.43	20.20
P ₂ O ₅	1.55	-	-
SO ₃	0.12	2.35	2.55
Cl	-	-	-
K ₂ O	2.19	2.48	0.46
CaO	3.63	11.92	63.82
TiO ₂	0.22	0.38	-
MnO	0.14	0.11	-
Fe ₂ O ₃	1.61	14.57	2.92
CuO	0.01	0.05	-
Rb	0.01	-	-
SrO	-	0.09	-
ZrO ₂	0.01	-	-
ZnO	-	0.01	-
PbO	-	0.04	-
LOI	16.16	-	-
รวม	100.00	97.83	97.13

- หมายเหตุ
- 1) ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นข้อมูลจาก อุดม หงษ์ประธานพร (2532)
 - 2) “-” คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของ วัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) จะเห็นว่า เถ้าลอยขานอ้อยไม่อาจจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดๆ ได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดไม่ตรงตามข้อกำหนดของ มาตรฐาน ดังแสดง รายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อย กับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96)

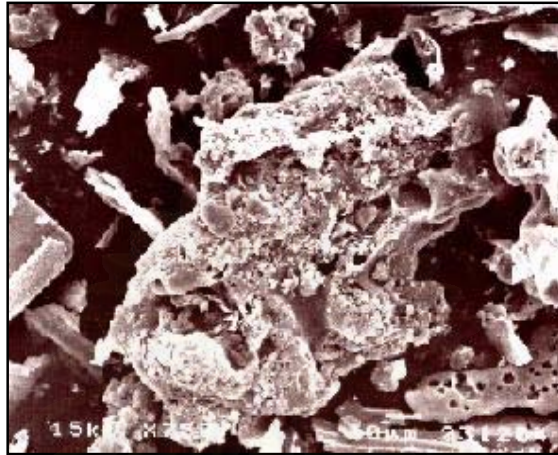
คุณสมบัติ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	ชั้นคุณภาพ N	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C	เถ้าลอย ขานอ้อย
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต่ำสุด	70.0	70.0	50.0	74.30
ปริมาณ SO_3 สูงสุด	4.0	5.0	5.0	0.12
ปริมาณความชื้น สูงสุด	3.0	3.0	3.0	2.15
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้สูงสุด	10.0	6.0	6.0	16.16

4.1.2 ความละเอียด

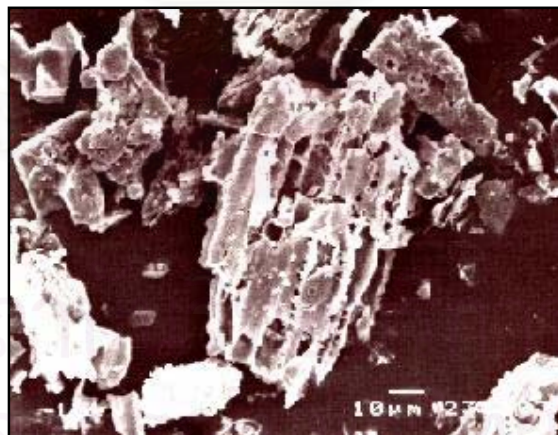
ความละเอียดของเถ้าลอยขานอ้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะหาใน 3 ลักษณะ คือ พิจารณาลักษณะอนุภาค เพื่อดูรูปร่างและลักษณะผิวหน้าของอนุภาค พิจารณาการกระจายขนาด เพื่อศึกษาว่ามี การกระจายตัวอย่างไรและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($d_{50\%}$) เท่าไร และพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะ เพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุ

1) ลักษณะอนุภาค

ลักษณะอนุภาค ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) ซึ่งภาพถ่ายลักษณะอนุภาคเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งใช้กำลังขยายที่ 750 เท่า แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าลอยลิกไนต์ แสดงในรูป 4.2 และ 4.3 ซึ่งใช้กำลังขยายที่ 2,000 และ 2,500 เท่า ตามลำดับ

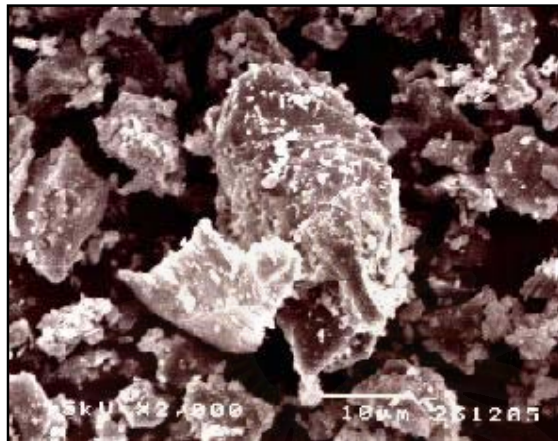


(ก) ฝัากลอยชานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า

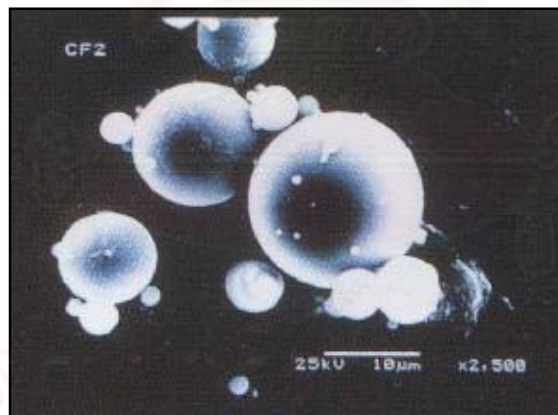


(ข) ฝัากลอยชานอ้อย ที่กำลังขยาย 750 เท่า

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของฝัากลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเส้นใยเส้นใยคาร์บอน
ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2544)

ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย ในรูปที่ 4.1 ที่มีลักษณะอนุภาคเป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม มีรูปร่างไม่แน่นอน คือ มีลักษณะเป็นเศษเล็กๆ จนถึงเป็นก้อนอนุภาค และมีรูเล็กๆ และ โพร่งที่ผิวอนุภาคเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย กับลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ ในรูปที่ 4.3 พบว่ามีความแตกต่างกันมากพอสมควร โดยลักษณะต่างๆ ไปของเถ้าลอยลิกไนต์ จะเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบ

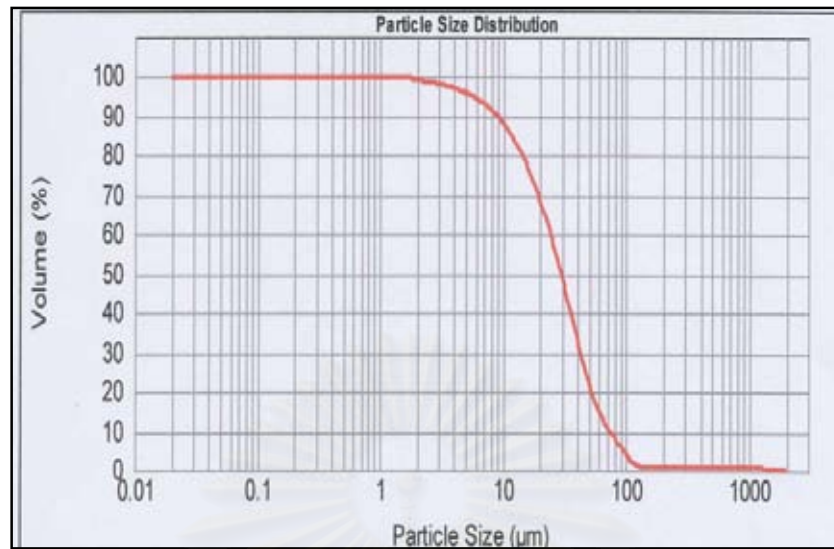
ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อยที่เห็นนั้น อาจเป็นผลจากลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาเผาและสภาพการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น สำหรับลักษณะอนุภาคที่กลมและผิวเรียบของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น จะเกิดเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นถึง 1,500 องศาเซลเซียส แต่หากอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลงมามาก ลักษณะอนุภาคก็จะไม่กลมอย่างสม่ำเสมอ (Wesche, 1991) ลักษณะอนุภาคที่เป็นทรงกลมผิวเรียบและเล็กละเอียดทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์จะทำหน้าที่เสมือนตัวหล่อลื่นระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุผสม ซึ่งมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ดังนั้นหากเถ้าลอยยังมีรูปร่างกลมเป็นจำนวนมากและมีขนาดพอเหมาะก็จะทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยนั้นมีคุณสมบัติในการใช้งานที่ดีขึ้น

นอกจากนั้น สีของเถ้าลอยก็สามารถบอกได้อย่างคร่าวๆ ถึงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย คือ เถ้าลอยที่มีส่วนค่อนข้างดำ เป็นไปได้ที่จะมีปริมาณคาร์บอน หรือ ออกไซด์ของเหล็กอยู่สูง

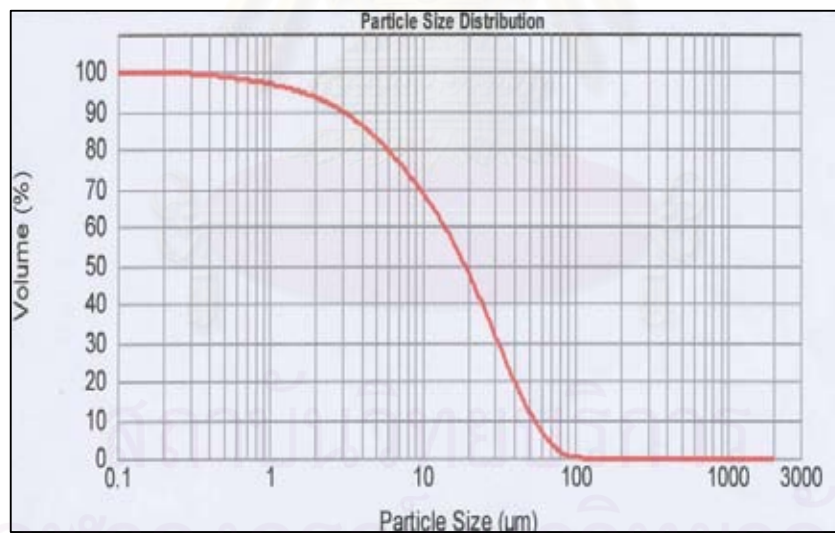
2) การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยชานอ้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยชานอ้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามลำดับ

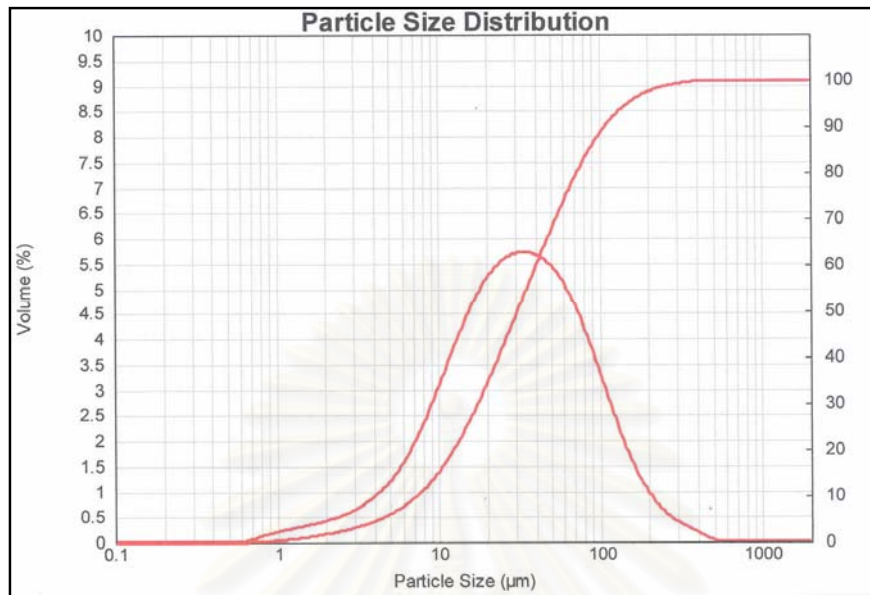
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



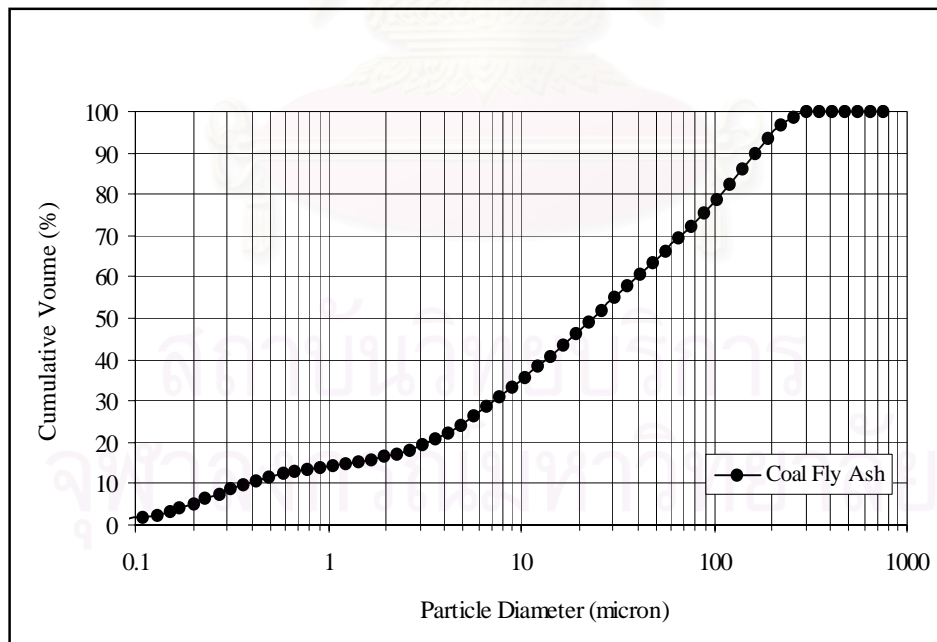
รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยขานอ้อย



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคและเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสม โดยปริมาณของเถ้าลอยขาน้อย



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาณของเถ้าลอยลิกไนต์
ที่มา : Inthasaro (2002)

จากรูปที่ 4.6 แสดงจะเห็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดละเอียดกว่าเถ้าลอยขานอ้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของเถ้าลอยลิกไนต์ ที่แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002) จะเห็นว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีการกระจายอนุภาคที่กว้างกว่าเถ้าลอยขานอ้อย สำหรับขนาดอนุภาคที่ร้อยละ โดยปริมาตรสะสมเท่ากับ 10, 50 และ 90 แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของ เถ้าลอยขานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์ และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	$d_{10\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{50\%}$ (ไมโครเมตร)	$d_{90\%}$ (ไมโครเมตร)
เถ้าลอยขานอ้อย	7.296	30.893	107.932
เถ้าลอยลิกไนต์	0.430	27.320	91.640
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.941	18.238	52.476

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

3) พื้นที่ผิวจำเพาะ

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ มีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานในการหาความละเอียด ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยขานอ้อยเปรียบเทียบกับเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ หาโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM C204-96

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของ เถ้าลอยขานอ้อย เถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนิดตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ชม. ² /กรัม)
เถ้าลอยขานอ้อย	4,121
เถ้าลอยลิกไนต์	2,370
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,380

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002)

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) จะวัดระยะเวลาที่อากาศจำนวนหนึ่ง ไหลผ่านชั้นเถ้าลอยที่ถูกอัดแน่น ซึ่งอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนของเถ้าลอยชานอ้อยนั้น ทำให้ชั้นการอัดแน่นนั้นหลวมกว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งมีอนุภาคค่อนข้างกลม เป็นผลให้ความต้านทานอากาศที่ไหลผ่านชั้นการอัดแน่นนั้นของเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุนอยู่มากของ เถ้าลอยชานอ้อย ก็ยังทำให้อากาศไหลผ่านไปได้อย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ เถ้าลอยชานอ้อยจึงมีค่าสูง แม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ฉะนั้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจึงอาจจะไม่สอดคล้องกับค่าความละเอียดของอนุภาคก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนและมีรูพรุนมาก ดังเช่นเถ้าลอยชานอ้อย แต่ค่าความพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ ก็เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการหา และเป็นวิธีที่ดีพอสมควรที่จะบอกได้อย่างคร่าวๆ ถึงคุณภาพหรือลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยหรือวัสดุละเอียดอื่นๆ ที่จะใช้ในซีเมนต์ รวมทั้งบอกลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์เมื่อผสมวัสดุอื่น เช่น ความต้องการน้ำและความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยชานอ้อย หาโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าด ตามมาตรฐาน ASTM C188-95 ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยชานอ้อย รวมทั้งเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.12
เถ้าลอยชานอ้อย	1.85
เถ้าลอยลิกไนต์	2.56

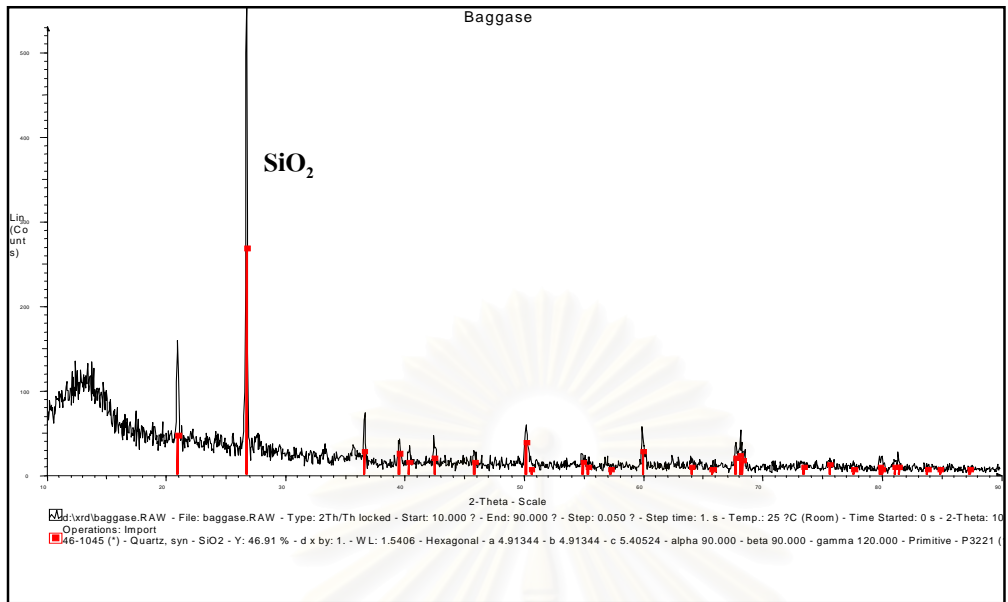
หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

จากตารางที่ 4.5 ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันนั้น เนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมีในแต่ละวัสดุ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีแต่ละตัวนั้น จะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน พวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ได้แก่ คัลเซียม (CaO) อลูมินา (Al₂O₃) และเหล็ก (Fe₂O₃) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่มากในปูนซีเมนต์

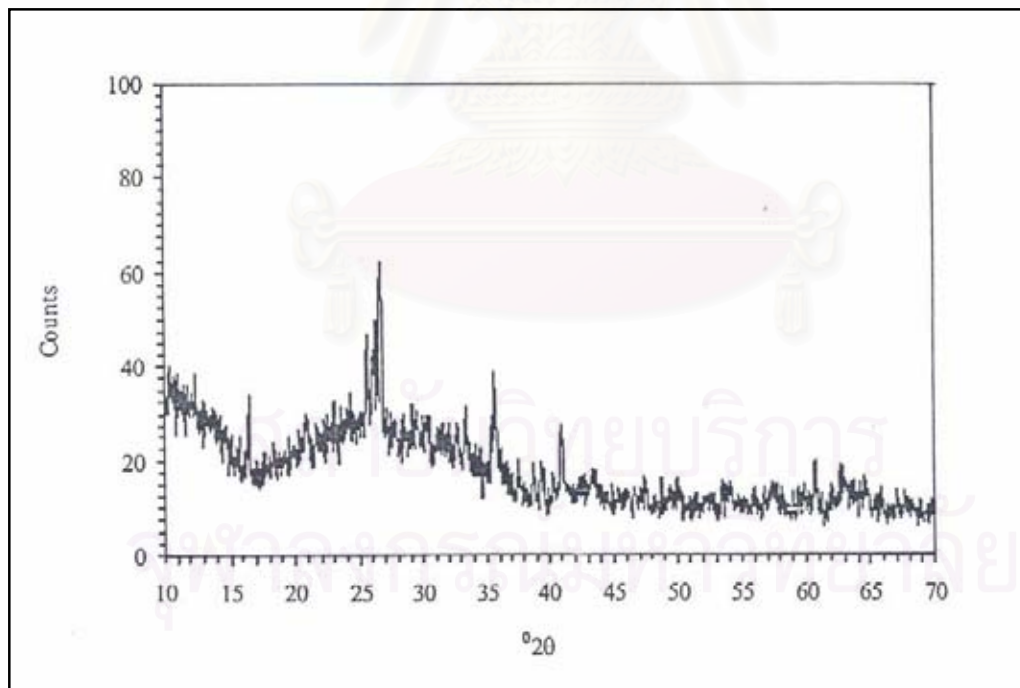
ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์ ส่วนพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในเถ้าลอยขานอ้อย ทำให้เถ้าลอยขานอ้อยมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ นอกจากนี้ ความถ่วงจำเพาะยังขึ้นอยู่กับความพรุนของอนุภาค ซึ่งหากอนุภาคมีความพรุนสูง ค่าความถ่วงจำเพาะจะต่ำ

4.1.4 ส่วนประกอบทางแร่

ส่วนประกอบทางแร่ซึ่งแสดงในรูปผลึก (crystalline phases) ของ เถ้าลอยขานอ้อย ที่วิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) แสดงในรูปที่ 4.8 สารประกอบตัวหลักที่พบมากของเถ้าลอยขานอ้อย คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งอยู่ในรูปควอทซ์ (Quartz) ซึ่งจากการศึกษาในอดีต พบว่า สารประกอบที่สำคัญของเถ้าลอยนั้นมี 3 ลักษณะที่สำคัญรวมกันอยู่ คือ ควอทซ์ (Quartz) ก๊าซ (Glass) และ มุลไลต์ (Mullite) โดยมีเฉพาะก๊าซเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดี แต่อีกสองลักษณะที่เหลือจะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้น้อย จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction (XRD) ของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เกาะ ที่ทำการศึกษาโดย Inthasaro (2002) จะเห็นว่า ส่วนประกอบหลักของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น อยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous หรือ ในรูปแก้ว) มีส่วนประกอบในรูปผลึกไม่มากนักที่ตรวจพบ ซึ่งเหมือนกับผลการวิจัยโดยผู้วิจัยก่อนหน้านี้หลายท่านที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเถ้าลอยลิกไนต์ การที่เถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนประกอบหลักในรูปแก้วซึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี ทำให้มีคุณสมบัติปอซโซลานเมื่อผสมในคอนกรีต เป็นเหตุให้เถ้าลอยลิกไนต์สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงาน ก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.8 ผล XRD ของถ้ำลอยซานอ้อย



รูปที่ 4.9 ผล XRD ของถ้ำลอยติกไนต์

ที่มา : Inthasaro (2002)

4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

4.2.1 ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว

ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ หาโดยการใช้ชุดทดสอบไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C187-86 และ ASTM C191-92 ตามลำดับ ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่างๆกัน ซึ่งจะเห็นว่าทั้งปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายจะสูงขึ้น เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น

ปริมาณน้ำที่ต้องการมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น มีสาเหตุจากการที่เถ้าลอยขานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนอยู่ค่อนข้างสูง ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำบางส่วนไปเมื่อผสม ทำให้มีความต้องการน้ำที่ความชื้นเหลวปกติเพิ่มขึ้น เถ้าลอยขานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนถึงร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ลักษณะของอนุภาคเถ้าลอยก็มีผลต่อความต้องการน้ำด้วย กล่าวคือ ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม ผิวไม่เรียบและมีรูโพรงที่มาก ซึ่งเป็นลักษณะของเถ้าลอยขานอ้อย

ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยขานอ้อย ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดสารประกอบที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ก็ยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุแรกๆ

ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย
ขานอ้อย (กฤษณ์ จารุทะวีย์, 2545)

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณน้ำที่ต้องการ	ระยะเวลาการก่อตัว	
		ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
ซีเมนต์เพสต์ธรรมดา F00	0.262	73	255
ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยขานอ้อย			
B10	0.349	104	280
B15	0.376	122	295
B20	0.415	128	305
B30	0.506	133	320
B40	0.604	148	340

หมายเหตุ : ปริมาณน้ำที่ต้องการ แสดงในรูปอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+FLY ASH)]
ที่ความชื้นเหลวปกติ

4.3 ขั้นตอนการดูดซับ

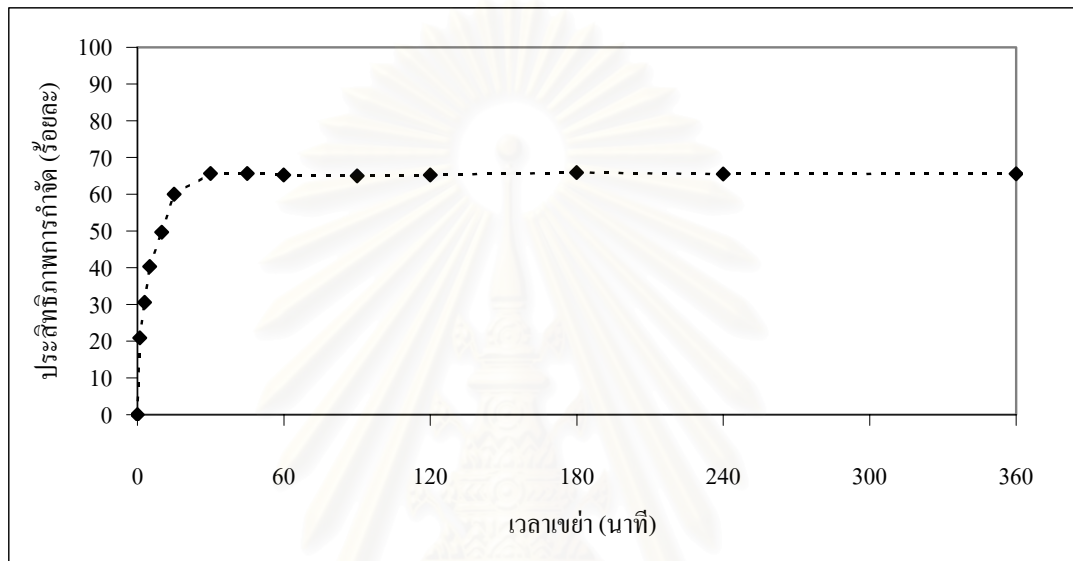
4.3.1 การศึกษาถึงเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลของเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ดูดซับโครเมียมจากน้ำเสีย สังเคราะห์

การทดลองขั้นนี้ จะทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 และ 2 ในการทดสอบการดูดซับด้วยเถ้าลอยขานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 (สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1), รูปที่ 4.11 (สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2) และตารางในภาคผนวก

สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ในช่วงระยะเวลาในการเขย่า 30 นาทีแรก ร้อยละการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจาก 30 นาที ร้อยละการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีร้อยละการกำจัดโครเมียมเป็นร้อยละ 65 ก่อนข้างจะคงที่

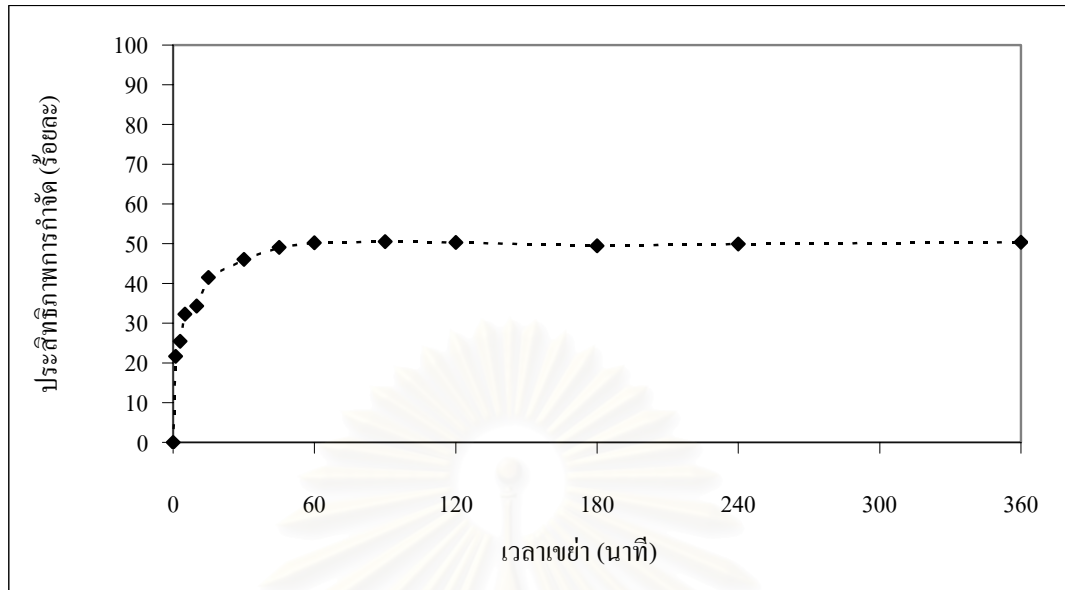
สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ในช่วงระยะเวลาในการเขย่า 45 นาทีแรก ร้อยละการกำจัดโครเมียม จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจาก 45 นาที ร้อยละการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีร้อยละ การกำจัดโครเมียมเป็นร้อยละ 50 ก่อนข้างจะคงที่

เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมสำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 และ 2 คือ 30 และ 45 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วย
 เกลือยอนานอ้อย 20 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 20 มก./ล.
 ที่พีเอช 1

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วย
 ถ้ำลอยชานอ้อย 20 ก./ล. น้ำตัวอย่าง โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 20 มก./ล.
 ที่พีเอช 2

4.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมของถ้ำ ลอยชานอ้อย

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20, 30, 40, 50, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ถึง 6 ในการทดสอบดูดซับด้วยถ้ำลอยชานอ้อยจากโรงงาน
 น้ำตาล จังหวัดสระบุรี ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยทำการเขย่าเป็นเวลา 45 นาที ซึ่งผลการ
 ทดลองแสดงดังรูปที่ 3 และภาคผนวก

ที่ค่าพีเอช 1 สำหรับทุกความเข้มข้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัด
 สูงสุดของแต่ละความเข้มข้น สำหรับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละ
 การกำจัดเป็น 71.71, 67.29, 37.96, 32.20, 30.59 และ 12.07 ตามลำดับ และมีความสามารถในการกำจัด
 เป็น 0.36, 0.68, 0.57, 0.68, 0.84 และ 0.62 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกรัมของถ้ำลอยชานอ้อย
 ตามลำดับ

และที่ค่าพีเอช 2 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ
 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดที่ค่าพีเอช 1 สำหรับความเข้มข้น 10, 20, 30,
 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดเป็น 62.20, 50.94, 32.58, 24.87, 18.26 และ 9.04

ตามลำดับและมีความสามารถในการกำจัดเป็น 0.32, 0.54, 0.49, 0.53, 0.49 และ 0.47 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกรัมของถั่วลอซซานอ้อย ตามลำดับ

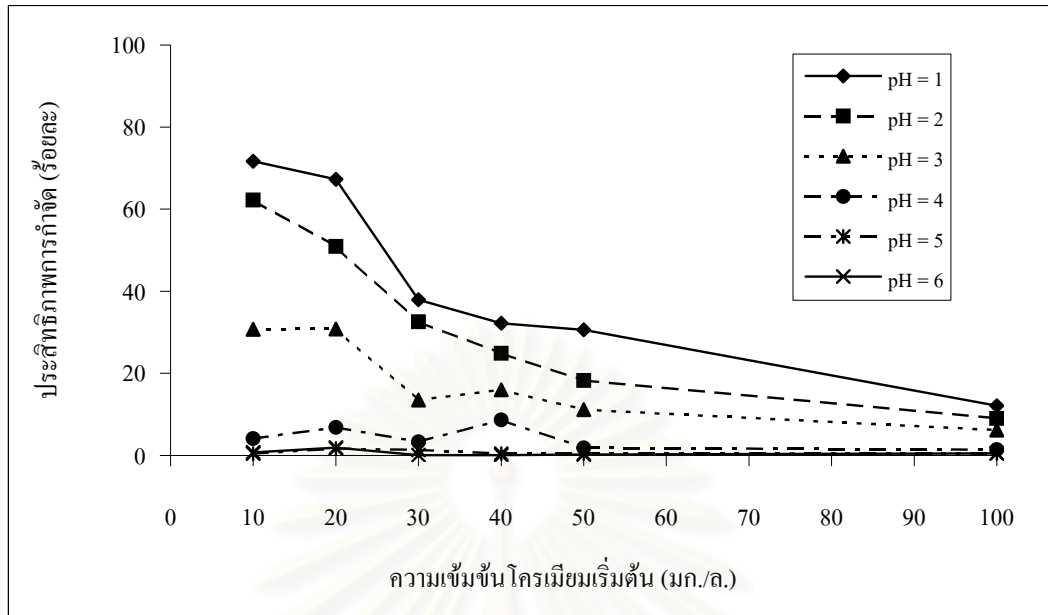
ที่ค่าพีเอช 3 และ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดจะลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดที่ค่าพีเอช 1 และ 2

ที่ค่าพีเอช 3 สำหรับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดเป็น 30.75, 30.83, 13.49, 16.00, 11.13 และ 6.15 ตามลำดับ และมีความสามารถในการกำจัดเป็น 0.15, 0.31, 0.21, 0.35, 0.30 และ 0.32 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกรัมของถั่วลอซซานอ้อย ตามลำดับ

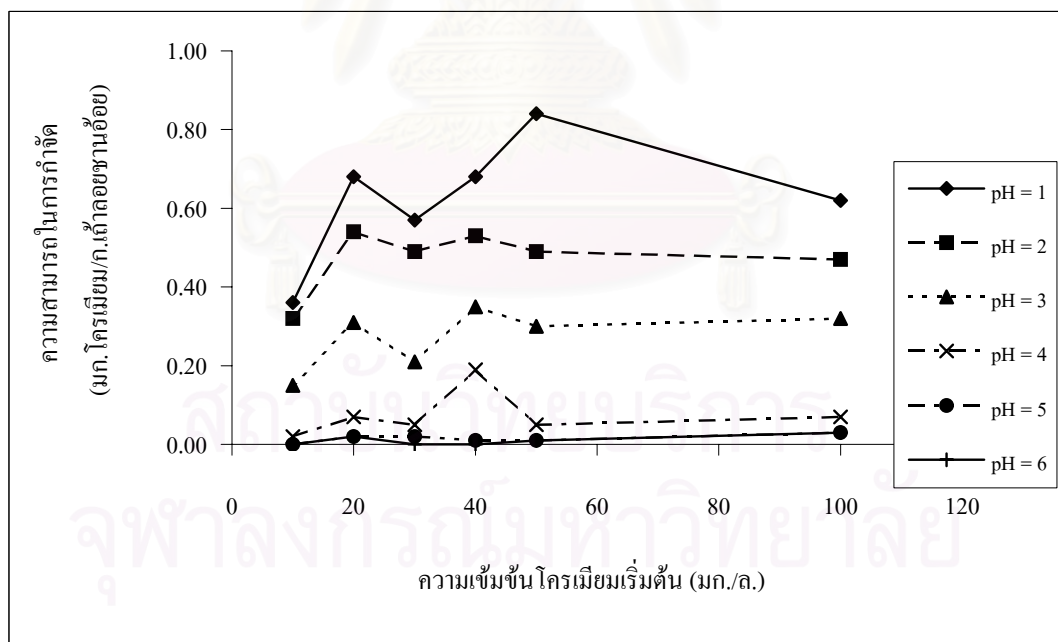
ที่ค่าพีเอช 4 สำหรับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดเป็น 4.14, 6.79, 3.33, 8.63, 1.81 และ 1.38 ตามลำดับและมีความสามารถในการกำจัดเป็น 0.02, 0.07, 0.05, 0.19, 0.05 และ 0.03 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกรัมของถั่วลอซซานอ้อย ตามลำดับ

ที่ค่าพีเอช 5 และ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดจะลดลงจนมีค่าต่ำมากถึงไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้อย่างมีนัย

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้การทดลองดูดซับโครเมียมด้วยถั่วลอซซานอ้อยในทุกๆ ค่าพีเอชแล้วพบว่า เมื่อค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม รวมถึงความสามารถในการกำจัดลดลง โดยค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดสูงที่สุดคือค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเท่ากับ 1 โดยเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโครเมียมของน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชเท่ากันในแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า น้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีค่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมต่ำที่สุด โดยเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรจะให้ความสามารถในการกำจัดเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจะให้ความสามารถในการกำจัดค่อนข้างคงที่ และจากข้อมูลน้ำเสียจากโรงงานที่มีโครเมียมเจือปนในปัจจุบันพบว่า น้ำเสียมีค่าความเข้มข้นโครเมียมเจือปนเฉลี่ย 77.68 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) ดังนั้นในขั้นตอนการทดลองต่อไปจึงเลือกทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโครเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอชเท่ากับ 1



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

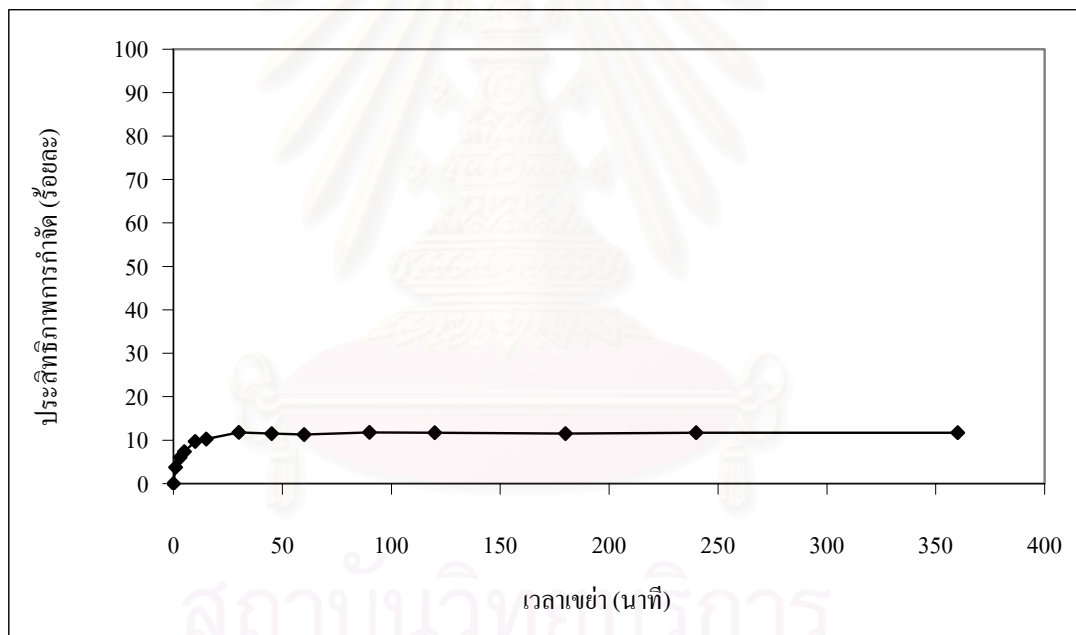


รูปที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดโครเมียมของเถ้าลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ในการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

4.3.3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมสำหรับการทดลองไอโซโทมการดูดซับ

การทดลองขั้นตอนนี้จะทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดลองหาไอโซโทมการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ในการทดสอบการดูดซับด้วยถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ

ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 และตารางภาคผนวก พบว่าการกำจัดโครเมียมสำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 จะค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ 30 นาทีแรก โดยมีร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ 30 นาทีเป็นร้อยละ 66.09 และเมื่อเขย่าครบ 360 นาที ร้อยละการกำจัดโครเมียมเป็นร้อยละ 65.99 ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมของการกำจัดโครเมียมสำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 คือ 30 นาที



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัด (การดูดซับ) ในการกำจัดโครเมียมด้วยถ้ำลอยชานอ้อย 20 ก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 1

4.3.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโครเมียม

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ในการทดสอบการดูดซับด้วยถ้ำลอยขานอ้อยโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น 5, 10, 20, 30 และ 40 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 30 นาที ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ด้วยถ้ำลอยขานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณถ้ำลอยขานอ้อยที่ใช้ (ก./ล. น้ำตัวอย่าง)	ปริมาณโครเมียมที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มก./ก. ถ้ำลอยขานอ้อย)
5	4.80	0.9600
10	7.13	0.7133
20	12.70	0.6350
30	15.43	0.5144
40	19.03	0.4758

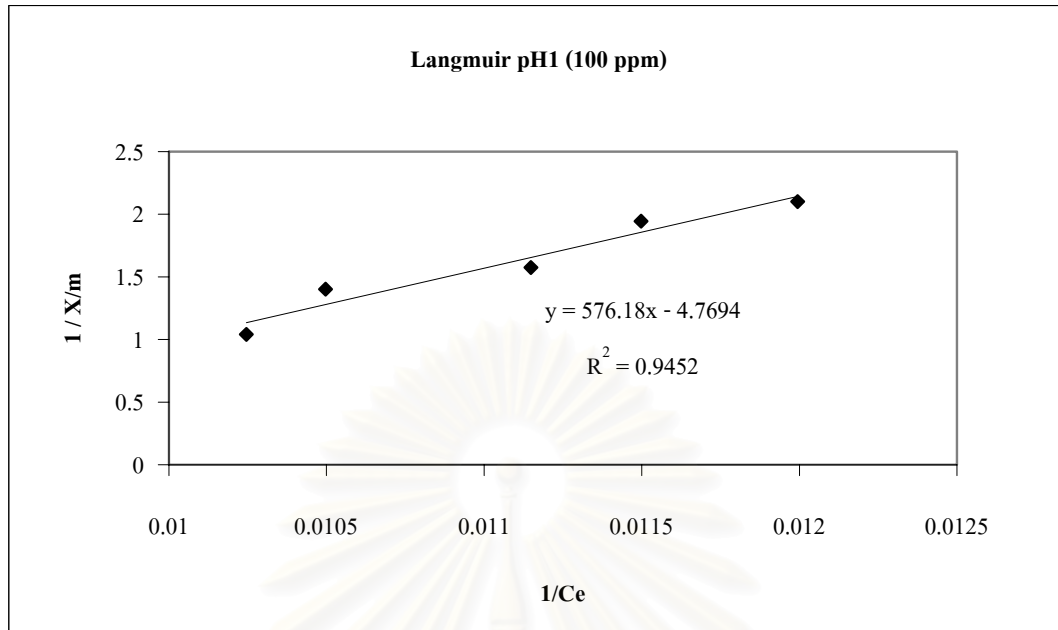
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณถ้ำลอยขานอ้อยที่ใช้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมลดลง และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และ แลงมัวร์ ซึ่งแสดงดังรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ค่า R-square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบพบว่า

ค่า R-square ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นโครเมียม 100 มก./ล. ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 มีค่าเป็น 0.9196 และ ค่า R-square ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นโครเมียม 100 มก./ล. ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 มีค่าเป็น 0.9452

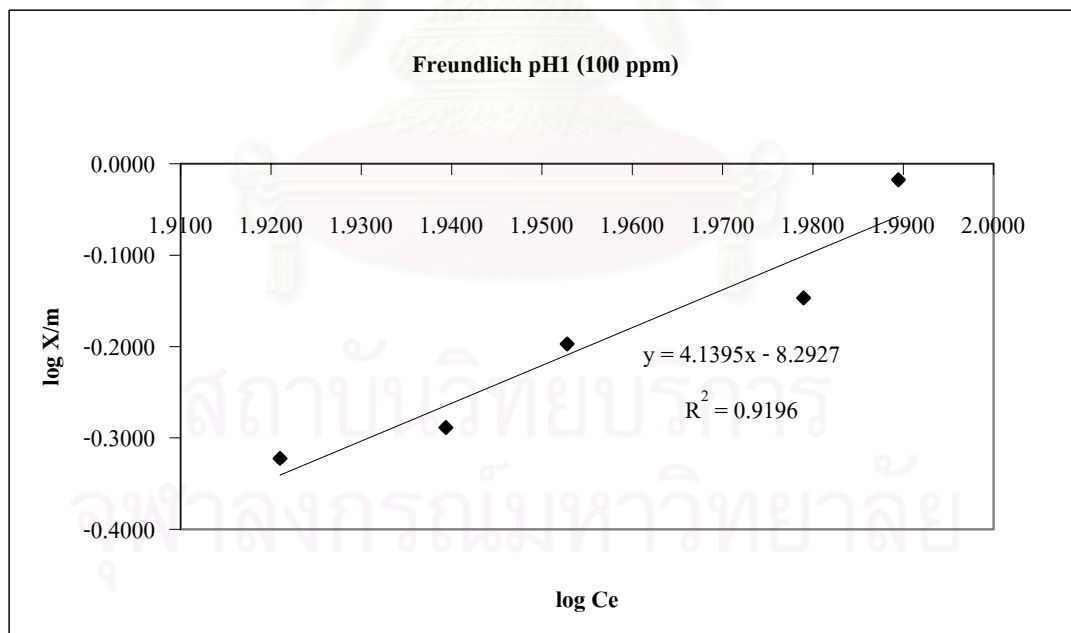
ดังนั้นการกำจัดโครเมียมด้วยถ้ำลอยขานอ้อยจึงสามารถเข้ากับไอโซเทอมทั้งแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช โดยไอโซเทอมการกำจัดโครเมียมแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช ของถ้ำลอยขานอ้อยในการทดลองนี้เป็นดังสมการ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ

$$1 / (x/m) = 5.7618 (1/C_e) - 4.7694 \quad (4.1)$$

$$\log (x/m) = 4.1395 \log C_e - 8.2927 \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ้ำลอยซานอ้อยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย
ตั้งคราะห้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 1



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของถ้ำลอยซานอ้อยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย
ตั้งคราะห้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 1

4.4 ขั้นตอนการทำเป็นก้อนแข็ง

4.4.1 การศึกษาหาอัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยทุกส่วนผสมจะใช้อัตราปม 7 วัน

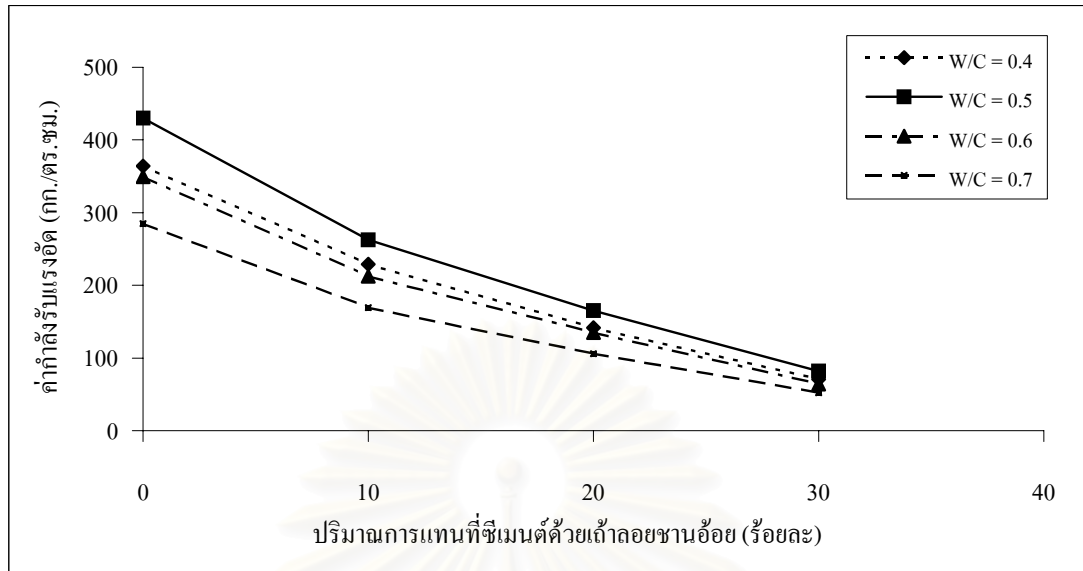
ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด จะทำการหล่อลูกมอร์ต้า ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชเท่ากับ 1 ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยขานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการปม 7 วัน

กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อย แสดงในตารางภาคผนวก และรูปที่ 4.17 และ 4.18 สำหรับร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา แสดงในตารางที่ 4.8 และ ตามลำดับ

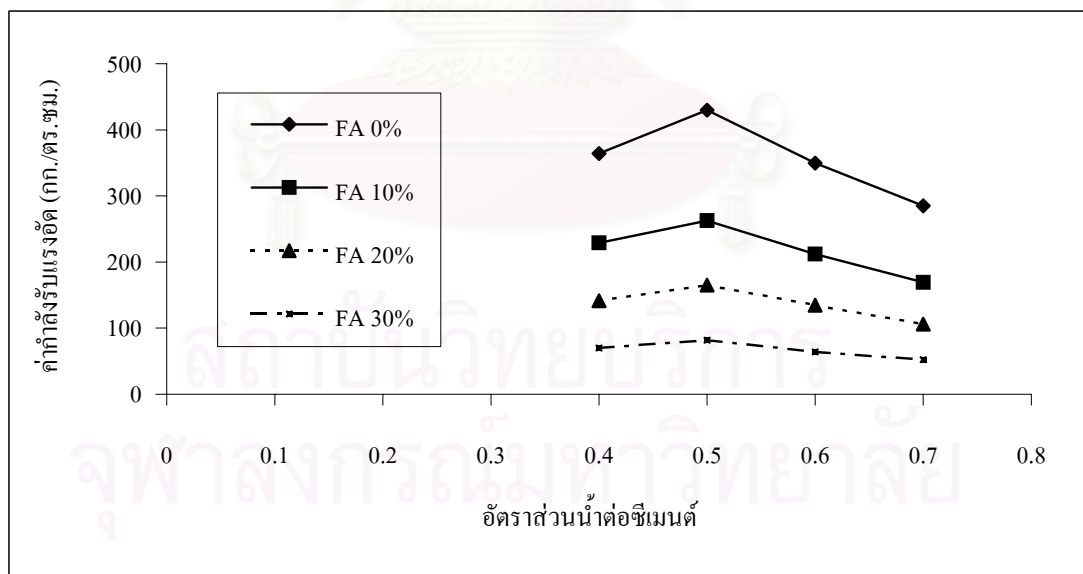
ตาราง 4.8 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา

ตัวอย่าง	ร้อยละกำลังอัด			
	W/C = 0.4	W/C = 0.5	W/C = 0.6	W/C = 0.7
FA0	100	100	100	100
FA10	62.88	61.08	60.73	59.48
FA20	38.9	38.44	38.59	37.24
FA30	19.42	19.08	18.39	18.37

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมที่ปริมาณต่างๆ โดยมีระยะเวลาบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า มอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยทุกปริมาณการแทนที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า มอร์ต้าธรรมดาที่อายุการบ่มเดียวกัน และเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อยสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดจะมีค่าต่ำลง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 เมื่อมีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 228.95, 262.71, 212.38 และ 169.51 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 62.88, 61.08, 60.73 และ 59.48 เมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดา ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปริมาณการแทนที่ มีค่าต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ

4.4.2 การศึกษาผลการชะละลายของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมที่อัตราส่วนซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายสำหรับมอร์ต้า ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมลอย	ร้อยละการแทนที่	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นโครเมียม (มก./ล.)
0.4	0	12.39	0.00
	10	12.22	0.00
	20	12.06	0.06
	30	11.88	0.09
0.5	0	12.34	0.00
	10	12.15	0.05
	20	12.11	0.08
	30	11.77	0.13
0.6	0	12.36	0.00
	10	12.13	0.07
	20	12.09	0.10
	30	11.78	0.14
0.7	0	12.28	0.00
	10	11.98	0.08
	20	11.95	0.11
	30	11.64	0.15

หมายเหตุ : N.D. = มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ค่าแน่นอน

ค่าพีเอชของน้ำสกัดแสดงในตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดของก้อนซีเมนต์มีค่าค่อนข้างสูงอาจเกิดจากการละลายของคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ เมื่อเพิ่มการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยขานอ้อยพบว่าค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าลดลงเล็กน้อยทุกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยขานอ้อย สาเหตุมาจากส่วนผสมมีปูนซีเมนต์ลดลง คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่ชะละลายได้มีค่าลดลง พีเอชจึงลดลง และจากตารางจะเห็นว่าปริมาณโครเมียมในน้ำจะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มก./ล. ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนผสมของการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยขานอ้อย เท่ากับ 0.5 เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ใช้ในการทดลองต่อไป

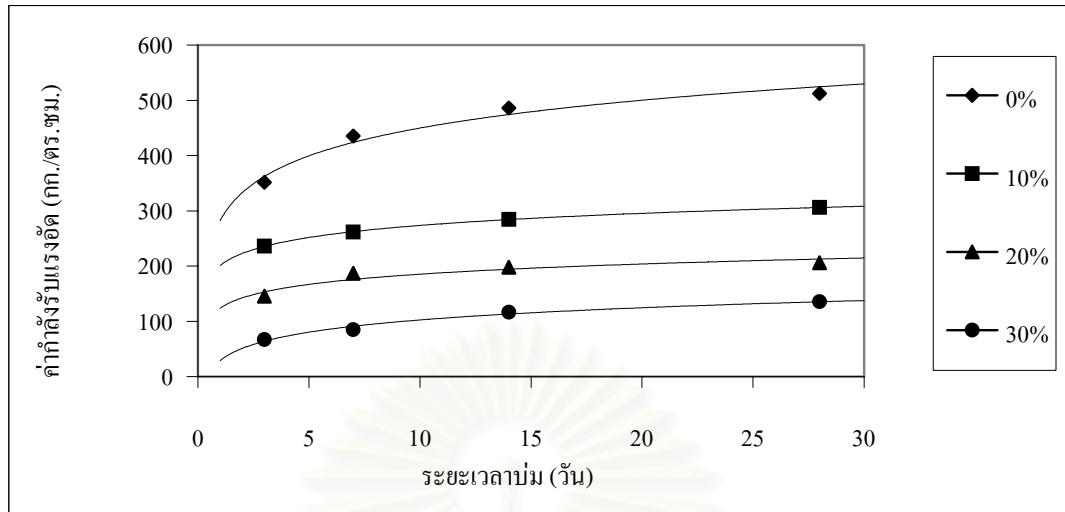
4.4.3 การศึกษาการแปรค่าระยะเวลาการบ่ม โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม จากการทดลองที่ 1

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด จะทำการหล่อลูกบาศก์มอร์ต้า ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 0.5 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, และ 28 วัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อใช้เถ้าลอยขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าต่ำมาก ทุกระยะเวลาบ่มมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยขานอ้อยร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.² และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา เพียงประมาณร้อยละ 58.48 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปริมาณการแทนที่ มีค่าค่อนข้างต่ำ สาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยมีค่าต่ำมาก เนื่องมาจากการที่เถ้าลอยขานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนอยู่สูงคือ ร้อยละ 16.16 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาร์บอนจะดูดน้ำที่ใช้ผสมขณะทำมอร์ต้า ทำให้มีปริมาณน้ำที่จะใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และตัวอย่างที่ผสมได้นั้นจะมีลักษณะ ร่วน แห้ง เกาะตัวกันได้ไม่ดี โดยเฉพาะเมื่อมีปริมาณการแทนที่สูงๆ และเมื่อพิจารณาถึงค่าการชะละลายของโลหะหนักของทุกการแทนที่แล้ว ไม่มีค่าที่เกินมาตรฐานทุกอัตราส่วน

ตาราง 4.10 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา

ตัวอย่าง	ร้อยละกำลังอัด			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
FA00	100	100	100	100
FA10	67.02	60.03	58.48	59.78
FA20	41.39	42.83	40.68	40.26
FA30	19.46	19.46	23.95	26.45



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่มของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5

4.4.3 การศึกษาผลการชะละลายของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียม โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายสำหรับมอร์ต้า ขนาด 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เท่ากับ 0.5 และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตาราง 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย

เวลาบ่ม (วัน)	ร้อยละการแทนที่	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นโครเมียม (มก./ล.)
7	0	12.33	0.00
	10	12.10	0.07
28	0	12.15	0.00
	10	12.08	0.02

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น สาเหตุอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาบางส่วนที่อยู่ในรูปของผลึกซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำสกัดลดลง จึงทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น ส่วนปริมาณโครเมียมในน้ำจะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งไม่เกิน 5 มก./ล.

4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนกับการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสม สำหรับอัตราส่วนผสมของวัสดุในการทำคอนกรีตบล็อก ใช้อัตราส่วน วัสดุประสาน : ทราช : น้ำ เท่ากับ 1 : 2.75 : 0.5 (วัสดุประสาน เมื่อมีเถ้าลอยแทนที่ ใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เถ้าลอย เท่ากับ 9 : 1)

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกธรรมดา 1 ก้อน

ส่วนประกอบ	วัสดุที่ใช้			คอนกรีตบล็อกธรรมดา	
	ราคา (บาท/หน่วย)	น้ำหนัก/ หน่วย (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2,320 บาท/ตัน	1,000 กก.	2.32	2.025	4.70
ทราช	250 บาท/ลบ.ม.	2,650 กก.	0.094	5.569	0.52
น้ำ	15 บาท/หน่วย	1,000 กก.	0.015	1.012	0.015
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	5.235

หมายเหตุ * ไม่รวมค่าแรงงานและค่าขนส่ง

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เมื่อใช้เถ้าลอยขานอ้อย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ส่วนประกอบ	คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยขานอ้อย ร้อยละ 10		คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยขานอ้อย ร้อยละ 20		คอนกรีตบล็อก ผสมเถ้าลอยขานอ้อย ร้อยละ 30	
	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณ ที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์	1.823	4.23	1.620	3.76	1.418	3.29
ทราย	5.569	0.52	5.569	0.52	5.569	0.52
น้ำ	1.012	0.015	1.012	0.015	1.012	0.015
เถ้าลอย	0.203	- *	0.405	- *	0.608	- *
รวม ค่าใช้จ่าย	-	4.765	-	4.295	-	3.825

หมายเหตุ * ไม่รวมค่าแรงงานและค่าขนส่ง

จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 จะเห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน เท่ากับ 5.235 บาท หรือประมาณ 6 บาท เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และเท่ากับ 4.77, 4.30 และ 3.82 บาท เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ทั้งนี้สำหรับการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน ในการคิดค่าใช้จ่ายยังต้องมียอดประกอบอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น

- ค่าขนส่ง จากรายงานของศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางใต้ทำการประเมินค่าน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อการขนส่งของเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเท่ากับ 0.69 บาท/กก. (กรมทางหลวง, 2545) ดังนั้นเมื่อมีการรวมค่าขนส่งแล้วอาจทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อนมีการเปลี่ยนแปลงทำให้อาจมีค่าใช้จ่ายที่มากกว่าต้นทุน โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางในการขนส่งด้วย เพราะถ้าห่างแหล่งวัสดุมากค่าขนส่งจะสูงขึ้น

- ค่าจ้างแรงงาน จากประกาศกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2546 พบว่าอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำเท่ากับ 133 บาท แต่หากเป็นแรงงานในท้องที่กรุงเทพและปริมณฑลจะมีอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำที่สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 170 บาท และหากเป็นแรงงานต่างจังหวัดยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่โรงงานผลิตน้ำตาลซึ่งตั้งอยู่ในจ.สระบุรี ก็จะมีอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำเท่ากับ 151 บาท ดังนั้น ค่าจ้างแรงงานก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาในการคิดค่าใช้จ่าย

- ค่าทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและค่าทดสอบแห้งตัวอย่าง เพื่อต้องการควบคุมคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้แทนปูนซีเมนต์นั้นให้อยู่ในคุณภาพที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและทดสอบแห้งตัวอย่างอยู่เสมอ องค์ประกอบทางเคมีและค่าทดสอบแห้งตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เช่น ซิลิกอน ไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ค่าทดสอบแรงอัดที่ 7 วันและที่ 28 วัน ค่าระยะเวลาก่อตัว เป็นต้น โดยที่ค่าธรรมเนียมในการทดสอบเหล่านี้เพื่อหาค่าเหล่านี้ประมาณตัวอย่างละ 4,000-5000 บาท ซึ่งราคานี้ อาจแตกต่างกันไปตามสถานที่ที่รับตรวจสอบตัวอย่างนั้นๆ

- ค่าใช้จ่ายในการจัดการกำจัดกากไม่ได้เอามาใช้ประโยชน์ จากข้อมูลของ กฟผ. ในปีพ.ศ. 2544 รายงานว่าราคาของกำจัดรวมค่าขนส่งและค่าการจัดการกำจัดจะอยู่ที่ 1,000 บาท/ตัน ในขณะที่ซีเมนต์ปกติจะจำหน่ายในราคาประมาณ 2,000 บาท/ตัน แต่เนื่องจากกำจัดยังไม่จัดเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจึงยังคงมีความไม่แน่นอนในการควบคุมคุณภาพและการขนส่ง อาจทำให้ค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่า ที่จะนำมาใช้ทดแทนซีเมนต์

นอกจากนี้ยังมีราคาค่าดำเนินการต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น ค่าเสื่อมราคาของเครื่องมือ ค่าติดต่อประสานงานกับหน่วยงานอื่นๆ และค่าบริการอื่นๆ โดยค่าใช้จ่ายอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะเศรษฐกิจในขณะนั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การดูดซับ

1. ค่าพีเอชในช่วงที่ทำการศึกษามีผลกับการดูดซับโครเมียม โดยจะพบว่า การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ จะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 1 และความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะหมดไปเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5-6

2. ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นมีผลกับค่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมต่อปริมาณแฉะลอยซานอ้อยคือ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น แฉะลอยซานอ้อยจะมีค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมลดลง แต่ความสามารถในการดูดซับโครเมียมก่อนข้างคงที่

3. ผลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับโครเมียม พบว่าเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงเวลาสัมผัสค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อเวลาสัมผัสมากกว่าค่านี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

4. สภาวะที่เหมาะสมในการทำไอโซเทอมของการกำจัดโครเมียมด้วยแฉะลอยซานอ้อย คือความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 100 มก./ล. พีเอชของสารละลายเท่ากับ 1 และเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมทั้งแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช

5. อย่างไรก็ตามแฉะลอยซานอ้อยไม่เหมาะที่จะใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 100 มก./ล. เพียงอย่างเดียว เนื่องจากเมื่อดูจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. การใช้แฉะลอยซานอ้อย 40 ก./ล. ไม่สามารถลดปริมาณโครเมียมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ จึงอาจต้องเพิ่มปริมาณแฉะลอยซานอ้อยที่ใช้ดูดซับหรือทำการดูดซับซ้ำหลายครั้ง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เกิดปริมาณแฉะลอยที่ปนเปื้อนโครเมียมมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการทำเป็นก้อนแข็งในการจัดการแฉะลอยที่ได้จากการดูดซับกำจัดโครเมียม

5.1.2 การทำเป็นก้อนแข็ง

1. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทำก้อนแข็งของเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจะเท่ากับ 0.5

2. การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อย มีค่าต่ำลง สำหรับมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ปริมาณการแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 261 กก./ซม.² และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา คิดเป็นร้อยละ 60.03

3. ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่ทุกระยะเวลาบ่มของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา โดยค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยชานอ้อยร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่า 306 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C109-95 ที่กำหนดไว้ที่ 245 กก./ซม.² และมีค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับมอร์ต้าธรรมดา ประมาณร้อยละ 59.78

5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์

1. เถ้าลอยชานอ้อยเป็นวัสดุหยาบที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมากจึงทำให้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้โลหะหนักคือโครเมียมดังนั้นจึงสามารถที่จะนำเถ้าลอยชานอ้อยไปกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ ได้

2. เนื่องจากมีสมบัติความเป็นวัสดุพอซโซลานที่น้อยกว่า และสมบัติทางกายภาพคือลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยชานอ้อยที่ไม่กลมเท่ากับเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้คุณสมบัติด้านการกำลังรับแรงอัดในการใช้งานคอนกรีตของเถ้าลอยชานอ้อยต่ำกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ แต่เมื่อพิจารณาแล้วการใช้เถ้าลอยชานอ้อยก็เป็นอีกทางเลือกในการใช้แทนเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งอาจไม่สามารถหาได้ในทุกท้องถิ่น

3. การใช้เถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องการรับแรงมาก เป็นการประหยัดต้นทุนค่าวัสดุบางส่วนจากการใช้เศษวัสดุทางการเกษตรให้เกิดมูลค่าขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำถ้ำลอยซานอ้อยไปปรับสภาพก่อนนำไปใช้งานจริง เนื่องจากถ้ำลอยซานอ้อย มีค่าพีเอชค่อนข้างสูงแต่ความสามารถในการกำจัด โครเมียมของถ้ำลอยซานอ้อยจะเพิ่มขึ้นที่ค่าพีเอชต่ำ ดังนั้นควรมีการศึกษาหาแนวทางในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีค่าใช้จ่ายต่ำก่อนการนำไปใช้งานจริง
2. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการทดลองในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสียในระบบจริง
3. ควรมีการนำถ้ำลอยซานอ้อยไปบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักชนิดอื่นอีก เพื่อเป็นการทดสอบดูว่าถ้ำลอยซานอ้อยมีประสิทธิภาพการกำจัด โลหะหนักชนิดใดสูงสุด
4. ควรศึกษาหากระบวนการในการปรับสภาพถ้ำลอยซานอ้อยให้เสริมคุณสมบัติในการกำจัด โลหะหนัก เช่น การอัดเม็ดเพื่อให้สามารถทำการทดลองแบบคอลัมน์ได้
5. ควรศึกษาคูสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตที่ใช้ถ้ำลอยซานอ้อยผสมลงไป เช่น ความสามารถในการทำงานได้ ความทนทาน ความสามารถในการซึมน้ำได้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ความต้านทานในการรับแรงอัดและรับแรงดึงของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งอาจจะให้ผลที่ต่างจากงานวิจัยนี้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, สำนักงาน. รายงานข้อศึกษาเรื่องน้ำบาดาล.

กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2520.

จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ

สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค), 2539.

ธิดารัตน์ คำรองสอน. การกำจัดโครเมียมด้วยเมมเบรนสัฟฟลัดและโซคาไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2539.

ปธาน บรรจงปรุ. การสำรวจน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

พุทธิสาร ชัยพันธุ์. การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

เพ็ญประภา คำป้อม. การกำจัดโครเมียมไอออนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โดยวิธีตกตะกอนด้วยขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

เขาวนุช สุจริตธรรม. การตกตะกอนผลึกผลึกโครเมียมจากน้ำเสียฟอกหนังโดยการบำบัดด้วยค่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สถาบันวิจัยพลังงาน. รายงานการศึกษาเรื่องการใช้และประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำบาดาล. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

อดิศักดิ์ ปิยสทธิชัย. การกำจัดโครเมียม (ประจุ+6) ในน้ำเสียโดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยขี้เถ้าลอย

ลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.

อัญชลี จันทวรรณกุล. การกำจัดโครเมียมโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดุก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

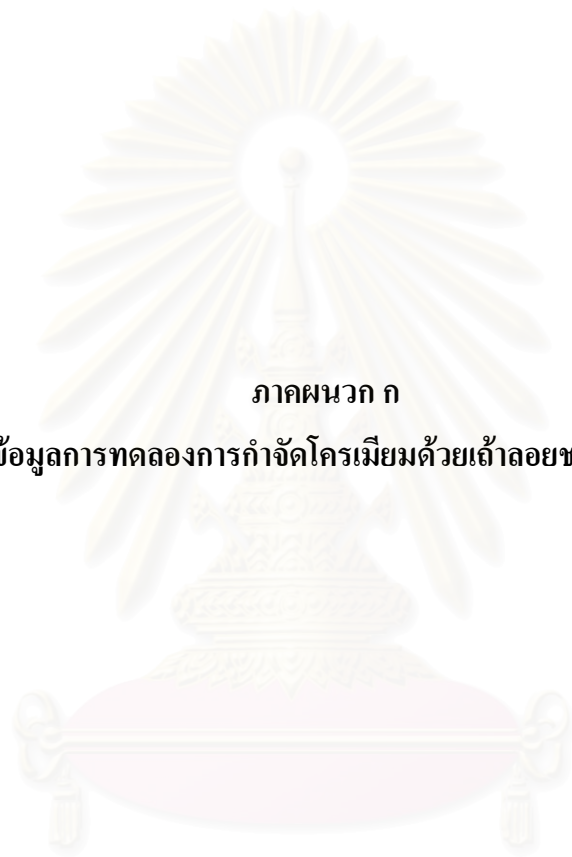
- American Society for Testing and Materials. 1966. Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Concrete. C 618-96, Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Section 4 : 293-295.
- Aoki T. and M. Munimori. 1982 Recovery of Cr(VI) from Wastewater with Iron(III)Hydroxide-I : Adsorption Mechanism of Cr(VI) or Iron(III)Hydroxide. Water Res. 16 (1982) : 793-796.
- Bailley, R. P., Bennet, T., and Benjamin, M.M. Sorption onto and Recovery of Cr using Iron-Oxide-coated Sand. Water Science Technology. 26 (1992) : 1239-1244.
- Diagle R.P. and Bennett D.J. 1986 Effluent Chrome Recovery at Thru-Blu. J.An Leather Chem. Assoc. 81(9) : 305-311 Chemical Abstract : Abstract No. CA105(22) 193287s.
- Eckenfelder and William Wesley Jr. Industrial Waste Pollution Control. 2nd ed. Singapore : McGrawhill, 1985.
- Edwards M. and Benjamin M.M. 1989 Regeneration and Reuse of Iron Hydroxide Adsorbent in Treatment of Metal bearing Waste J. Water Pollut. Control Fed. 61(1989) : 481-490
- Khaodhian. S. Removal of Chromium, Copper and Arsenic from Contaminated Groundwater Using Iron-Oxide Composite Adsorbents. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Oregon State University : Corvallis, OR, 1997.
- Lagnese, K.M., and Dzombak, D.A. 1993. Use of Sedimentation Ponds for Removal of Metals from Ash Transport Waters. Envi. Prog. 4:246-256.
- Langerwerf 1978, J.S.A. Recovery and Reuse of Trivalent Chromium. Proc.-Congr. Leather Ind. 6(1) : 251-261. Chemical Abstract : Abstract No. CA92(8) : 60354c.
- Lin, Qingsong; Zhao, Guoliang; Yuan, Wanghong. Chemical equilibrium Calculation intreatment of wastewater containing chromium. Water Treat. 4 (1989) : 79-90. Chemical Abstracts. 112(1990) : Abstract No. 204089 B.
- Mamakov, A.A., et. al. 1973, Electro Flotation Removal of Chromium from Tannery Wastewater and Recovery of the Chromium from the Flotation Product. Izv. Akad Nauk Mold. (1) : 87-89. Chemical Abstract : Abstract No. CA79(14) : 83157m.
- Mavros, P. Zouboulis, A.I., and Lazardis, N.K. 1993. Removal of Metal Iron from Wastewater The Case of Nickel. Envi. Tech. 14:83-93.
- Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering. 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill Book Co.

- Nikolov, A. and Papozov, I. Treatment of Chromium Tannery Waste Water and Possibilities of Recovering the Chromium. Tr. Nauchnoizsled. 5 : 159-168. Chemical Abstract : Abstract No. CA79(18) : 107501c.
- Pandy K.K., Yavada K.P., Tyagi B.S. and Singh V.N. 1987 Fly Ash for the Treatment of Cd(II) Rich Effluent S. Envi. Tech. Letters. 8 : 225-234.
- Ray, A., Eaiton, H.C., Cartleedge, F.K., and Tittlebaum, M.E. 1991. Solidification/Stabilization of Heavy Metal Sludge by a Portland/Fly Ash Building Mixture. J. of Hazardous Waste and Hazardous Material. 8 :33-40.
- Satpathy, J.K., and Chaudhuri, M. Treatment of Cadmium-plating and Chromium- plating Waste by Iron Oxide-coated Sand. Water environmental research. 67 (1995) : 788-790.
- Shievely, W., Bishop, P., Gress, D., and Brown, T. 1986. Leaching Tests of Heavy Metals Stabilized with Portland Cement. J. WPCF. 58 : 234-341.
- Simocini A. 1977 and Tomaselli M. 1977. Recovery Of Chromium from Tannery Bath Waste. Mater Concianti. 53(3) : 251-269. Chemical Abstract : Abstract No. CA87(22) : 169270v.
- Visvanathan C. Application of clean technology in small scale electroplating plant – A case study, Seminar Pollution Management Strategies for The Electroplating Industries, Bangkok, June 1-2, 1993.
- Weng C.H. & Huang C.P. 1944 Treatment of Metal Industrial Waste Water by Fly Ash and Cement Fixation. J. of Envi. Eng-ASCE. 120 : 1470-1487.
- Yavada K.P., Tyagi, B.S. & Singh, V.N. 1985. Fly Ash for the Treatment of Water Enriched in Lead (II) J. Envi. Sci and Health. 7 : 783-808.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยเถ้าลอยขาน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 20 (20.44)* มก./ล. พีเอช 1 โดยใช้ถ้ำลอยขานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการเขย่า (นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ร้อยละการกำจัด
	ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	
0	20.44	1	0
1	16.17	1.03	20.87
3	14.19	1.05	30.56
5	12.20	1.03	40.31
10	10.28	1.03	49.71
15	8.17	1.03	60.01
30	7.01	1.03	65.69
45	7.02	1.02	65.66
60	7.11	1.03	65.23
90	7.15	1.02	65.00
120	7.10	1.04	65.26
180	6.97	1.01	65.92
240	7.06	1.02	65.46
360	7.04	1.02	65.56

หมายเหตุ : ค่าใน ()* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียมได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 20 (20.38)* มก./ล. พีเอช 2 โดยใช้ถ้ำลอยซานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการเขย่า (นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ร้อยละการกำจัด
	ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	
0	20.38	2.03	0
1	15.97	2.03	21.66
3	15.19	2.15	25.48
5	13.80	2.03	32.29
10	13.38	1.97	34.35
15	11.93	2.06	41.48
30	10.99	2.06	49.06
45	10.38	2.01	49.07
60	10.14	2.05	50.25
90	10.08	2.07	50.54
120	10.12	2.06	50.34
180	10.29	2.04	49.49
240	10.21	2.10	49.92
360	10.11	2.09	50.41

หมายเหตุ : ค่าใน ()* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียมได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ร้อยละการกำจัด	ความสามารถการกำจัด (มก./ก.ถ้ำลอยชานอ้อย)
ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช		
10, (10.11)*	1	2.86	1.03	71.71	0.36
(10.16)*	2	3.84	2.06	62.20	0.32
(10.05)*	3	6.96	3.06	30.75	0.15
(10.15)*	4	9.73	4.07	4.14	0.02
(10.17)*	5	10.17	5.04	0.46	0.00
(10.15)*	6	10.15	6.04	0.75	0.00
20, (20.30)*	1	6.64	1.00	67.29	0.68
(21.02)*	2	10.31	2.11	50.94	0.54
(20.24)*	3	14.00	3.17	30.83	0.31
(20.42)*	4	19.03	4.08	6.79	0.07
(20.38)*	5	20.03	5.19	1.70	0.02
(20.60)*	6	20.20	6.13	1.94	0.02
30, (30.24)*	1	18.76	1.08	37.96	0.57
(30.28)*	2	20.41	2.08	32.58	0.49
(31.04)*	3	26.85	3.11	13.49	0.21
(31.60)*	4	30.55	4.08	3.33	0.05
(30.88)*	5	30.47	5.07	1.34	0.02
(30.96)*	6	30.96	6.05	0.09	0.00

หมายเหตุ : ค่าใน (_)* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียมได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ก3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับของถ้ำลอยชานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

ลักษณะน้ำเสียก่อนการทดลอง		ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ร้อยละการกำจัด	ความสามารถการกำจัด (มก./ก.ถ้ำลอยชานอ้อย)
ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช		
40, (42.20)*	1	28.61	1.07	32.20	0.68
(43.00)*	2	32.21	2.07	24.87	0.53
(43.76)*	3	36.76	3.05	16.00	0.35
(43.12)*	4	39.40	4.09	8.63	0.19
(43.48)*	5	43.29	5.06	0.43	0.01
(42.76)*	6	42.73	6.08	0.06	0.00
50, (54.60)*	1	37.90	1.05	30.59	0.84
(53.30)*	2	43.57	2.08	18.26	0.49
(53.60)*	3	47.63	3.09	11.13	0.30
(53.10)*	4	52.14	4.06	1.81	0.05
(53.40)*	5	53.17	5.09	0.44	0.01
(54.00)*	6	53.87	6.07	0.25	0.01
100, (103.60)*	1	91.10	1.06	12.07	0.62
(104.00)*	2	94.60	2.05	9.04	0.47
(104.00)*	3	97.60	3.03	6.15	0.32
(104.10)*	4	102.67	4.03	1.38	0.07
(103.90)*	5	103.40	5.04	0.48	0.03
(104.20)*	6	103.67	6.04	0.51	0.03

หมายเหตุ : ค่าใน ()* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียมได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 (103.40)* มก./ล. พีเอช 1 โดยใช้ถ้ำลอยขานอ้อยปริมาณ 20 ก./ล. ที่เวลาต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการเขย่า (นาที)	ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง		ร้อยละการกำจัด
	ความเข้มข้นของโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	
0	103.40	1	0
1	99.57	1.03	3.71
3	97.13	1.05	6.06
5	95.80	1.03	7.35
10	93.40	1.03	9.67
15	92.67	1.03	10.38
30	91.23	1.03	11.77
45	91.53	1.02	11.48
60	91.73	1.03	11.28
90	91.20	1.02	11.8
120	91.30	1.04	11.70
180	91.49	1.01	11.52
240	91.27	1.02	11.73
360	91.32	1.02	11.68

หมายเหตุ : ค่าใน (_)* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียมได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

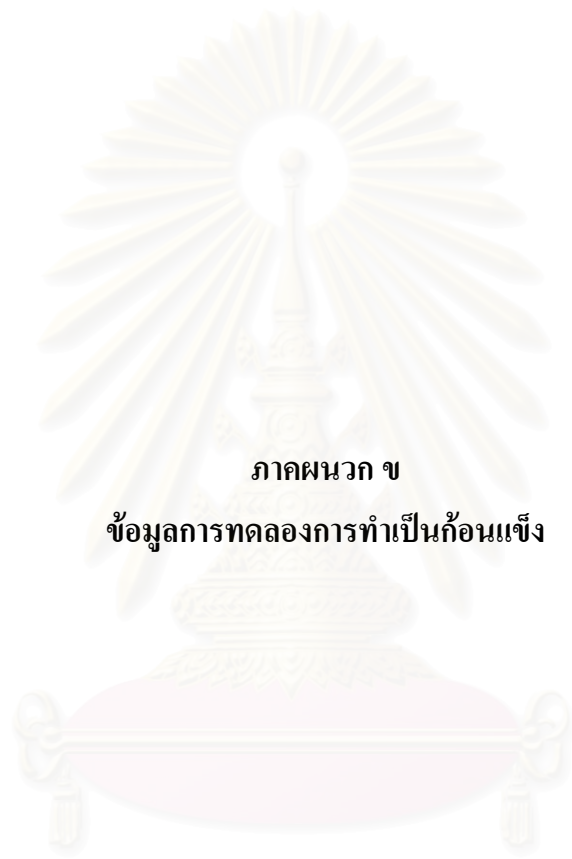
สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก5 แสดงความสามารถในการกำจัด โครเมียมในน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น
100 (102.40)* มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ด้วยถ้ำลอยชานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณถ้ำลอยชานอ้อย (ก./ล. น้ำตัวอย่าง)	ความเข้มข้นโครเมียม (มก./ล.)	พีเอช	ร้อยละการกำจัด	ค่าความสามารถในการกำจัด (มก./ก. ถ้ำลอยชานอ้อย)
0	102.40	1.00	0.00	0.0000
5	97.60	1.02	4.69	0.9600
10	95.27	1.03	6.96	0.7130
20	89.70	1.04	12.40	0.6350
30	86.97	1.04	15.07	0.5143
40	83.37	1.07	18.58	0.4758

หมายเหตุ : ค่าใน (_)* คือค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่เตรียม ได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการทำให้เป็นก้อนแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับ
โครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
ต่างๆ

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)	ร้อยละการแทนที่	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ร้อยละกำลังอัด
0.4	0	364		100.00
	10	228		62.88
	20	141		38.90
	30	70		19.42
0.5	0	430		100.00
	10	262		61.08
	20	165		38.44
	30	82		19.08
0.6	0	349		100.00
	10	212		60.73
	20	134		38.59
	30	64		18.39
0.7	0	284		100.00
	10	59		59.48
	20	37		37.24
	30	18		18.37

ตารางที่ ข2 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าธรรมดาและมอร์ต้าผสมเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับ
โครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่
ระยะเวลาบ่มต่างกัน

ร้อยละการแทนที่	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ร้อยละกำลังอัด
0	3	351		100.00
	7	435		100.00
	14	485		100.00
	28	512		100.00
10	3	235		67.02
	7	261		60.03
	14	284		58.48
	28	306		59.78
20	3	145		41.39
	7	186		42.83
	14	197		40.68
	28	206		40.26
30	3	17		19.46
	7	21		19.46
	14	29		23.95
	28	35		26.45



ภาคผนวก ค

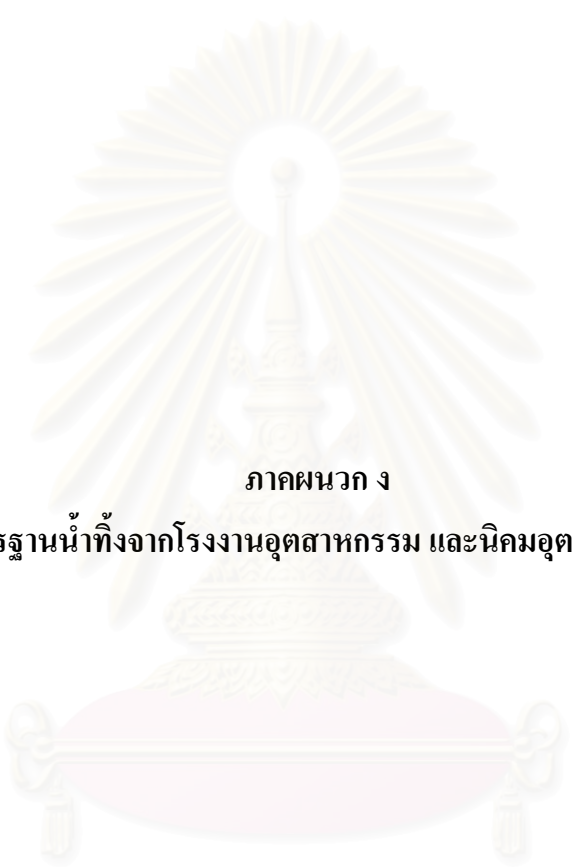
ข้อมูลการทดลองการชะละลาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค ข้อมูลการทดลองการชะละลายของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมลอย	ร้อยละการแทนที่	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นโครเมียม (มก./ล.)
0.4	0	12.39	0.00
	10	12.22	0.00
	20	12.06	0.06
	30	11.88	0.09
0.5	0	12.34	0.00
	10	12.15	0.05
	20	12.11	0.08
	30	11.77	0.13
0.6	0	12.36	0.00
	10	12.13	0.07
	20	12.09	0.10
	30	11.78	0.14
0.7	0	12.28	0.00
	10	11.98	0.08
	20	11.95	0.11
	30	11.64	0.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

“น้ำเสีย” หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

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

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังตารางที่ ๓

ตารางที่ ๓ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

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

ตารางที่ ๓ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. อุณหภูมิ (Temperature)	- ไม่เกิน 40 °C	- เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
5. สีหรือกลิ่น	- ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	- ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ 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 Methode
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตว์ (Pesticide)	- ต้องไม่ตรวจพบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	- Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	- ไม่เกิน 20 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	- Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน

ตารางที่ ๕ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeidahl Nitrogen)	- ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจ แตกต่างกันแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ ไม่เกิน 200 มก./ล.	- Kjeidahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand:COD)	- ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจ แตกต่างกันแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ ไม่เกิน 400 มก./ล.	- Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy metal)		- Atomic Absorbtion Spectrometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductive Coupled Plasma : ICP Kjeidahl
1. สังกะสี	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	- ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	- ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	- ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	- ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	- ไม่เกิน 0.2มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	- ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	- ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิก (Ar)	- ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
11. เซเลเนียม (Se)	- ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	

ตารางที่ ๑ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
12. ปรอท (Hg)	- ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) วันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่อง กำหนดมาตรฐานการระบายน้ำทิ้ง จากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมตีพิมพ์ ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ภาพถ่ายก่อนตัวอย่างภาพอุปกรณ์และเครื่องมือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ1 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง



รูปที่ จ2 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)



รูปที่ จ3 เครื่องผสมมอร์ต้า



รูปที่ จ4 แบบหล่อก้อนมอร์ต้า



รูปที่ จ5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ จ6 เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)



รูปที่ ๑7 ตู้อบวัสดุ



รูปที่ ๑๘ เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
(Atomic absorption spectrophotometer)



รูปที่ ๑๑ เครื่องเขย่า (Shaking machine)



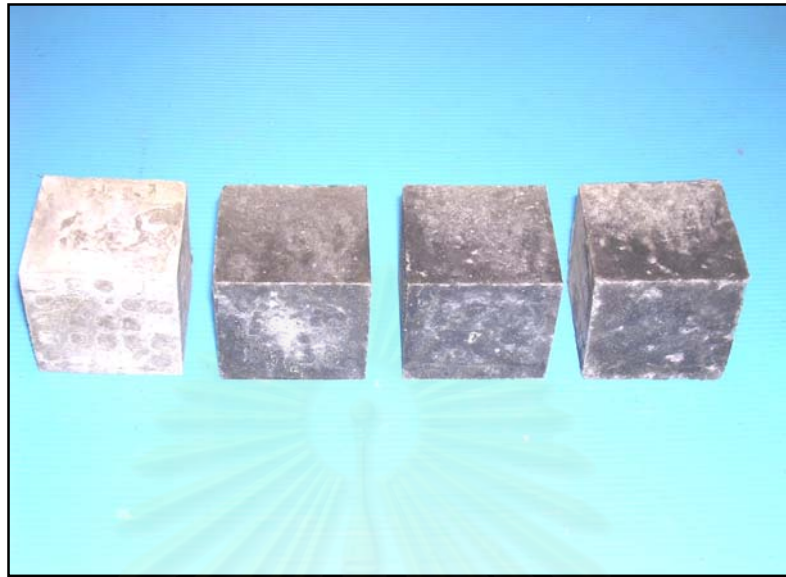
รูปที่ ๑๑๐ เครื่องทำน้ำ D.I.



รูปที่ จ11 เถ้าลอยขานอ้อยก่อนร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ จ12 เถ้าลอยขานหลังร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ ๑๓ ก้อนมอร์ต้าธรรมดาและก้อนมอร์ต้าผสมเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมโดยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 , 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ $w/c = 0.5$ ระยะเวลา 7 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชีระชัย วัฒนสกุลเอก เกิดวันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2520 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ในปี พ.ศ. 2541 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย