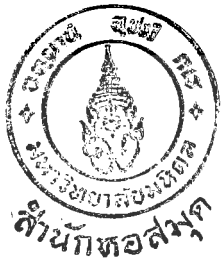
30 ก.ค. 2545



การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา

อภินันทนาการ
จาก
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาชุมชนและชนบท
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล
พ.ศ. 2545

ISBN 974-04-1904-6

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

วน
สุภชก
2545
ค.2

Copyright by Mahidol University

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก

.....สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา.....

นายสุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา

ผู้วิจัย

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุษณีย์ อุยะเสถียร

วศ.ม.

ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....

อาจารย์ สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ

D.Eng.

กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....

ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิ้มล้อมวงศ์

Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย

.....

อาจารย์ สัญชัย สูติพันธ์วิหาร

วท.ม.

ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนา-

ชุมชนและชนบท

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

Copyright by Mahidol University

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาชุมชนและชนบท

วันที่ 23 พฤษภาคม 2545

.....

นายสุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา

ผู้วิจัย

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุษณีย์ อุยะเสถียร

M.Eng.

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

อาจารย์สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ

D.Eng

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

อาจารย์เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์

Ph.D.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิ้มล้อมวงศ์

Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยมหิดล

.....

รองศาสตราจารย์ อนุชาติ พวงสำลี

Ph.D.

คณบดี

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

Copyright by Mahidol University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุษณีย์ อุยะเสถียร ดร.สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ และ ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ ที่ได้แนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ซึ่งคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา

Copyright by Mahidol University

4136780 ENRD/M : สาขาวิชา: การวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาชุมชนและชนบท; วท.ม. (การวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาชุมชนและชนบท)

คำสำคัญ : การหล่อแข็ง / โครเมียม / คอนกรีตบล็อก

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา : การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก (SOLIDIFICATION OF CHROMIUM WASTE IN FORM OF CONCRETE BLOCK) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : อุษณีย์ อุยะเสถียร,วศ.ม., สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ,D.Eng. 158 หน้า. ISBN 974-04-1904-6

ของเสียอันตรายเป็นปัญหาสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม การจัดการกับของเสียอันตรายที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ การหล่อแข็ง (Solidification) และนำไปฝังกลบอย่างถูกสุขลักษณะ การพัฒนารูปแบบการหล่อแข็งให้เป็นการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน จะทำให้สามารถนำก้อนหล่อแข็งของเสียอันตรายกลับมาใช้ในรูปแบบวัสดุก่อสร้างได้ ซึ่งเป็นจุดประสงค์ของการวิจัยนี้ โดยศึกษาถึงอัตราส่วนผสม และปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่เหมาะสม ในการหล่อแข็งของเสียอันตรายในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก โดยมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่มากเกินกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม สามารถบำบัดของเสียอันตรายที่เป็นตะกอนโครเมียมด้วยการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก โดยการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร สามารถบำบัดปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมในปริมาณ 19.231 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) ได้โดยมีกำลังรับแรงอัด 136.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) ซึ่งไม่น้อยกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก (มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2) และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมา 2.930 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l)ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

Copyright by Mahidol University

4136780 ENRD/M: MAJOR: Environment Planning for Community and Rural Development; M.Sc. (Environment Planning for Community and Rural Development)
Key words : Solidification / Chromium / Concrete block

Supachai Isarangkul Na Ayuthaya : Solidification of chromium waste in form of concrete block. Thesis Advisors : Usanee Uyasatian, M.Eng., Sompong Hirunmassuwan, D.Env. 158 Pages . ISBN 974-04-1904-6

Hazardous wastes cause significant environmental problems. One treatment method normally used to stabilize hazardous wastes is cement based solidification prior to disposed in secure landfills. The objective of this study was to apply cement based solidification technique in the form of cement block for use as construction material. In the experiments, replacement ratios of fine aggregate by chromium waste in volume were conducted to find the highest ratio for making concrete block. Chromium content in ordinary Portland cement and rice husk ash was also considered. The concrete block, which included chromium waste, must meet compressive strength standard according to Thai Industrial Product Standards no. 60-2516. Chromium leaching must satisfy standard specified by the Notification of the Ministry of Industry no.6 (B.E. 2540)

The normal concrete block made by the proportion of cement, rice husk ash, fine aggregate in the ratio of 1:1:7 and mixed with 15 percent of water by weight. The replacement ratio with 30 % of fine aggregate by chromium waste in volume is the highest ratio. With this highest replacement ratio, the highest holding capacity of chromium in concrete block was 19.231 gram chromium in 1 kilogram cement and rice husk ash. Compressive strength was 136.6 (kg/cm^2), which was not less than 85 (kg/cm^2) according to Thai Industrial Product Standard no. 60-2516 and leaching chromium was 2.930 mg/l, which was less than 5 mg/l according to Notification of the Ministry of Industry no.6 (B.E. 2540)

Copyright by Mahidol University

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อ ง

สารบัญภาพ ฎ

สารบัญตาราง ด

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.3 กรอบแนวความคิด..... 3

1.4 ขอบเขตการศึกษา..... 4

1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย 5

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

2. ทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 7

2.1 โลหะหนัก (Metal)..... 7

2.2 อุตสาหกรรมชิ้นส่วน : บริษัท ไดซิน จำกัด (Daisin Co.,Ltd)..... 8

2.3 การกำจัดและบำบัดของเสียอันตราย (Hazardous Waste)..... 11

2.3.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment)..... 12

2.3.2 การบำบัดทางเคมี-กายภาพ (Chemical/Physical treatment)..... 13

2.3.3 การบำบัดทางเคมี(Chemical treatment)..... 13

2.3.4 การบำบัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment)..... 13

2.3.5 การบำบัด หรือกำจัด โดยกระบวนการใช้ความร้อน..... 14

(Thermal processes for treatment and/or disposal)

2.3.6 การบำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียร..... 14

กระบวนการตรึงสาร กระบวนการหล่อแข็ง

(Stabilization/ fixation / solidification processes)

2.3.7 การบำบัด หรือการกำจัดแบบ land treatment and/or disposal..... 14

Copyright by Mahidol University

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 การหล่อแข็ง (Solidification)..... 15
2.4.1 Inorganic Process..... 16
2.4.2 Organic Process..... 16
2.4.3 Non Chemical Process..... 16
2.5 การทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement base technique)..... 20
2.6 กลไกการยึดโลหะหนัก..... 22
2.6.1 ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)..... 22
2.6.2 กลไกการยึดจับโลหะหนัก..... 23
2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 27
2.7.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 28
2.7.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ของปูนซีเมนต์..... 30
2.8 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)..... 33
2.9 ขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)..... 35
2.10 ซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ..... 39
2.11 ดินซีเมนต์บล็อก..... 40
2.12 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก..... 42
2.13 การทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests)..... 44
2.14 การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อนหล่อแข็ง..... 49
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 51
3. วิธีการวิจัย..... 58
3.1 วัสดุในการวิจัย..... 58
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์..... 58
3.3 การดำเนินการวิจัย..... 60
3.3.1 การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม. 60

Copyright by Mahidol University

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสามารถในการชะละลาย 60
โครเมียมจากตะกอนโครเมียม ด้วยวิธีสกัด
Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

3.3.3 การทดลองที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็ง 62
ตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

3.3.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจาก..... 64
ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30
และ 40 โดยปริมาตร

3.3.5 การทดลองที่ 5 การเปรียบเทียบการสกัดด้วยวิธีการสกัด 65
Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) กับวิธีการสกัด
Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ในการสกัด
ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

3.3.6 การทดลองที่ 6 การเตรียมโครเมียม (III) สังเคราะห์ 65

3.3.7 การทดลองที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในโครเมียม..... 67
สังเคราะห์

3.3.8 การทดลองที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็ง 67
ตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนหินฝุ่น
ด้วยตะกอนโครเมียมโดยปริมาตรที่เหมาะสม โดยทำ
การทดแทนตะกอนโครเมียม ด้วยโครเมียมสังเคราะห์
ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.9 การทดลองที่ 9 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจาก..... 69
ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน
หินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียมโดยปริมาตรที่เหมาะสม โดยทำ
การทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ
0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

3.4 การวิเคราะห์และประมวลผล..... 69

4. ผลการวิจัย และอภิปรายผล..... 72

4.1 ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม และปริมาณโครเมียมจากการ..... 72
ชะละลายตะกอนโครเมียมด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching
Procedure (TCLP)

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม..... 74
ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

4.3 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอน..... 81
โครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบ
อินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียม
ในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะ
การบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

4.4 การเปรียบเทียบการสกัดด้วยวิธีการสกัด 90
Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) กับวิธีการสกัด
Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ในการสกัด
ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก
โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 การศึกษาประสิทธภาพของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก 91
บล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ่งบล็อก ที่มีอัตราการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40

4.6 การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง..... 99
ตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราร้อยละการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์ 101

4.8 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม 102
ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก
ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร
โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ร้อยละ 0,
20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

4.9 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม 108
ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก
ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร
โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ร้อยละ 0,
20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

4.10 การศึกษาความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง 115
ตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบ
อินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียม
ในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอน
โครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ
100 โดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

Copyright by Mahidol University

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ	120
	5.1 บทสรุป	120
	5.2 ข้อเสนอแนะ	122
6.	รายการอ้างอิง	124
7.	ภาคผนวก : ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	130
8.	ประวัติผู้วิจัย	158

Copyright by Mahidol University

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	กระบวนการชุบชิ้นงานด้วยโครเมียม และกระบวนการชุบชิ้นงานด้วยนิกเกิล	9
ภาพที่ 2.2	ลักษณะระบบบำบัดโครเมียม ที่มีการรีดักชั่นโครเมียมแล้วทำให้ตกตะกอน	11
ภาพที่ 2.3	ค่าพีเอช (pH) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากการทดสอบการสกัด	24
ภาพที่ 2.4	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายสะสมค่าความเป็นด่าง และปริมาณซิลิกอนที่ถูกชะละลายสะสม จากการสกัดด้วยกรดอะซิติคติดต่อกัน 15 ครั้ง	24
ภาพที่ 2.5	pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมี่ยม โครเมี่ยม และตะกั่ว	25
ภาพที่ 2.6	การละลายของโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ pH ต่างๆ	26
ภาพที่ 2.7	การละลายของโลหะหนักที่อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ และโลหะไฮดรอกไซด์ ที่ pH ต่างๆ	27
ภาพที่ 2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาแกลบ กับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแกลบที่หายไปจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	36
ภาพที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาแกลบ กับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแกลบที่หายไปจากการเผาที่อุณหภูมิ 105 °C	37
ภาพที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบดขี้เถ้าแกลบกับความละเอียดของขี้เถ้าแกลบที่ได้ ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface ; cm^2/gm)	37
ภาพที่ 2.11	เครื่องชินวาแรมสำหรับอัดดินซีเมนต์บล็อก	41
ภาพที่ 2.12	บล็อกดินซีเมนต์แบบมีอินเตอร์ล็อกกิ้ง	42
ภาพที่ 3.1	แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดลองที่ 3	62
ภาพที่ 3.2	แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดลองที่ 8	68

Copyright by Mahidol University

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนในการหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย..... 71

ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดกับระยะเวลา..... 78
ในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต
บล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตรา
ร้อยละในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น 0, 10, 20, 30
และ 40 โดยปริมาตร

ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัด 80
ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน
ตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดย
ปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กับระยะเวลา..... 84
ในการบ่มชื้นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต
บล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตรา
การทดแทนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลัง..... 87
การสกัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็ง
ตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบ
อินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนร้อยละ 0, 10, 20,
30 และ40 โดยปริมาตร

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลัง..... 88
การสกัด กับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็ง
ตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบ
อินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนร้อยละ 0, 10, 20,
30 และ40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28,
56 และ 90 วัน

Copyright by Mahidol University

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด 89
และค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม
ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ
10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น
3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการชะละลายโครเมียม..... 97
จากก้อนหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร
ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย 98
โครเมียม จากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมใน
หินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7,
14, 28, 56 และ 90 วัน

ภาพที่ 4.9 กำลังรับแรงอัด กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียม..... 105
ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดย
ปริมาตร ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก
เชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ในอัตราการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ที่
อายุการบ่มชื้น 28 วัน

ภาพที่ 4.10 ความหนาแน่น กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียม..... 106
ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดย
ปริมาตร ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก
เชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ในอัตราการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ที่
อายุการบ่มชื้น 28 วัน

Copyright by Mahidol University

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.11 ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัด ของก้อนหล่อแข็ง..... 110
ตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทน
ตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40,
60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน
ภาพที่ 4.12 ความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด ของก้อนหล่อแข็ง..... 112
ตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20,
40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับปริมาณโครเมียมใน..... 113
น้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต
บล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มี
อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดย
ปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียม
สังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่
ระยะเวลาในการบ่มชื้น 28 วัน
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลัง..... 114
การสกัด กับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อ
แข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก
แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีอัตราการ
ทดแทนตะกอนโครเมียม ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0,
20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น
28 วัน

Copyright by Mahidol University

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมทั้งหมดใน น้ำสกัด..... 118
หลังการสกัด ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร และก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 Stabilization/Fixation Techniques..... 17

ตารางที่ 2.2 ชนิดของของเสียอันตรายกับกระบวนการหล่อแข็ง..... 20

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีข้อเสียของจบวนการหล่อแข็งโดยการทำเป็นก้อน..... 21
ด้วยปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.4 ประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสม ในการทำเสถียรและ..... 22
ทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

ตารางที่ 2.5 Chemical Properties and Compound Composition of 29
Ordinary Portland Cement

ตารางที่ 2.6 Typical Compositions of Portland Cement : Mineral Composition..... 30

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ..... 33
วัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618-94a

ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของขี้เถ้าแกลบ..... 38

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุผสมของดินซีเมนต์บล็อก.... 40

ตารางที่ 2.10 เกณฑ์กำหนดกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก... 43

ตารางที่ 2.11 Comparison of reference extraction test procedures 44

ตารางที่ 2.12 ระดับมาตรฐานของปริมาณโลหะหนัก หรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัด..... 47
ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการตกตะกอนโครเมียม (Cr^{6+}) 1 mg..... 66

ตารางที่ 4.1 ผลจากการวัดปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมด้วยเครื่อง..... 72
Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดตะกอนโครเมียม..... 73
ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสม ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก.... 75
เชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูป..... 77
คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก
ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ0, 10,
20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56
และ 90 วัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูป..... 77
คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก
ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10,
20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56
และ 90 วัน

ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด จากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอน..... 83
โครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์-
ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น
ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ด้วยวิธีการสกัด
Toxicity Characteristic Leaching Procedure ที่ระยะการบ่มชื้น
3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัด จากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอน..... 83
โครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์-
ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น
ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ด้วยวิธีการสกัด
Toxicity Characteristic Leaching Procedure ที่ระยะการบ่มชื้น
3, 7,14, 28, 56 และ 90 วัน

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม ที่ใช้ใน แต่ละอัตราส่วนผสม..... 85
ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับ
น้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกอัตราในการทดแทนตะกอน
โครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโครเมียมต่อกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (CRHA)ที่ใช้..... 86
ในแต่ละอัตราส่วนผสมของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก อัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบการสกัดก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราการทดแทนตะกอน..... 91
โครเมียมในหินฝุ่นต่างๆ ด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) กับวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching (TCLP)

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลาย..... 92
โครเมียมออกจากตะกอนโครเมียม จากวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อก..... 93
เชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้นต่างๆ

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลาย..... 94
โครเมียมหลังการหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย โครเมียมด้วยการหล่อแข็ง..... 96
ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ตารางที่ 4.15 ผลจากการวัดปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์ 101
ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.16 อัตราส่วนผสม ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต..... 103
บล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตรา
การทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร
โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์
ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.17 ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอน..... 104
โครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์
ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น
ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียม
ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดย
ปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

ตารางที่ 4.18 ปริมาณโครเมียมปริมาณโครเมียมทั้งหมดในก้อนหล่อแข็งตะกอน.....107
โครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์
ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น
ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียม
ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดย
ปริมาตร

ตารางที่ 4.19 ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ ของก้อน..... 107
หล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับ
น้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน
ตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดย
ทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อย
ละ 0, 20, 40, 60, 80และ 100 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.20 ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการ..... 109
สกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน
ตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำ
การทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ร้อยละ 0,
20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ด้วยวิธีการสกัด Toxicity
Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตารางที่ 4.21 ค่าปริมาณโครเมียมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง (mgCr/gก้อนหล่อแข็ง)..... 115
ของก้อนหล่อแข็ง.ตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน
รับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน
ตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการ
ทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20,
40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.22 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลาย..... 116
โครเมียม หลังก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต
บล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่
มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดย
ปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียม
สังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่
ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

Copyright by Mahidol University

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัดเฉลี่ย..... 117

ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ และความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร และก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กากตะกอนของเสียที่เกิดจะกระบวนการผลิต ที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ จัดเป็นของเสียอันตรายประเภทวัตถุมีพิษ ซึ่งต้องมีการจัดการที่เหมาะสม วิธีการในการจัดการกับตะกอนของเสียเหล่านี้ วิธีการหนึ่งที่นิยม คือ วิธีการหล่อแข็ง (Solidification) ซึ่งเป็นวิธีการในการจัดการของเสียอันตรายให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมก่อนนำไปฝังกลบ โดยการใช้ตัวยึดประสานชนิดต่างๆ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นต้น มาหล่อผสมกับของเสียอันตรายที่อยู่ในรูปของของแข็งแล้ว กลายเป็นก้อนแข็งที่สามารถรับกำลังอัด สามารถจับยึดโลหะหนัก และสารพิษบางชนิดไว้ภายในก้อนแข็ง สามารถลดความเป็นพิษ เป็นการจัดการของเสียอันตรายทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ก้อนหล่อแข็งที่กักเก็บของเสียอันตรายไว้ภายในจะถูกนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย (Secured Landfill) ต่อไป แต่เนื่องจากการนำก้อนหล่อแข็งไปฝังกลบแบบปลอดภัย จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าที่ดินและค่าการดำเนินการ นอกจากนี้การวิธีการหล่อแข็ง ยังเป็นการเพิ่มปริมาตรของของเสีย ทำให้เพิ่มความต้องการพื้นที่ฝังกลบมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการฝังกลบก้อนหล่อแข็งของเสียอันตราย ยังอาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากไม่มีการดำเนินการและควบคุมดูแลที่ถูกต้องเหมาะสม ในพื้นที่บางพื้นที่ก็ยังมีความเสี่ยงต่อการผุพังของก้อนหล่อแข็ง จากการตรวจสอบด้วยวิธีวิทยาศาสตร์ พบว่าสาเหตุที่ทำให้อิฐและหินผุพัง เกิดจากเกลือที่สามารถละลายน้ำได้และความชื้น โดยเกลือจะมีอยู่ทั้งในดิน น้ำใต้ดิน ในวัสดุต่างๆ และในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศยังทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือไอน้ำกลายเป็นกรดเกลือได้ (1) เกลือละลายน้ำและกรดเกลือที่เกิดขึ้นอาจจะซึมผ่านชั้นฝังกลบลงไปยังก้อน-หล่อแข็ง และทำให้เกิดการผุกร่อนของก้อนหล่อแข็งและละลายโลหะหนักและสารพิษที่ถูกทำให้เสถียรในก้อนหล่อแข็ง ออกมาปนเปื้อนในดินและแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมอื่นๆ ได้ ดังนั้นหากสามารถพัฒนาการหล่อแข็งให้มีความสามารถในการรองรับกำลังที่สูงขึ้น สามารถนำมาใช้แทนวัสดุในการก่อสร้าง เช่น คอนกรีตบล็อก อิฐบล็อก ดินซีเมนต์บล็อก เป็นต้น ซึ่งในการใช้งานจะถูกนำมาใช้โดยมีวัสดุอื่นปิดทับ ทำให้ลดความเสี่ยงต่อการที่สารละลายจะแทรกซึมเข้าไปสกัดโลหะหนักในก้อนหล่อแข็ง ทำให้โลหะหนักและสารพิษออกมาปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมได้น้อยลงกว่าการนำก้อนหล่อแข็งไปฝังกลบ และเป็นการนำก้อนหล่อแข็งกลับมาใช้ใหม่ได้

Copyright by Mahidol University

ในงานวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาเพื่อหา อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม ในการหล่อแข็งตะกอนของเสียอันตรายที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ในรูปคอนกรีตบล็อก โดยมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลาย กับค่ากำลังรับแรงอัด และระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และทำการศึกษาถึงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่เหมาะสมที่สามารถมีได้ในตะกอนโครเมียม เมื่อนำมาหล่อแข็งของเสียอันตรายที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ในรูปคอนกรีตบล็อก โดยมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลาย ไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โดยของเสียที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการวิจัยได้แก่ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัท ไดชิน จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนที่มีกระบวนการชุบโครเมียมเป็นกระบวนการหนึ่งในการผลิต ซึ่งการศึกษาจะมุ่งศึกษาเพื่อนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง ในรูปของคอนกรีตบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายที่ไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายที่ไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลาย กับค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับ-

Copyright by Mahidol University

น้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

1.2.4 เพื่อศึกษาหาปริมาณโครเมียมที่เหมาะสมในตะกอนโครเมียมที่สามารถ นำมาหล่อแข็งให้เป็นก้อนในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายที่ไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

1.3 กรอบแนวความคิด

การหล่อแข็ง (Solidification) ตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อก จะดำเนินการศึกษาในส่วนตะกอนโครเมียมที่สามารถนำมาผสมทดแทนหินฝุ่นโดยปริมาตร ในการผสมเพื่ออัดเป็นคอนกรีตบล็อก โดยพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และทำการศึกษาหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโครเมียม ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 โดยในการควบคุมมาตรฐานก้อนหล่อแข็งให้มีการทำลายฤทธิ์ที่เหมาะสม จะใช้วิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) รวมทั้งศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โครเมียมที่ถูกชะละลาย กับค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และการศึกษาหาปริมาณโครเมียมที่เหมาะสมในตะกอนโครเมียม ที่สามารถนำมาหล่อแข็งให้เป็นก้อน ในรูปคอนกรีตบล็อก ที่สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างผนังอาคาร หรือสิ่งปลูกสร้าง เหนือระดับน้ำใต้ดิน โดยมีวัสดุฉาบผิว

จากการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม ในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก จะทำการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม โดยใช้โครเมียมสังเคราะห์ทดแทนตะกอนโครเมียมในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60 80 และ 100 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาถึงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่สามารถหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก โดยปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และกำลังรับ-

Copyright by Mahidol University

แรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโลหะหนักโครเมียม (Cr^{+3}) ที่มีอยู่ในตะกอนเท่านั้น

1.4.2 สัดส่วนผสมสำหรับอัดเป็นคอนกรีตบล็อก จะใช้วัสดุผสมที่ประกอบด้วย ปูน-ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 , ขี้เถ้าแกลบบดละเอียดมีขนาดผ่านตะแกรง No. 325 มากกว่า 90 % และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 โดยน้ำหนัก นำมาผสมน้ำในปริมาณ 15 % ของน้ำหนักส่วนผสมรวม โดยจะใช้ปริมาณน้ำคงที่ทุกอัตราส่วนผสมและตลอดการวิจัย อัดเป็นคอนกรีตบล็อกแบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง ขนาด สูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร

1.4.3 ในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียม จะทำการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียมโดยปริมาตร

1.4.4 ในการศึกษาปริมาณตะกอนโครเมียม ที่สามารถกักเก็บได้ในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก จะต้องมีกำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่าคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และจะต้องพิจารณาการทำลายฤทธิ์ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก-เชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก โดยจะพิจารณาจากการสกัดก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะต้องไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

1.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลาย กับค่ากำลังรับแรงอัด และระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร จะทำการศึกษาที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน เท่านั้น

1.4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม จะใช้โครเมียมสังเคราะห์ โดยกำหนดให้มีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60 80 และ 100 โดยปริมาตร เท่านั้น

Copyright by Mahidol University

1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย

ก้อนหล่อแข็ง หมายถึง ก้อนวัสดุที่ได้จากการบำบัดของเสียด้วยกระบวนการ Stabilization & Solidification โดยใช้วิธี Cement-based Technique

ขี้เถ้าแกลบ หมายถึง ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาด้วยเตาเผาอุตสาหกรรมเผาอิฐ มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน แล้วนำมาผ่านเครื่องบดแบบหมุน ใช้โลหะบดเป็นเหล็กละมุนทำการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้มีความละเอียดผ่านตะแกรง No.325 มากกว่า 90 %

คอนกรีตบล็อก หมายถึง บล็อกที่ได้จากการอัดวัสดุผสมที่เกิดจาก ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้า-แกลบ น้ำ และตะกอนโครเมียม

ตะกอนโครเมียม หมายถึง ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน ของบริษัท ไดชิน จำกัด สาขาจังหวัดนครราชสีมา

ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์-ล็อกกิ้งบล็อก หมายถึง ก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนผสมจาก ปูน เถ้าแกลบ หินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 โดยน้ำหนัก ผสมน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม โดยการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร อัดเป็นคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ด้วยเครื่องชิลวาแรม ขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร

การบ่มชื้น หมายถึง การบ่มในลักษณะโดยใช้กระสอบป่านคลุมตัวอย่าง พรมน้ำให้ชื้นตลอดเวลา โดยไม่มีการแช่น้ำ

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถทราบถึงอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ที่เหมาะสมในการหล่อแข็งในรูปของคอนกรีตบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่มากเกินกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับ-ที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

1.6.2 สามารถทราบถึงประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโครเมียม ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในมาตรฐานที่สามารถนำมาใช้งานได้เทียบเท่าคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตาม

Copyright by Mahidol University

มาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาไม่มากเกินกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาห-กรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ที่ระยะเวลาในการบ่มชิ้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

1.6.3 สามารถทราบถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด กับการชะละลายของโครเมียมของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชิ้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

1.6.4 สามารถทราบถึงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่เหมาะสม ของก้อนหล่อ-แข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในมาตรฐานที่สามารถนำมาใช้งานได้เทียบเท่าคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาไม่มากเกินกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ที่ระยะเวลาในการบ่มชิ้น 28 วัน

Copyright by Mahidol University

บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก (Metal)

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสภาวะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ การนำความร้อน และไฟฟ้าได้ดี มีความเหนียว สามารถนำมาตีให้เป็นแผ่นบางๆได้ ในส่วนของคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ โลหะมีค่าออกซิเดชั่นได้หลายค่า จึงทำให้โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตต่างๆ ได้โดยผ่านไปตามระบบห่วงโซ่อาหาร (Food chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ อากาศ โลหะหนักบางชนิดมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เรื่องบัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจัดให้โลหะหนัก เป็นวัตถุมีพิษที่สามารถถูกชะละลายได้และเป็นของเสียอันตรายในประเภทที่มีความเป็นพิษ (Toxicity) ตามคำนิยามขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA) ซึ่งเป็นของเสียอันตรายที่สามารถทำให้เกิดพิษโดยเฉียบพลัน และสามารถสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดโรคร้ายต่างๆ นอกจากนี้โลหะยังจัดเป็นขยะอุตสาหกรรม ซึ่งขยะอุตสาหกรรมหมายถึง เศษของเหลือใช้จากกระบวนการผลิต หรือวัตถุดิบที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม เราสามารถแบ่งขยะอุตสาหกรรม ออกได้เป็น 2 ประเภท (2)

1. ขยะอุตสาหกรรมที่เป็นของเสียอันตราย ได้แก่ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable Substances) สารกัดกร่อน(Corrosive Substances) สารที่เกิดปฏิกิริยา

Copyright by Mahidol University

ได้ง่าย (Reactive Substances) สารพิษ (Toxic Substances) และสารที่ถูกชะละลายได้ (Leachable Substances)

2. ขยะอุตสาหกรรมที่เป็นของเสียไม่อันตราย ได้แก่ เศษกระดาษ เศษพลาสติก เศษไม้ เศษเหล็ก เป็นต้น

ประเภทของอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบมีหลายประเภทได้แก่ อุตสาหกรรมเคลือบชุบโลหะ อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เป็นต้น ในการกำจัดกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก หรือวัตถุมีพิษที่สามารถถูกชะละลายได้ จะต้องมีการพิจารณาถึงปริมาณของสารที่ถูกชะละลายออกมาจะต้องไม่มีปริมาณมากเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งได้กำหนดไว้ว่าสารที่ถูกชะละลายได้ (Leachable substances) จะเป็นสารที่เมื่อถูกนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate extraction procedure) จะต้องมีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดน้อยกว่าค่าดังต่อไปนี้

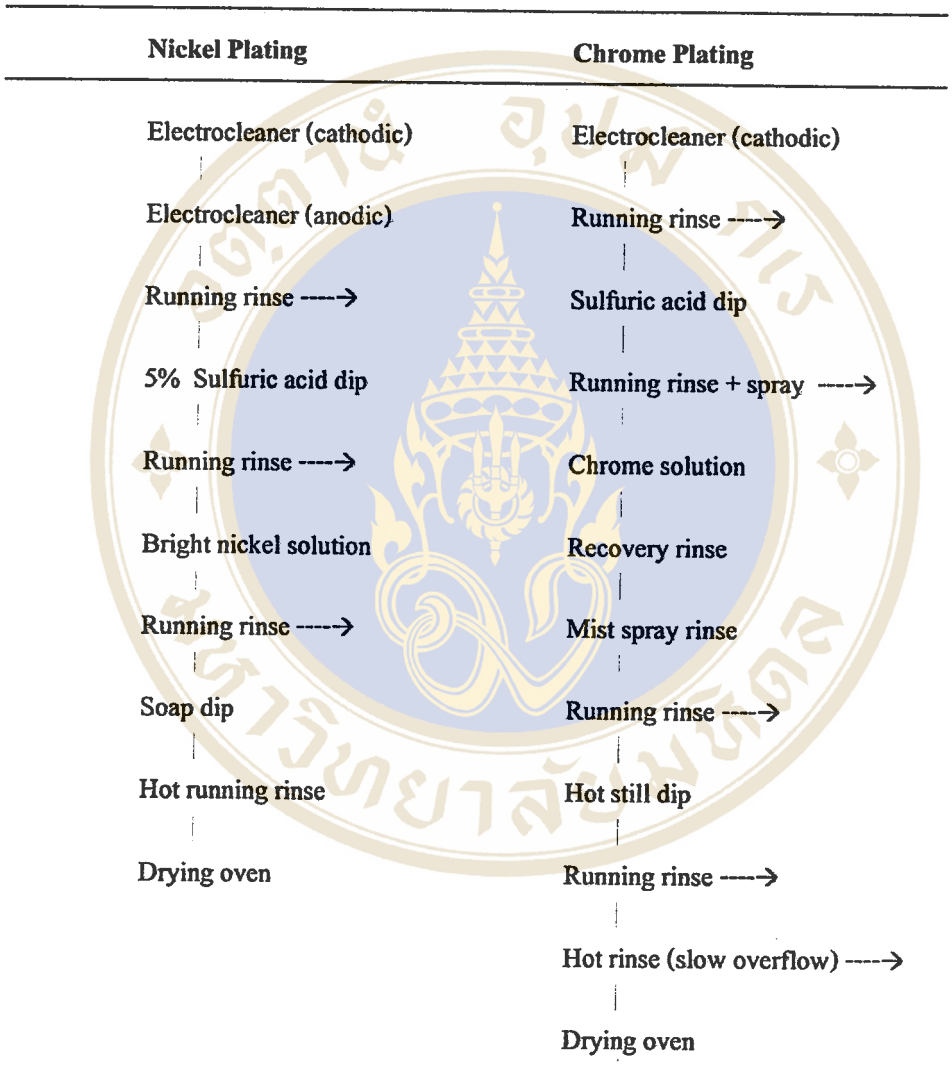
อาร์ซีนิก(ทั้งหมด) (Arsenic (Total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบนซีน (Benzene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน : บริษัท ไดซิน จำกัด (Daisin Co.,Ltd)

บริษัท ไดซิน จำกัด (3) เป็นบริษัทที่ผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โรงงาน บริษัท ไดซิน จำกัด เป็นอุตสาหกรรมที่มีสายการผลิตประกอบด้วย การหล่อชิ้นงาน การอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแรงดัน การตกแต่งชิ้นงาน และชุบชิ้นงานด้วยโครเมียม และนิกเกิล โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นงานที่มีความต้องการเพิ่มความสวยงามของชิ้นงาน และป้องกันการกัดกร่อนจากสนิมโลหะ นิยมชุบชิ้นงานด้วยใช้โครเมียม หรือผสมโครเมียมในเนื้อโลหะในการหล่อชิ้นงาน

Copyright by Mahidol University

บริษัท ไดชิน จำกัด มีโรงงาน 2 แห่ง คือ โรงงานนวนคร มีขนาดพื้นที่ 30,400 ตารางเมตร ตั้งอยู่ภายในเขตนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จังหวัดปทุมธานี และโรงงานนครราชสีมา มีขนาดพื้นที่ 64,000 ตารางเมตร ตั้งอยู่ในเขตนิคมอุตสาหกรรมสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่โรงงานนครราชสีมานั้น จะมีกระบวนชุบชิ้นงานด้วยโครเมียม และกระบวนชุบชิ้นงานด้วยนิกเกิล โดยมีขั้นตอนการชุบดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการชุบชิ้นงานด้วยโครเมียม และกระบวนการชุบชิ้นงานด้วยนิกเกิล (4)

Copyright by Mahidol University

น้ำเสียจากโรงชุบจะมีการแยกประเภทก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด โดยจะแยกบำบัดระหว่างน้ำเสียโครเมียมกับน้ำเสียนิกเกิล ในส่วนของการบำบัดน้ำเสียโครเมียม จะทำการรีดักชั่น Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+} แล้วทำให้ตกตะกอน มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำให้ Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+}

วิธีรีดักชั่นทางเคมีสามารถทำให้ Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+} ได้ภายในเวลาไม่เกิน 30 นาที ที่ pH ประมาณ 2 สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ SO_2, $FeSO_4$, Sodium bisulfate ($NaHSO_3$) และ Sodium metabisulfite ($Na_2S_2O_5$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

ใช้ $FeSO_4$: $2CrO_3 + 6FeSO_4.7H_2O + 6H_2SO_3 \text{ ----------> } Cr_2(SO_4)_3 + 3Fe_2(SO_4)_3 + 48H_2O$

ใช้ $NaHSO_3$: $4CrO_3 + 6NaHSO_3 + 3H_2SO_3 \text{ ----------> } 2Cr_2(SO_4) + 3Na_2SO_4 + 6H_2O$

ใช้ SO_2 : $3SO_2 + 3H_2O \text{ ----------> } 3H_2SO_3$

$2CrO_3 + 3H_2SO_3 \text{ ----------> } Cr_2(SO_4)_3 + 3H_2O$

ขั้นตอนที่ 2 ทำให้ Cr^{3+} ตกผลึกในรูปของ $Cr(OH)_3$

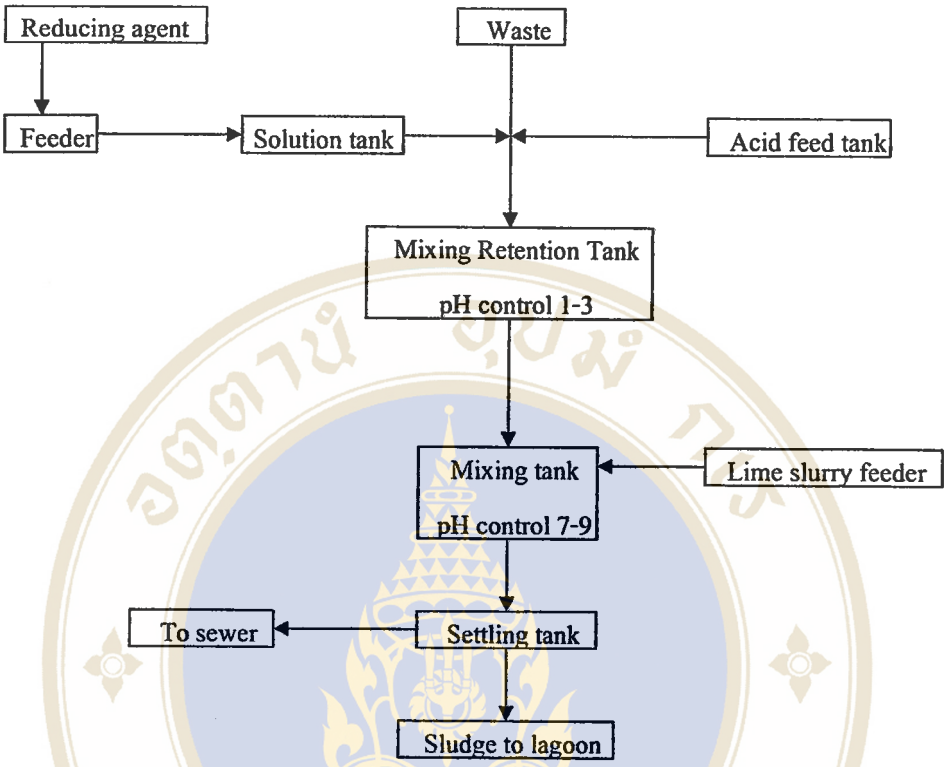
โครเมียมที่อยู่ในรูป Cr^{3+} แล้วสามารถตกผลึกในรูปของ $Cr(OH)_3$ ได้ จึงต้องมีการเติมด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว ($Ca(OH)_2$) เพื่อปรับให้ได้ค่า pH ประมาณ 8-9 ซึ่งเป็นช่วงที่โครเมียมละลายน้ำได้น้อยที่สุด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้

$Cr_2(SO_4)_3 + 6NaOH \text{ ----------> } 2Cr(OH)_3 + 3Na_2SO_4$

$Cr_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \text{ ----------> } 2Cr(OH)_3 + 3CaSO_4$

ลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียโครเมียม ซึ่งจะทำการรีดักชั่นโครเมียมแล้วทำให้ตกตะกอน ส่วนใหญ่จะมีลักษณะดังภาพที่ 2.2 (4)

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 2.2 ลักษณะระบบบำบัดโครเมียม ที่มีการรีดักชั่นโครเมียมแล้วทำให้ตกตะกอน

ตะกอนจากระบบบำบัดทั้งสอง จะถูกนำมารวมกันเพื่อหาจัดส่งให้แก่บริษัทที่รับจัดการของเสียอันตราย และน้ำที่ออกจากระบบบำบัดจะถูกจัดส่งลงสู่ระบบบำบัดของนิคมอุตสาหกรรมต่อไป

2.3 การกำจัดและบำบัดของเสียอันตราย (Hazardous Waste)

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA) ได้ให้ความหมายของเสียอันตรายไว้ว่า ของเสียอันตรายเป็นกากของเสีย (Solid waste) หรือมีส่วนผสมของกากของเสีย ที่มีปริมาณความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ หรือมีลักษณะที่ทำให้ติดเชื้อโรค ที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยทันทีทันใด หรือในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือเกิดการตายอย่างเฉียบพลัน ซึ่งกากของเสียอันตรายนี้หากมีการจัดการที่ไม่ถูกต้องจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้

Copyright by Mahidol University

สำหรับประเทศไทยตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) สามารถแยกประเภทของของเสียอันตรายได้ ได้แก่

1. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภท สารไวไฟ (Ignitable substances) สารกัดกร่อน (Corrosive substances)สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) สารพิษ (Toxic substances) และสารที่ถูกชะละลายได้ (Leachable substances)

2. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไม่จำเพาะประเภทหรือไม่จำเพาะชนิด (Non-specific sources) และจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด (Specific sources)

3. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะและคุณสมบัติเป็นเคมีภัณฑ์ที่ไม่ใช้แล้วหรือเสื่อมคุณภาพ (Discarded) หรือไม่ได้คุณภาพตามกำหนด (Off-specification) หรือเป็นเศษเคมีภัณฑ์ในภาชนะบรรจุหรือเศษวัสดุใดๆที่ใช้ทำความสะอาดและถูกปนเปื้อนด้วยเคมีภัณฑ์ที่หกหล่น (Container and spill resides)

4. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุทีไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติเป็นของเสียเคมีวัตถุ (Chemical waste)

ในการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังกลบของเสียอันตราย สามารถทำได้หลายวิธี โรงงานอุตสาหกรรมที่มีของเสียอันตรายที่เหลือจากการผลิตจะต้องดำเนินการโดยวิธีการบำบัด (Treatment) หรือการกำจัด (Disposal) หรือหลายๆวิธีรวมกัน ซึ่งวิธีต่างๆ สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.3.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.1.1 การเหวี่ยงแยก (Centrifugation)

2.3.1.2 การกลั่นแยกด้วยไอน้ำ (Steam distillation and steam stripping)

2.3.1.3 การกรองผ่านตัวกรองหลายชั้น (Multi-media filtration)

2.3.1.4 การกรองแยกด้วยเยื่อเมมเบรน (Reverse osmosis , Micro-/Ultra-filtration)

2.3.1.5 การทำระเหย (Evaporation)

2.3.1.6 การแยกด้วยฟองอากาศ (Air flotation)

2.3.1.7 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity thickening)

Copyright by Mahidol University

2.3.1.8 การแยกด้วยเครื่องแยกน้ำและน้ำมัน (Oil / Water Separation or Coalescence separator)

2.3.2 การบำบัดทางเคมี-กายภาพ (Chemical/Physical treatment) สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.2.1 การชะล้างดิน (Soil washing)

2.3.2.2 การแยกด้วยอากาศ (Air stripping)

2.3.2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon absorption)

2.3.2.4 การจับตัวตกตะกอน (Precipitation/Flocculation)

2.3.2.5 การแยกด้วยอากาศละลายน้ำและสารเคมี (Dissolved air flotation)

2.3.2.6 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

2.3.2.7 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid/liquid extration)

2.3.2.8 การกรองรีดน้ำ (filter press, dewatering , vacuum filtration and belt-press filtration)

2.3.3 การบำบัดทางเคมี(Chemical treatment)สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.3.1 การปรับค่าความเป็นกรดด่างและทำให้เป็นกลาง (Neutralization and pH adjustment)

2.3.3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น รีดักชั่น (Oxidation/reduction reactions)

2.3.3.3 การทำลายความเป็นพิษด้วยก๊าซโอโซน หรือรังสีเหนือม่วง (Ozonation and UV/ozonation)

2.3.3.4 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

2.3.3.5 การตกตะกอน (Precipitation)

2.3.3.6 การทำลายคลอรีนอิสระ (Dechlorination)

2.3.3.7 การทำลายสารประกอบฮาโลเจน (Dehalogenation)

2.3.4 การบำบัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment) สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.4.1 ถังปฏิกิริยาชนิดฟิลม์ตรึง (Attached film reactor)

2.3.4.2 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)

2.3.4.3 ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)

Copyright by Mahidol University

2.3.4.4 การหมัก (Compositing)

2.3.4.5 ระบบบ่อผึ่ง (Stabilization ponds)

2.3.4.6 การย่อยสลายทางชีวภาพแบบอยู่กับที่ (In situ biological decomposition)

2.3.4.7 การทำลายพิษทางชีวภาพ (Biological detoxification)

2.3.5 การบำบัด หรือกำจัด โดยกระบวนการใช้ความร้อน (Thermal processes for treatment and/or disposal) สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.5.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Wet-air oxidation)

2.3.5.2 การฉีดเผาในรูปของเหลว (Liquid injection incineration)

2.3.5.3 การเผาในเตาเผาซีเมนต์ และการเผาในเตาหมุน (Cement kiln incineration and Rotary kiln incineration)

2.3.5.4 การเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed incineration)

2.3.5.5 การทำให้ระเหยด้วยแสงแดด (Solar evaporation)

2.3.6 การบำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียร กระบวนการตรึงสาร กระบวนการหล่อแข็ง (Stabilization/fixation/solidification processes) สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.6.1 การห่อหุ้มในแก้วหลอม (Molten glass)

2.3.6.2 การตรึงด้วยสารเคมี (Chemical fixation)

2.3.6.3 การหล่อแข็งด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (Pozzolanic and cement based solidification)

2.3.6.4 การห่อหุ้มด้วยสารเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic encapsulation)

2.3.6.5 การทำเป็นโพลิเมอร์ (Polymer encapsulation)

2.3.7 การบำบัด หรือการกำจัดแบบ land treatment and/or disposal สามารถกระทำได้โดยกระบวนการดังนี้

2.3.7.1 การทำลายฤทธิ์ในหน้าดิน (Land farming)

2.3.7.2 การพ่นรดน้ำ (Spray irrigation)

2.3.7.3 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Engineered, secured landfill)

2.3.7.4 การเก็บบนพื้นดินระยะยาว (Above ground long - term storage)

2.3.7.5 การฉีดลงชั้นน้ำใต้ดินลึก (Deepwell injection)

Copyright by Mahidol University

นอกจากนี้ ตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดให้ในการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังกลบของเสียอันตรายนั้น สามารถใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นหรือกระบวนการอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ ที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าสามารถทำให้ของเสียอันตรายได้รับการบำบัด หรือทำลายฤทธิ์ ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reuse/recycle) ได้อย่างปลอดภัย

การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (5) ควรทำ ณ จุดกำเนิด มากกว่าการขนย้ายไปจัดการที่อื่น โดยเฉพาะของเสียอันตราย ได้แก่ การแยกตัวทำละลายที่ใช้ขจัดไขมันชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่ หรือการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เพื่อแยกตีบุก ทองแดง ตะกั่ว กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง ทั้งยังสามารถลดอัตราการปนเปื้อนในระหว่างการรวบรวม เก็บขน และขนส่ง กระบวนการผลิตหลายกระบวนการผลิตจะเกิดของเสียและของเสียอันตรายจำนวนมาก หากสามารถนำของเสียและของเสียอันตรายกลับมาใช้ใหม่ได้ ก็จะทำให้เกิดประโยชน์อย่างมาก

ตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย หากยังเป็นของเสียอันตราย ยังคงต้องมีการจัดการที่ถูกต้องต่อไป ตะกอนจากระบบบำบัดของโรงงาน ไดซิน ยังมีปริมาณโครเมียมในระดับที่เป็นอันตราย จัดเป็นของเสียอันตราย การหล่อแข็งเป็นวิธีการหนึ่งในการจัดการกับตะกอนโครเมียม

2.4 การหล่อแข็ง (Solidification)

การหล่อแข็ง ไม่ใช่วิธีการกำจัดของเสียอันตราย แต่เป็นการเปลี่ยนรูปแบบของเสียให้คงทนต่อสภาวะแวดล้อมหรือลดความเป็นพิษลง (6) การหล่อแข็งมีลักษณะเป็นการทำให้เสถียร (Stabilization) อย่างหนึ่ง การทำให้เสถียร คือ วิธีการในการลดความเป็นพิษของของเสีย โดยการเปลี่ยนมลพิษให้อยู่ในรูปที่มีการละลายได้น้อย มีการเคลื่อนที่ได้น้อย หรือ มีความเป็นพิษน้อยมาก โดยที่ลักษณะทางกายภาพของของเสียไม่เปลี่ยนแปลง

ในด้านการจัดการของเสียอันตราย การหล่อแข็ง คือ กระบวนการบำบัดกากของเสียอันตราย ซึ่งออกแบบมาเพื่อพัฒนาการกักเก็บของเสียอันตราย หรือเพื่อลดพื้นที่ผิวที่สารอันตรายจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (7) ในด้านเทคโนโลยีการบำบัดของเสียอันตราย การหล่อแข็ง คือ เทคนิคในการเก็บของเสียในรูปของของแข็งเนื้อเดียวที่มีความแข็งแรงมาก การเก็บในลักษณะนี้สามารถเก็บของเสียอันตรายได้ตั้งแต่ขนาดเล็กละเอียดไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นก้อน หรือแม้แต่ภาชนะที่บรรจุของเสียอันตรายไว้ ก็สามารถนำมาจัดเก็บไว้ในรูปของการหล่อแข็งได้ การหล่อแข็งไม่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างของเสียอันตรายกับวัสดุที่นำมาหล่อแข็ง แต่

Copyright by Mahidol University

เป็นการเชื่อมต่อกันทางกลระหว่างของเสียกับวัสดุให้กลายเป็นเนื้อเดียวกัน การปนเปื้อนของเสียที่อยู่ภายในก้อนหล่อแข็งออกสู่ภายนอกจะเกิดได้น้อยมาก เนื่องจากการลดเนื้อที่อย่างมากของพื้นที่ผิวสัมผัสที่สามารถถูกการชะละลายได้ และก้อนหล่อแข็งที่นำมากักเก็บของเสียยังมีลักษณะที่ไม่ยอมให้น้ำหรืออากาศผ่านได้ง่าย (8) องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA) ได้ให้ความหมายของคำว่าการหล่อแข็ง คือ กระบวนการซึ่งอาศัยวิธีทางเคมีเพื่อที่จะลดการเคลื่อนที่ (mobility) หรือการเคลื่อนที่ของสารอันตราย (9) ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า การหล่อแข็ง คือ กระบวนการนำกากของเสียอันตราย ที่ผ่านการบำบัดแล้ว มาทำการเปลี่ยนแปลงสภาพให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยใช้วัสดุเชื่อมชนิดต่างๆ การหล่อแข็งเป็นการตรึงของเสียอันตรายด้วยวิธีหรือขบวนการทางฟิสิกส์และเคมี ทำให้สามารถลดการเคลื่อนที่ (mobility) ของเสียอันตราย และยังทำให้ของเสียอันตรายอยู่ในสภาวะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา การหล่อแข็งเมื่อหล่อออกมาเป็นก้อนและจะมีความหนา-แน่นมาก มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม การซึมผ่านของของเสีย หรือมีการรั่วไหลของของเสียออกจากก้อนหล่อแข็งจะมีปริมาณที่น้อย

กระบวนการหล่อแข็งในปัจจุบันสามารถจำแนกได้เป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (8)

2.4.1 Inorganic Process เป็นกระบวนการหล่อแข็ง ที่ใช้ สารอนินทรีย์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.4.1.1 กลุ่มที่ไม่ใช้ Bulking agents ได้แก่ Cement-based Techniques

2.4.1.2 กลุ่มที่ใช้ Bulking agents ได้แก่ Lime-based or Cement-fly or Cement-clay Techniques

2.4.2 Organic Process เป็นการหล่อแข็งที่ใช้สารโพลีเมอร์และผลิตภัณฑ์ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.4.2.1 Thermoplastic Techniques ใช้ Bitumen, Paraffin Polyethylene เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ปกติใช้กับกากกัมมันตรังสี

2.4.2.2 Polymerization Techniques เป็นการหล่อแข็งกากตะกอนที่แห้งกับสารสังเคราะห์ Thermosetting

2.4.3 Non Chemical Process สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ

2.4.3.1 Glassification or Vitrification ใช้การหล่อสารกัมมันตรังสี

Copyright by Mahidol University

2.4.3.2 Gross Encapsulation Process เป็นกระบวนการที่ทำให้กากตะกอนแห้งจับตัวเป็นก้อน แล้วเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์

2.4.3.3 Sorbents

2.4.3.4 Self-Cementation ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อน ของซัลเฟต, ซัลไฟด์ และมีสาร Calcined 8-10% จะทำให้เกิด Plasterike

ลักษณะการจำแนกที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการจำแนกตามความแตกต่างของวัสดุเชื่อม-ประสาน ซึ่งแต่ละกระบวนการที่มีลักษณะที่แตกต่างกันของชนิดตัวประสานที่ไม่เหมือนกัน ได้มีการพัฒนาเทคนิคและวิธีการที่ต่างก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Stabilization/Fixation Techniques

Technology	Stabilization Process	Application Wastes	Advantages	Disadvantages
Cement and Silicate based Solidification / fixation	Chemical fixation/ solidification	Dry or wet (generally inorganic)	1. Employs inexpensive materials 2. Tolerant of diverse chemical condition 3. Very effective heavy metal wastes 4. Represents highly developed technology	1. Some organics detrimental to setting of concrete 2. Uncoated cement/sludge mixtures subject to degradation and leaching under conditions of low pH 3. Increased weight and size of waste increase transport and landfilling costs

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 2.1 Stabilization/Fixation Techniques (ต่อ)

Technology	Stabilization Process	Application Wastes	Advantages	Disadvantages
Lime based solidification / fixation	Chemical fixation/ solidification	Dry or wet (generally inorganic)	1. Employs inexpensive materials 2. Represents highly developed technology 3. Addition of flyash allows disposal of two waste products in one process	Same as for cement and silicate based solidification/fixation
Self-cementing techniques	Chemical fixation/ solidification	Dry or wet	1. Process requires few additives 2. Cement mixture sets very quickly	1.Same organics detrimental of setting of concrete 2.Uncoated cement /sludge mixture subject to degradation and leaching under condition of low pH
Thermoplastic based solidification / fixation	Physical fixation	Dry (generally inorganic)	1.Very effective in reducing chemical migration 2.Leaching solution have little effect on products	1.Requires expensive equipment and skilled labor 2.Wet wastes reduce effectiveness of process 3.Cannot be used with strong oxidents, dehydrated salts or thermoplastic solvents

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 2.1 Stabilization/Fixation Techniques (ต่อ)

Technology	Stabilization Process	Application Wastes	Advantages	Disadvantages
Organic polymer processes	Physical fixation	Dry / wet (primarlly toxic organic)	1.Only small amount of fixative is required to form the polymers matrix 2.Relatively low density of product reduces transportation costs	1.Wastes is held very loosely in the polymer 2.Low pH of catalysts tends to make metals more soluble 3.Biodegradability of some polymers may create landfilling problems
Vitrification	Physical fixation	Dry	1.Vitrified material has an extremely low leach rate 2.Provides a high degree of containment 3.Employs inexpensive materials	1.High temperatures may vapories some hazardous waste 2. Requires large heat expenditure expensive requirement and skilled personnel
Encapsulation	Chemical containment	Dry or wet	1.Product is very water resistant 2.Virtually leach free as the inner jacket is intact 3.Life cycle cost is competitive or lower than other technologies	1.Leaching will commence it jacket is damaged 2.Not demonstrated on large scale

ที่มา : (10) (11)

Copyright by Mahidol University

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่า การหล่อแข็งสามารถกระทำได้หลายวิธี หลายเทคนิค ที่ทำให้เกิดการยึดติดทางกายภาพ หรือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือทั้ง 2 อย่าง ที่ทำให้ของเสียอันตรายถูกตรึงไว้ในก้อนหล่อแข็ง แต่ทั้งนี้เทคนิคแต่ละอย่างก็จะเหมาะสมกับของเสียอันตรายบางกลุ่ม และไม่เหมาะสมกับของเสียอันตรายบางกลุ่ม ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของของเสียอันตรายกับกระบวนการหล่อแข็ง

Process	Major Treated Wastes	Untreatable Wastes
Cement – based	Toxic inorganics , Stack – gas scrubber sludges	Organics , Toxic anions
Lime – based	Toxic inorganics , Stack – gas scrubber sludges	Organics , Toxic anions
Thermoplastic	Toxic inorganics	Organics , Strong oxidizers
Organic Polymer	Toxic inorganics	Organics , Acidic materials Strong oxidizers
Encapsulation	Toxic and Soluble inorganics	Strong oxidizers

ที่มา : (12)

2.5 การทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement base technique)

การทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ เป็นกระบวนการตรึงกากของเสียโดยใช้สารยึดประสานเป็นซีเมนต์ หรืออาจจะผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ได้แก่ ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบ หรือฝุ่นซีเมนต์ เป็นต้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็ง คอนกรีตที่ได้จากการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน เรียกว่า คอนกรีตปอซโซลาน (Pozzolanic concrete) ที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามเวลา (13)(14) และใช้ได้ดีกับกากตะกอนหลายชนิด ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน เมื่อผสมกันแล้วนำมารวมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนและมีค่า pH สูง ในการนำโลหะมาบำบัดด้วยวิธีการหล่อแข็งหากเป็นวัสดุที่เป็นโลหะหนัก ที่อยู่ในรูปสารละลายจะต้องมีการตกตะกอนโลหะหนักออกจากของเหลวก่อนนำมาหล่อแข็ง โลหะหนักที่นำมาผสมกับคอนกรีตปอซโซลาน จะถูกทำให้อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble hydroxide) หรือเกลือคาร์บอเนต (Carbonate salts) (15)(16) อิออนของโลหะหนักจะเข้าไปอยู่ในโครงผลึกของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และ วัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีผลต่ออัตราการรั่วไหล โดยไปลดการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในเนื้อของก้อนหล่อแข็ง

Copyright by Mahidol University

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางชนิดที่มีอยู่ในกากตะกอนสามารถเข้าไปแทรกสอด (Interfere) ต่อกระบวนการหล่อแข็งด้วยเทคนิค Cement - Based ได้ โดยจะไปยับยั้งการก่อตัวหรือเกิดการบวม ทำให้ความแข็งแรงลดลง สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ดังกล่าว ได้แก่ เกลือของโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ของแมงกานีส, สังกะสี, ทองแดง และตะกั่ว นอกจากนี้ยังรวมถึงสารปนเปื้อน ได้แก่ อินทรีย์สาร, โคลน, ดินเหนียวบางชนิด ซึ่งสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดการจับตัวได้ช้า เกิดการแข็งตัวได้ช้า สำหรับสารปนเปื้อนอื่นๆ และสารที่มีความละเอียดผ่าน Sieve No. 200 mesh จะสามารถไปเคลือบบนอนุภาคที่ใหญ่กว่า ทำให้พันธะระหว่างของเสียกับปูนซีเมนต์อ่อนลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย การเติมสารเพิ่ม (Additive) พิเศษบางตัว จะช่วยแก้ปัญหาการยับยั้งการบวมและเพิ่มความต้านทานการซึมผ่าน รวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงให้กับก้อนหล่อแข็งอีกด้วย และการเติมสารเพิ่มสามารถใช้กับการหล่อแข็งของเสียที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ได้สูงถึงร้อยละ 10 (12) (15) นอกจากนี้สารประกอบประเภทซัลเฟต ก็มีผลต่อการหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ และยังทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เกิดเป็นยิปซั่ม และสารประกอบซัลโฟอลูมิเนต (Sulfoaluminate compound) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุผสม ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ของเสียอันตรายที่มีประจุเป็นลบ ได้แก่ ไซยาไนด์ โครเมต และอาร์ซีเนต จะต้องมีการบำบัดก่อนที่จะนำมาทำให้เป็นก้อน (17) ข้อดีและข้อเสียของการหล่อแข็ง หรือการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ Thompson , Malone และ Jone ได้สรุปข้อดีข้อเสียของขบวนการ ดังแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีข้อเสียของขบวนการหล่อแข็ง โดยการทำเป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

Advantages	Disadvantages
1. Additives are available at a reasonable price. 2. The techniques of cement mixing and handling are well developed. 3. The necessary processing equipment is readily available 4. The Techniques are reasonably tolerant of chemical variations in sludges. 5. The strength and permeability of the final product can be varied by controlling the amount of cement added in the process.	1. Low-strength cement-water mixtures are often vulnerable to acidic leaching solutions, Extreme conditions can result in the decomposition of the fixed material, resulting in accelerated leaching of the contaminants. 2. Pretreatment, more expensive cement types, or costly additives may be necessary for stabilization of wastes containing impurities that affect the setting and curing of cement. 3. Cement and other additives add considerably to the weight and bulk of the sludge.

ที่มา : (18)

Copyright by Mahidol University

Sallars และ Perry กล่าวถึงประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยการหล่อแข็ง หรือการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสม ในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

Waste Characteriatic	Reason for non-acceptance
1. Inorganic Wastes	
1.1 High soluble salt content	Affect cement setting
1.2 High toxic anion content, e.g. borates	More easily leached than cation
1.3 High content of cement retarders, e.g. sulphates	Affect strength of final product
1.4 Production of toxic odours not destroyed during processing	In-plant health hazard
1.5 Production of toxic/hazardous gases on contact with water or alkali, e.g. metal carbides	In-plant health/safety hazard
2. Organic Wastes	
2.1 Contain flammable/explosive materials	In-plant health/safety hazard
2.2 Contain biologically active compounds	May leach readity from final product
2.3 Contain compounds inhibiting cement setting, e.g. sugar	Affects strength of final product

ที่มา : (19)

2.6 กลไกการยึดโลหะหนัก

Bishop (20) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการหล่อแข็งด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยศึกษาถึง Buffering Capacity ของก้อนหล่อแข็งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

2.6.1 ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) จากการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) ด้วยกรดอะซิติค ติดต่อกันจำนวน 15 ครั้ง โดยทำการตรวจวัดค่า pH

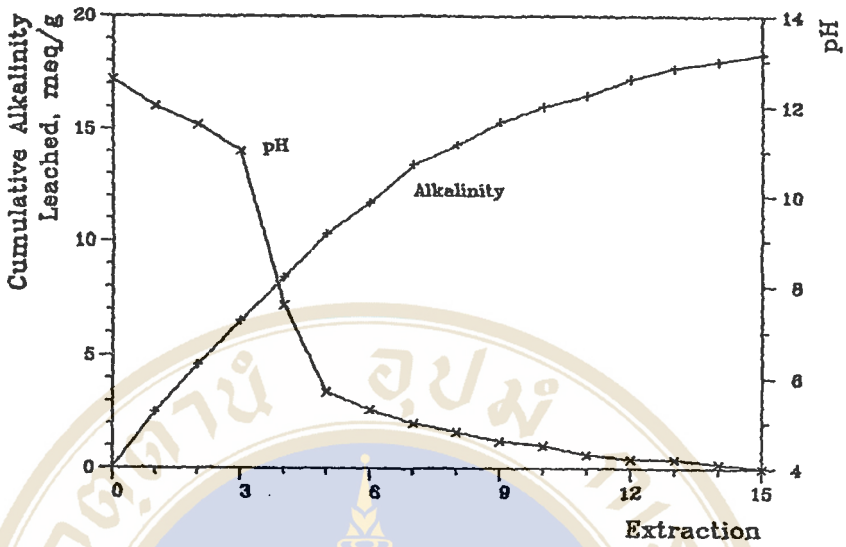
Copyright by Mahidol University

และความเป็นด่าง (Alkalinity) ในแต่ละครั้ง นำผลมาเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 2.3 ผลที่ได้พบว่า ค่า pH ของกรดที่ผ่านการสกัดมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (Cumulative Alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกสกัดได้จะเหลือน้อยมาก ประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกสกัดออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับ ค่าความเป็นด่างสะสมตลอดการสกัด 15 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 18.3 มิลลิสมมูล/กรัม (meg/g) ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสียที่ทำให้เป็นก้อน ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมาแต่ละครั้งเป็นตัวควบคุม pH ของน้ำที่ผ่านการสกัด โดยสะเทินกรดอะซิติกให้เป็นกลาง pH ของกรดอะซิติกที่ผ่านการสกัดจะมีค่า pH ลดลงอย่างต่อเนื่อง

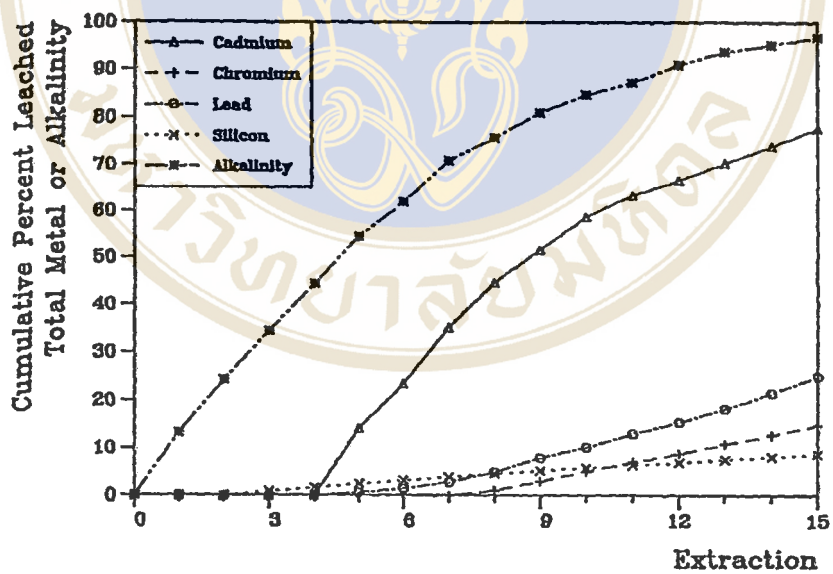
2.6.2 กลไกการยึดจับโลหะหนัก จากภาพที่ 2.4 แสดงถึงปริมาณโลหะหนักสะสมที่ถูกสกัด ค่าความเป็นด่างสะสม และปริมาณซิลิกอนที่ถูกสกัดสะสม ที่ได้จากการทดสอบการชะละลายด้วยกรดอะซิติค ติดต่อกันจำนวน 15 ครั้ง พบว่ามีความคล้ายกันของเส้นกราฟความเป็นด่างสะสมกับปริมาณแคดเมียมสะสม สันนิษฐานได้ว่าแคดเมียม ควรอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ และอยู่ตามช่องว่างภายในของคอนกรีต

ส่วนโครเมียมและตะกั่ว สันนิษฐานว่าน่าจะอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนในรูปของซิลิเกตที่ไม่ละลายน้ำมากกว่าอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีตในรูปไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีความคล้ายกันของปริมาณสะสมโครเมียมและตะกั่ว กับปริมาณของซิลิกอนที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์และทราย ประกอบกับการชะละลายไฮดรอกไซด์ของโครเมียม และตะกั่ว ค่อนข้างยาก จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ pH ต่ำๆ และต่ำกว่า pH ในการชะละลายแคดเมี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และผลการทดลองพบว่าอัตราการชะละลายของโครเมียมและตะกั่ว มีค่าต่ำกว่าอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ดังนั้นโครเมียมและตะกั่วจึงเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และถูกชะละลายออกมาก็ต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย

Copyright by Mahidol University

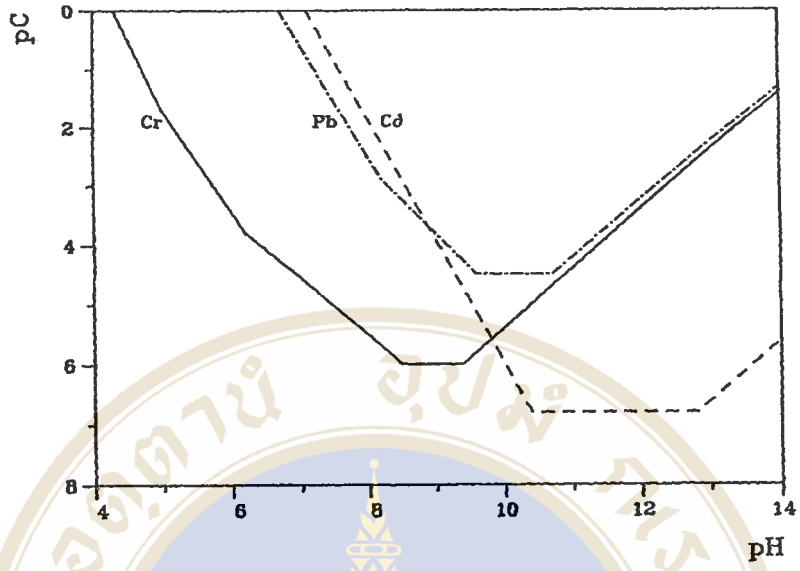


ภาพที่ 2.3 ค่าพีเอช (pH) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากการทดสอบการสกัด (20)



ภาพที่ 2.4 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายสะสม ค่าเป็นด่างสะสมและปริมาณซิลิกอนที่ถูกชะละลายสะสม จากการทดสอบการสกัดด้วยกรดอะซิติคติดต่อกัน 15 ครั้ง (20)

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 2.5 pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมี่ยม โครเมียม และตะกั่ว (20)

Poon (21) ได้ทำการศึกษากลไกการจับยึดของสังกะสีและปรอท โดยเทคนิคการใช้ซีเมนต์ทำเป็นก้อนหล่อแข็ง และทำการทดสอบการสกัด การศึกษาอนุภาคต่างๆ ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) การวิเคราะห์สารต่างๆ ด้วย X-ray Diffraction (XRD) ได้ผลการทดลองและสรุปผลดังนี้

จากการใช้ SEM วิเคราะห์ตัวอย่างก้อนหล่อแข็ง พบว่า ปริมาณสังกะสีที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผลึกเส้นใยของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ผลึกของไดรแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมไฮดรอก-ไซด์ ลดลง ในขณะเดียวกันขนาดของผลึก Ettringite และผลึกโมโนซัลเฟต และสารที่ไม่สามารถจำแนกเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของปรอทเมื่อนำมาทำการหล่อให้เป็นก้อน และทำการทดสอบการสกัด พบว่า ปริมาณปรอทจะถูกชะละลายตั้งแต่เริ่มต้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าขนาดของช่องว่างในซีเมนต์ผสมโซเดียมซิลิเกตที่มีปรอทผสมอยู่ มีขนาดใกล้เคียงกับซีเมนต์ผสมโซเดียม-ซิลิเกต และมีขนาดช่องว่างเล็กกว่าซีเมนต์ผสมซิลิเกตที่มีสังกะสีผสมอยู่ และ จากการวิเคราะห์ด้วย XRD ไม่พบว่าปรอทได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ หรือโซเดียมซิลิเกต

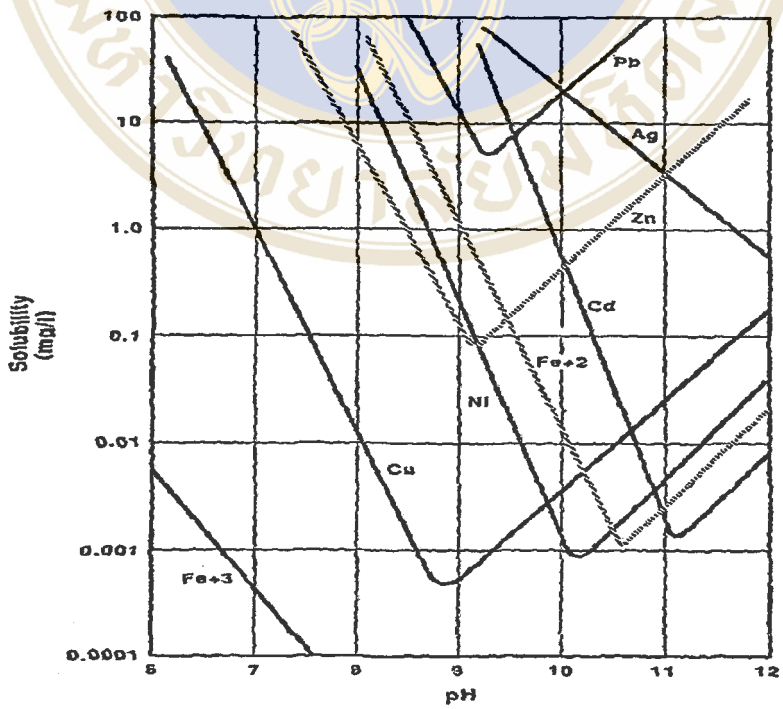
จากการพบกลไกในการจับยึดโลหะหนักในกระบวนการหล่อแข็งด้วยซีเมนต์ สามารถสรุปกลไกในการจับยึดได้ 2 ลักษณะ คือ

Copyright by Mahidol University

1. Chemical Stabilization เป็นการจับยึดโดยโลหะหนักทำปฏิกิริยากับสารประกอบในวัสดุผสม หรือสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์กับวัสดุผสม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ยึดติดอยู่ภายในช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็ง หรือยึดติดภายในโครงสร้างของสารประกอบของก้อนหล่อแข็ง

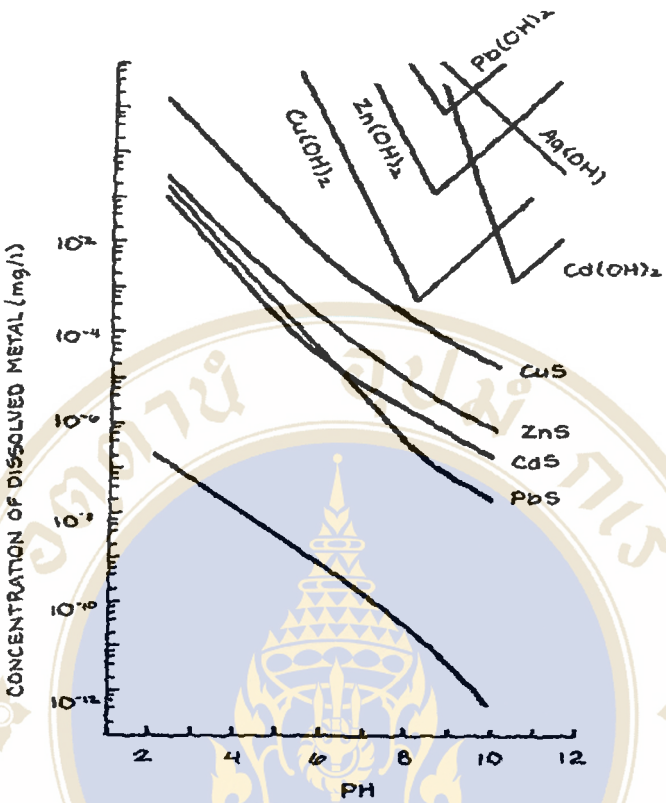
2. Physical entrapment โลหะจะไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในวัสดุผสม หรือไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ แต่โลหะจะคงรูปเดิม และแทรกตัวอยู่ในช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็ง โดยจับยึดอยู่เพียงหลวมๆ เท่านั้น

การควบคุมด้วยความเป็นกรด – ด่าง ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการทำให้โลหะหนักยึดเกาะกับวัสดุที่นำมาหล่อแข็ง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะมีการชะละลายออกมาได้น้อยในช่วง pH 7.5-11 แต่ก็มีโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม ซึ่งสามารถชะละลายได้ทั้งใน pH ที่สูงและต่ำ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะกำหนดระดับของ pH ที่ทำให้โลหะทุกชนิดชะละลายได้น้อยที่สุด ในภาพที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นการละลายของโลหะหนัก เมื่ออยู่ในรูปของโลหะอิออน จะมีการชะละลายได้ทั้งในช่วงที่ pH ต่ำ และ pH สูง แต่หากทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ หรือโลหะไฮดรอกไซด์ จะทำให้โดยชะละลายเกิดเฉพาะในช่วงที่ pH ต่ำเท่านั้น (8)



ภาพที่ 2.6 การละลายของโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ pH ต่างๆ (8)

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 2.7 การละลายของโลหะหนักที่อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ และโลหะไฮดรอกไซด์ที่ pH ต่างๆ (8)

ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้การควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งก้อนหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์จะมีค่า pH ประมาณ 7.5-11 โดยสันนิษฐานว่าโครเมียมน่าจะอยู่ในโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งในรูปสารประกอบเชิงซ้อน

2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง สารซีเมนต์ที่ได้มาจากการผสมกันของสารจำพวกแคลเซียมหรือวัสดุจำพวกหินปูนกับดินเหนียว และ/หรือ ซิลิกา, อลูมินาหรือสารจำพวกออกไซด์ของเหล็ก ตามอัตราส่วนที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ แล้วนำไปเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมจนทำปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด (22)

Copyright by Mahidol University

2.7.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกา (ASTM) และสำนักงานคณะกรรมผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้ (23)

2.7.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทหนึ่ง เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำ จะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาค สีเขียว เป็นต้น

2.7.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ได้แก่ งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ การหล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะให้กำลังรับแรงช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในปัจจุบันยังไม่มีผลิตในประเทศไทย

2.7.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทสาม เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงสูงในระยะแรก เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตโดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม เพิ่ม ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และลดไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) หรือโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็ว หรือรื้อแบบเร็ว ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังเหมาะกับการทำคอนกรีตในอากาศหนาว คอนกรีตที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ประเภทนี้เพียง 3 วัน จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ธรรมดาที่หล่อแล้วได้ 28 วัน ตัวอย่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง เป็นต้น

2.7.1.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทสี่ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด อัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหลา (Mass Concrete) ได้แก่ เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ขณะก่อตัวและ

Copyright by Mahidol University

แข็งตัว เป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในปัจจุบันยังไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้ แต่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ผสมกับวัสดุผสมเพิ่มประเภทปอซโซลาน ทดแทน

2.7.1.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทห้า เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ เนื่องจากมี ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำสุด เหมาะสำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง ได้แก่ น้ำ หรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทหนึ่ง ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราฉลาม ตราพญานาคสีฟ้า เป็นต้น

โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบประเภทออกไซด์ เป็นปริมาณโดยน้ำหนัก ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 Chemical Properties and Compound Composition of Ordinary Portland Cement

1. Chemical Composition		Percentage (%)
Calcium Oxide	CaO	63 - 65
Silicon Dioxide	SiO_2	20 - 22
Aluminum Oxide	Al_2O_3	5.1 - 6.0
Ferric Oxide	Fe_2O_3	3.0 - 3.2
Sulfer Trioxide	SO_3	2.0 - 1.6
Magnesium Oxide	MgO	1.4 - 1.5
Total Alkaline	(NaOH + KOH)	0.82 - 1.00
Loss of Ignition		0.6 - 2.0
Free Lime	$Ca(OH)_2$	0.5 - 1.0
Insoluble residue		0.1 - 0.5

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 2.5 Chemical Properties and Compound Composition of Ordinary Portland Cement (ต่อ)

2. Compound Composition		Percentage (%)
Dicalcium Silicate	2 $CaO.SiO_2$ (C_2S)	16.6 - 27.0
Tricalcium Silicate	3 $CaO.SiO_2$ (C_3S)	45.0 - 54.1
Tricalcium Aluminate	$3CaO.Al_2O_3$ (C_3A)	10.8 - 11.0
Tetracalcium Aluminoferrit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF)	8.0 - 9.1
Calcium Sulphate $CaSO_4$		3.1

ที่มา : (8,22)

สำหรับปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะมีสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 Typical Compositions of Portland Cement of Different Type

Compound Composition (Percent : %)	Type I (Max)	Type II (Max)	Type III (Max)	Type IV (Max)	Type V (Max)
Tricalcium Silicate : C_3S	67	55	70	44	54
Dicalcium Silicate : C_2S	31	39	38	57	49
Tricalcium aluminate : C_3A	14	8	17	7	5
TeTracalcium aluminoferrite : C_4AF	12	16	10	18	15
Free CaO	1.5	1.8	4.2	0.9	0.6
$CaSO_4$	3.4	3.4	4.6	3.5	3.9

ที่มา (22)

2.7.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ดังนี้

2.7.2.1 สารประกอบ ไดแคลเซียมซิลเกต ($2CaO.SiO_2$: C_2S) และ ไตร-แคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_3$: C_3S) ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบ

Copyright by Mahidol University

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$: $C_3S_2H_3$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ หรือ ($CaO.H_2O$: CH) สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารเขียนได้ดังนี้ (23)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท $C_3S_2H_3$ ทำให้ซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน มีความเหนียมคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เพสท์มีคุณสมบัติเป็นด่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้อาจทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิก้าและอลูมิน่าผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2.7.2.2 สารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างเร็วมากทันที่ทันใด และเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเขียนได้ดังนี้

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

เพื่อหน่วงไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีการใส่ยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเขียนได้ดังนี้

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4.2H_2O \text{ --------> } 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.3H_2O \quad \text{(Ettringite)}$$

แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้เรียกว่า เอ็ททริงไจต์ (Ettringite) มีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็มเกิดรอบๆ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ไม่ละลายน้ำและไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) จะทำปฏิกิริยากับเอ็ททริงไจต์อย่างช้าๆ และเปลี่ยนเป็น โมโนซัลโฟอลูมิเนต (Monosulfoaluminate) เมื่ออิออนของซัลเฟตถูกทำปฏิกิริยาหมดจะได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite : C_4AF) ทำปฏิกิริยากับยิปซั่มในน้ำ โดยยิปซั่มจะหน่วงให้ปฏิกิริยาช้าลง สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเขียนได้ดังนี้

$$4CaO.Al_2O_3.FeO_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \text{ ----------> } 3CaO(Al_2O_3.Fe_2O_3).CaSO_4$$

Copyright by Mahidol University

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Hydration Reaction) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้ (22)

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อผสม C_3S จะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ความร้อนจะค่อยๆ ลดลง และหยุดภายใน 15 นาที

ขั้นตอนที่ 2 จะไม่ค่อยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น เรียกขั้นนี้ว่า "ระยะฟักตัว" (dormant period) ซึ่งเป็นขั้นที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในสภาพพลาสติกเป็นเวลาหลายหลายชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 C_3S จะเกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ซึ่งขั้นนี้เรียกว่า "ระยะเร่ง (acceleration period) ซึ่งจะเริ่มประมาณ 2-3 ชั่วโมงหลังจากซีเมนต์ผสมน้ำ ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มก่อตัว และเริ่มมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกิริยาจะลดลงทำให้ความร้อนลดลง เรียกขั้นนี้ว่า ระยะลด (deceleration period) ขณะที่ C_3A เริ่มทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างช้าๆ

ขั้นตอนที่ 5 ปฏิกิริยาเกิดช้าๆ หรือน้อยมาก จนกระทั่งซีเมนต์แข็งตัว

ปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า "ความร้อนของปฏิกิริยา" (Heat of Hydration) ความร้อนของปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของ C_3S และ C_3A สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จะให้ความร้อนเกิดขึ้นประมาณ 85 – 100 Cal/gm หรือ 355.878 – 416.68 J/g (24) ความร้อนที่เกิดขึ้นบางส่วนจะถ่ายเทผ่านเนื้อคอนกรีตมายังผิวภายนอก และมีบางส่วนสะสมอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าสูง อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่คอนกรีตได้ โดยความร้อนส่วนนี้จะทำให้เกิดการเสียความแข็งแรงได้ และทำให้เกิดหน่วงแรงต่างๆ ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว สำหรับคอนกรีตที่ไม่หนามาก ความร้อนอาจถ่ายเทออกสู่ภายนอกได้ง่าย

หากในการผสมซีเมนต์เพื่อการหล่อแข็งโลหะหนัก โดยมีการผสมสารโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้มีการเปลี่ยนโลหะให้อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ ที่ไม่ละลายใน pH ที่ต่ำ จากการศึกษาอิทธิพลของสารประกอบซัลไฟด์ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า ของปริญญา จินดาประเสริฐ และ สหรัฐ พุทธวรรณะ (25) พบว่า โซเดียมซัลไฟด์ไม่ค่อยมีผลต่อความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัว และกำลังรับแรงอัด เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์ไม่เกิน 30,000 ppm และในช่วงปริมาณความเข้มข้น 0-5,000 ppm จะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัว ส่วนปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่า 1,000 ppm จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดเพียงเล็กน้อย

Copyright by Mahidol University

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ตราช้าง เป็นส่วนผสมหลักในการหล่อแข็งโลหะหนัก และเนื่องจากการศึกษามุ่งเน้นเพียงโครเมียมเท่านั้น จึงไม่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์เป็นส่วนผสมเพิ่ม

2.8 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

ตามมาตรฐาน ASTM C 618-78 ให้คำจำกัดความของคำว่า "ปอซโซลาน (Pozzolan)" ว่า เป็นวัสดุที่มีซิลิก้า หรือซิลิก้าและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไป วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious Properties) แต่ถ้าวัสดุปอซโซลาน มีความละเอียดและมีน้ำเพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (22) การจำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-94a ได้จำแนกวัสดุปอซโซลานเป็น 3 ประเภท ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618-94a

ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ	ประเภทวัสดุปอซโซลาน		
	Class N	Class F	Class C
ผลรวมของ ซิลิกอนไดออกไซด์, อลูมิเนียมไดออกไซด์ และไอออนออกไซด์ รวมต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลด์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้นสูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0
ความละเอียด : ปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ความคงตัว : การขยายตัวหรือหดตัว สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ความต้องการน้ำสูงสุด ร้อยละ	115	105	105
ดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) เมื่อ			
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

ที่มา : (26)

Copyright by Mahidol University

ประเภทของวัสดุปอซโซลาน อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ (14)

1. วัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolans) คือวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพรุน (Pumicite) เป็นต้น วัสดุปอซโซลานประเภทนี้มักจัดอยู่ใน Class N

2. วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artficial Pozzolans) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านขบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น วัสดุปอซโซลานประเภทนี้มักจัดอยู่ใน Class F และ Class C

วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งยังไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน แต่หากนำมารวมกับปูน-ซีเมนต์ และผสมกับน้ำ ปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำที่เร็วกว่าจะได้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ช้ากว่า เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน สมการของปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$
$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan reaction)

$$3\ Ca(OH)_2 + 2\ SiO_2 \text{ ----------> } 3\ CaO.2SiO_2.3H_2O$$
$$3\ Ca(OH)_2 + 2\ AlO_3 \text{ ----------> } 3\ CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

วัสดุปอซโซลานให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยากับน้ำที่ต่ำ ให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังเท่ากันหรือมากกว่า เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตได้ วัสดุปอซโซลานโดยส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบทางเคมี และกายภาพที่ไม่เหมือนกัน ในการใช้วัสดุปอซโซลานจึงต้องมีการ

Copyright by Mahidol University

พิจารณาในเรื่องดังกล่าวด้วย แต่โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ จะเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 550 - 1,100 ^{0}C

2.9 ขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) (14) (27) (28) (29)

แกลบเป็นกากเหลือทิ้งที่ได้จากการสีข้าวเพื่อเอาข้าวสาร หลายประเทศรวมทั้งในประเทศไทยได้นำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ อบก้อนอิฐ และนำขี้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมทำอิฐ หรือใช้ผสมกับวัสดุอื่นๆ ในการทำเตาไฟ ทำให้ทนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น แต่การใช้ในลักษณะต่างๆ ยังมีปริมาณที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับแกลบทั้งหมดที่ได้จากการสีข้าว แกลบข้าวที่ได้จากการสีข้าวจะมีปริมาณประมาณ 20 % โดยน้ำหนักของข้าวเปลือก สำหรับประเทศไทยผลิตข้าวได้ประมาณ 20 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2535 / 36 (30) ซึ่งทำให้เกิดปริมาณแกลบโดยประมาณ 4 ล้านตัน ทำให้เกิดภาระในการจัดหาที่ทิ้งและจัดการกับแกลบอย่างมาก

แกลบเมื่อนำมาเผาจะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งการเผาแกลบนั้นมีการจัดการ 2 ลักษณะ คือ การเผาแบบเปิด และการเผาแบบปิดหรือควบคุมการเผาไหม้ ซึ่งขี้เถ้าแกลบที่นำมาเผาจะมีลักษณะที่แตกต่างกับดังนี้

1. การเผาแบบเปิดจะมีอัตราส่วนของซิลิกาอยู่ในรูปผลึกที่มีความว่องไวในปฏิกิริยาน้อยอยู่เป็นจำนวนมาก โดยจะมีบางส่วนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงวัสดุปอซโซลาน
2. การเผาแบบปิด หรือควบคุมการเผาไหม้ จะได้ขี้เถ้าแกลบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานสูง ซิลิกาจะไม่อยู่ในรูปผลึก และมีโครงสร้างคล้ายเส้นใย

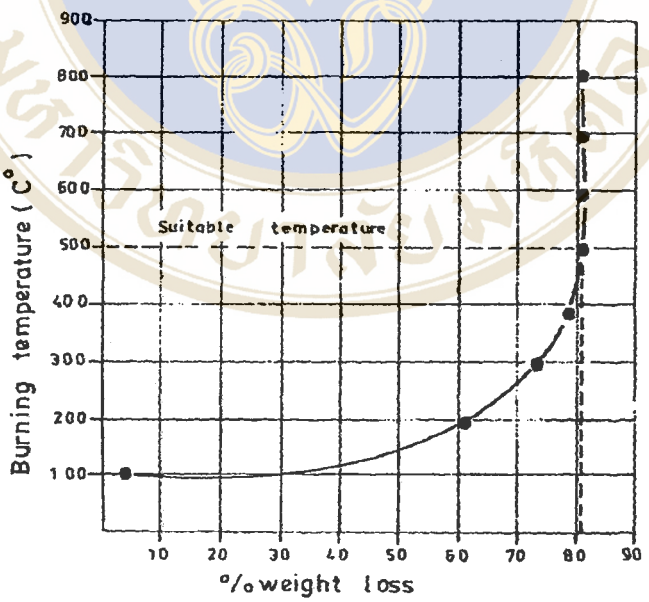
ในการเผาแบบควบคุมหากนำแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 450 ^{0}C นาน 4 ชั่วโมง เถ้าที่ได้จะมีปริมาณซิลิกาสูงถึง 93 % โดยน้ำหนัก จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน class N ถ้านำขี้เถ้าแกลบมาบดด้วย ball mill นาน 72 ชั่วโมง จะได้ความละเอียดประมาณ 22,000 sq.cm/g ถ้าบดนาน 1 - 1.5 ชั่วโมง จะได้ความละเอียด 11 - 13,000 sq.cm/g และถ้าบดในระยะเวลาอันสั้น จะได้ความละเอียด 5 – 8,000 sq.cm/g ซึ่งความละเอียดจะแตกต่างกันมาก (22) (29)

ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง จะมีสีเป็นสีดำเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการเผาที่ใช้เวลาน้อย และมีอุณหภูมิที่ไม่สูง จึงยังทำให้ขี้เถ้าแกลบไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี แต่หากเป็นการเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะได้ขี้เถ้าแกลบที่มีสีเทา และทำให้ซิลิกาอยู่ในรูป

Copyright by Mahidol University

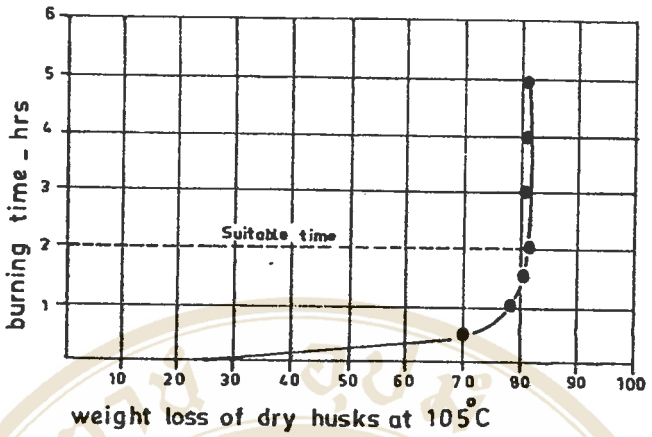
อสัณฐาน มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา แต่ทั้งนี้ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาจะยังคงมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่อยู่ จึงจำเป็นต้องมีการนำมาบดละเอียด จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ จากการศึกษาของ Justin (31) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของซิลิก้าในขี้เถ้าแกลบ โดยใช้วิธี X-Ray diffraction พบว่าการเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C จะทำให้ขี้เถ้าแกลบอยู่ในรูปอสัณฐาน และมีความไวต่อปฏิกิริยา และหากเผาแกลบที่อุณหภูมิมากกว่า 800 °C จะทำให้ขี้เถ้าแกลบอยู่ในรูปผลึก ซึ่งจะเฉื่อยต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบจะแปรผกผันกับอุณหภูมิในการเผาแกลบ

Moayad and Hana (32) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของขี้เถ้าแกลบที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต พบว่า แกลบเมื่อนำมาเผาจะมีที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะเริ่มมีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักที่คงที่ และคงที่ตลอดไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และ 2.9 ในเรื่องของความละเอียดของขี้เถ้าแกลบ เมื่อนำมาบดในเครื่อง Los Angeles Abrasion ยังพบว่าขี้เถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C จะมีความละเอียดในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) มากที่สุดไม่ว่าจะใช้ระยะเวลาบดนานเท่าใด ดังแสดงในภาพที่ 2.10

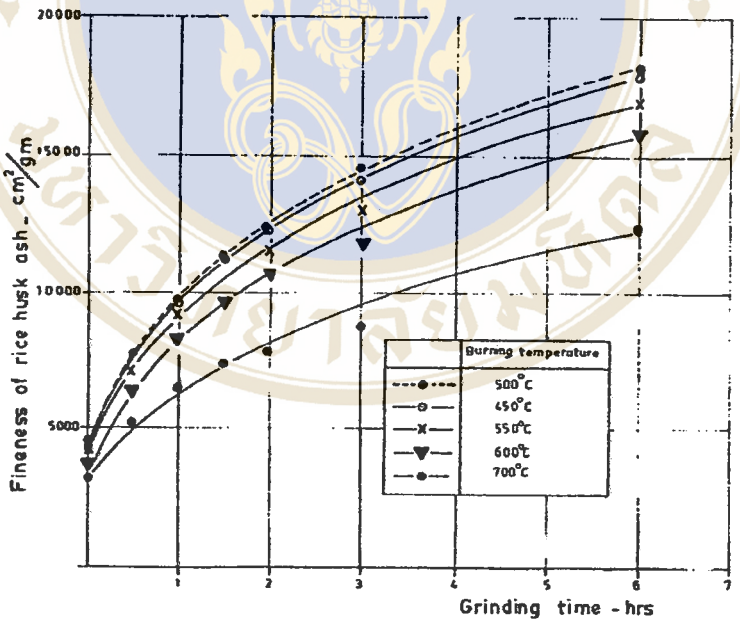


ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาแกลบ กับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแกลบที่หายไปจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (32)

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาแกลบ กับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแกลบที่หายไปจากการเผาที่อุณหภูมิ 105 °C (32)



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบดขี้เถ้าแกลบกับความละเอียดของขี้เถ้าแกลบที่ได้ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface ; cm^2/gm) (32)

Copyright by Mahidol University

บุรฉัตร ฉัตรวีระ พิชัย นิมิตยงสกุล และ พนม สีหาบุตร ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาสร้างเครื่องบดที่มีประสิทธิภาพ และราคาย่อมเยา สำหรับการผลิตขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุผสมซีเมนต์ (33) โดยได้ทำการกำหนดความละเอียดของขี้เถ้าแกลบด้วยตะแกรง No. 325 และนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบพบว่า กำลังรับแรงอัดจะแปรตามความละเอียดของขี้เถ้าแกลบ

ได้มีการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขี้เถ้าแกลบหลายฉบับ ซึ่งได้มีการหาส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ของขี้เถ้าแกลบ ไว้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8 พบว่าขี้เถ้าแกลบในแต่ละแหล่ง ที่นำมาใช้ในการศึกษา จะมีส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทาง กายภาพของขี้เถ้าแกลบที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นในการศึกษาที่ต้องใช้ขี้เถ้าแกลบจะต้องมีการพิจารณาถึงขี้เถ้าแกลบที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการผสมปูนซีเมนต์เป็นหลัก

ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของขี้เถ้าแกลบ

ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ	ขี้เถ้าแกลบ	
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	89.89 %	92.05 %
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	1.03 %	0.94 %
ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.76 %	0.81 %
แคลเซียมออกไซด์(CaO)	0.98 %	0.27 %
แมกนีเซียมออกไซด์(MgO)	0.28 %	0.27 %
โปแตสเซียมออกไซด์(K_2O)	2.09 %	1.72 %
โซเดียมออกไซด์(Na_2O)	0.05 %	0.06 %
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์(SO_3)	0.84 %	0.13 %
ฟอสฟอรัสออกไซด์(P_2O_5)	0.49 %	-*
ไททาเนียมออกไซด์(TiO_2)	0.04 %	-*
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	3.33	3.19
ความถ่วงจำเพาะ	2.15	2.085
พื้นที่ผิวจำเพาะ (sq.cm/g)	8240	14,300
ความละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 325)	81	-*
ปริมาณความชื้น	1.69	-*

ที่มา : ชนิดที่ 1 (34) , ชนิดที่ 2 (35) หมายเหตุ * หมายถึง ไม่มีการบันทึกข้อมูล

Copyright by Mahidol University

ในการใช้ขี้เถ้าแกลบที่เป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุผสมซีเมนต์ (Cementitous Material) สามารถนำมาใช้ผสมได้ 3 ลักษณะ คือ

1. การผสมโดยการแทนที่ (Replacement Method) เป็นการผสมโดยใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ลดลงโดยน้ำหนัก ซึ่งจะมีผลต่อการหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนที่แทนที่

2. การผสมโดยการผสมเพิ่ม (Addition Method) เป็นการผสมโดยใช้วัสดุปอซโซลานผสมเพิ่มจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้งาน วิธีนี้จะทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลง ลดการเยิ้มของคอนกรีต

3. การผสมโดยการแทนที่และผสมเพิ่มรวมกัน (Replacement and Addition Method) เป็นการผสมโดยการผสมวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ลดลงโดยน้ำหนัก

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ขี้เถ้าแกลบที่สามารถใช้งานร่วมกับซีเมนต์ จะต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิในการเผา ระยะเวลาในการเผา และความละเอียดของขี้เถ้าแกลบ ซึ่งจะมีผลต่อความไวของปฏิกิริยา สำหรับขี้เถ้าแกลบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จะเป็นแกลบที่ได้จากเตาเผาอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน แล้วนำมาผ่านเครื่องบดแบบหมุน ใช้โลหะบดเป็นเหล็กละมุน ทำการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบความละเอียดของขี้เถ้าแกลบให้มีความละเอียดผ่านตะแกรง No. 325 มากกว่า 90 %

2.10 ซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ

ได้มีการศึกษา ถึงสัดส่วนผสม และคุณสมบัติ ของซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบอย่างกว้างขวาง จากการศึกษาของ Y.C. Loo และคณะ (14) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ พบว่า เมื่อใช้ขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ 50% คุณสมบัติของซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบที่ได้เหมือนกับซีเมนต์ปกติที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากัน

จากการวิจัยของ D.J. Cook (36) ได้นำปูนซีเมนต์มาผสมขี้เถ้าแกลบและน้ำ โดยใช้อัตราส่วนต่างๆกัน พบว่าเมื่อผสมขี้เถ้าแกลบลงในปูนซีเมนต์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อปริมาณขี้เถ้าแกลบสูงขึ้น และเมื่อบ่มนานขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตาม ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ สำหรับการนำเถ้าแกลบมาทดแทนปูนซีเมนต์สามารถทดแทนได้ถึง 20 %

Copyright by Mahidol University

Metha (37) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ โดยผสมขี้เถ้าแกลบแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนตั้งแต่ 0 – 50 โดยน้ำหนัก นำทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าในระยะแรกมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าที่ผสมด้วยซีเมนต์อย่างเดียว และมอร์ต้าที่ใช้ขี้เถ้าแกลบผสมทดแทนซีเมนต์จะมีความต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดีกว่า

Moayad and Hana (32) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของขี้เถ้าแกลบที่เหมาะสมและนำมาผสมซีเมนต์เป็นซีเมนต์มอร์ต้า โดยใช้ขี้เถ้าแกลบทดแทนปูนซีเมนต์ 27 % แล้วนำมาผสมกับทรายในอัตราส่วน 1 : 2.75 ในอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ) ที่เหมาะสมทำให้เกิดสภาวะความข้นเหลวปกติ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมตร์มอร์ต้าผสมขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 450 °C จะมีมากกว่า 90 % และเมื่อนำขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน มาผสมกับทรายในอัตราส่วน 1 : 2 และ 1 : 3 ใช้น้ำที่เหมาะสมทำให้เกิดสภาวะความข้นเหลวปกติ พบว่า ปริมาณขี้เถ้าแกลบทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะลดน้อยลง

2.11 ดินซีเมนต์บล็อก

ดินซีเมนต์บล็อก(38) หมายถึง บล็อก (Block) หรือแท่งดินซีเมนต์ ที่ทำจากส่วนผสมระหว่างดินปนทรายสีแดงหรือดินลูกรังแดง หรือหินชนวนผุ หรือศิลาแลงสลายตัว หรือหินฝุ่น กับปูนซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม คลุกเคล้าเข้ากันจนทั่ว แล้วนำเข้าเครื่องอัดให้เป็นบล็อกหรือแท่ง บล็อกที่ได้จากเครื่องอัด จะถูกยกมาวางผึ่งในที่ร่มประมาณ 1 วัน จากนั้นทำการบ่มด้วยน้ำ 4-5 วัน จึงสามารถนำมาใช้งานได้ อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุผสมของดินซีเมนต์บล็อก แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุผสมของดินซีเมนต์บล็อก

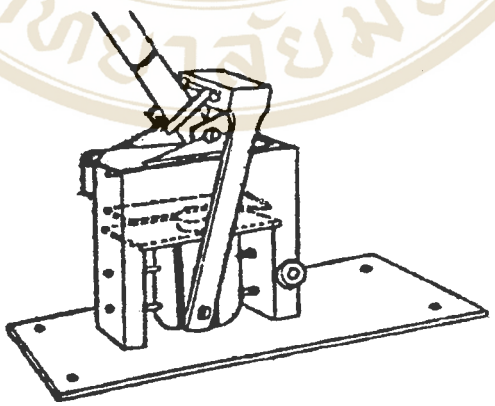
วัสดุผสม	อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุผสม
ดินปนทรายสีแดง หรือ ดินลูกรังแดง หรือ ดินชนวนผุ	1 : 8
ศิลาแลงสลายตัว	1 : 7
หินฝุ่น	1 : 7

ที่มา : (38)

Copyright by Mahidol University

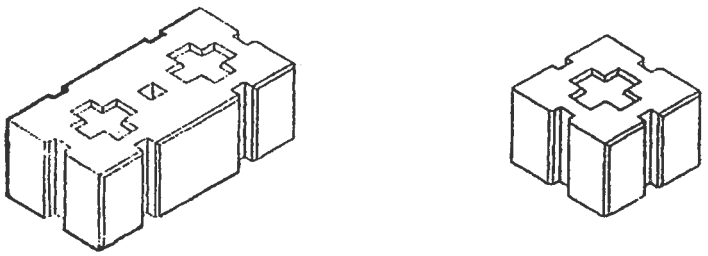
อัตราส่วนส่วนผสมในการทำดินซีเมนต์บล็อก จะมีหลายสูตรอัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water /Cement Ratio) สำหรับการทำดินซีเมนต์บล็อก จะมีอัตราที่ต่ำ โดยส่วนผสมที่ผสมเสร็จแล้วจะมีลักษณะที่ไม่มีการยุบตัว ส่วนผสมมีลักษณะคล้ายขนมปุยฝ้าย ซึ่งเมื่อนำมาอัดด้วยเครื่องอัดดินซีเมนต์ได้บล็อกดินซีเมนต์แล้ว จะสามารถยกบล็อกออกจากเครื่องอัดได้ทันที

อัตราส่วนผสมสำหรับผสมวัสดุเพื่อเป็นอัดเป็นดินซีเมนต์บล็อกนั้น ทาง บริษัท เค. ไทย คอนซัลแตนท์ แอนด์ แมชชีนเนอรี จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตเครื่องอัดดินซีเมนตร์บล็อก แนะนำให้แก่ผู้ที่ซื้อเครื่องอัดดินซีเมนต์บล็อกจากบริษัท โดยมีอัตราส่วนผสมประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 ทำการผสมรวมกับน้ำ โดยใช้น้ำในปริมาณ ร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม เครื่องมือที่ใช้ในการอัดบล็อกดินซีเมนต์ ได้แก่ เครื่องซินวาแรม (Cinva-ram block moulding machine) ที่มีการพัฒนา ที่แสดงดังภาพที่ 2.11 บล็อกที่ได้จะเป็นบล็อกที่มีรู ร่องและเดือย ดังภาพที่ 2.12 ทำให้บล็อกแบบนี้สามารถประสานกันได้ทั้งในแนวนอนและแนวดิ่ง สามารถวางซ้อนกันได้ครั้งละหลายๆ แถว รูบล็อกยังเป็นที่สำหรับหยอดน้ำปูนทรายเชื่อมระหว่างบล็อกที่วางซ้อนกัน ทำให้ผนังที่ก่อมีความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักได้โดยไม่ต้องใช้เสา บล็อกแบบนี้เรียกว่าบล็อกแบบมีอินเตอร์ล็อกกิ้ง (Inter-locking block) มีด้วยกัน 2 ขนาด คือ ชนิดขนาดเต็มก้อน และชนิดขนาดครึ่งก้อน ชนิดขนาดเต็มก้อนมีขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ชนิดขนาดครึ่งก้อนมีขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร



ภาพที่ 2.11 เครื่องซินวาแรมสำหรับอัดดินซีเมนต์บล็อก

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 2.12 บล็อกดินซีเมนต์แบบมีอินเตอร์ล็อกกิ้ง

ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้วัสดุผสมที่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น โดยหินฝุ่นที่นำมาผสมจะใช้หินฝุ่นจากโรงโม่ หิน บริษัท ศิลาสานนท์ จำกัด ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ซึ่งจะมีขนาดและความละเอียดของวัสดุที่เหมาะสม ไม่ทำการบดหรือคัดขนาด นำมาผสมในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 โดยใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม ทำการอัดด้วยเครื่องซินวาแรมเป็นบล็อกดินซีเมนต์ชนิดขนาดครึ่งก้อนขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร

2.12 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (39)ให้นิยามของ คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก หมายถึง ก้อนคอนกรีตสำหรับก่อผนังหรือกำแพง ที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักของตัวเอง โดยก้อนคอนกรีตจะต้องมีมิติทางสูงจะต้องไม่เกินมิติทางยาว จะตันหรือมีรูหรือโพรงทะลุตลอดก้อนก็ได้ แต่พื้นที่ภาคตัดขวางสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวธาร จะต้องไม่น้อยกว่า 75 % ของพื้นที่ภาคตัดขวางรวมที่ระนาบเดียวกัน โดยทำการแบ่งชั้นคุณภาพ และ วัตถุประสงค์ในการใช้งาน ดังนี้

1. ประเภทคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่
   1.1 ประเภทควบคุมความชื้น ประกอบด้วยชั้นคุณภาพ ก-1, ข-1 และ ค-1
   1.2 ประเภทไม่ควบคุมความชื้น ประกอบด้วยชั้นคุณภาพ ก-2, ข-2 และ ค-2

Copyright by Mahidol University

2. วัตถุประสงค์ในการใช้คุณภาพคอนกรีตบล็อกชั้นคุณภาพต่างๆ ได้แก่

2.1 ชั้นคุณภาพ ก-1 และ ก-2 ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งเหนือและต่ำกว่าระดับดิน โดยไม่มีการป้องกันผิวแต่อย่างใด ใช้ในกรณีที่น้ำใต้ดินหรือฝนไม่ทำความเสียหายต่องาน

2.2 ชั้นคุณภาพ ข-1 และ ข-2 ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งเหนือและต่ำกว่าระดับดิน แต่มีการป้องกันผิว

2.3 ชั้นคุณภาพ ค-1 และ ค-2 ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงเหนือระดับดินที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ

ในส่วนของเกณฑ์กำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักชั้นคุณภาพต่างๆ กำหนดไว้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 เกณฑ์กำหนดกำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก

ชั้นคุณภาพของคอนกรีตบล็อก(1)	กำลังต้านแรงอัด ต่ำสุด กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร			
	เฉลี่ยจากพื้นที่รวม		เฉลี่ยจากพื้นที่สุทธิ	
	เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน	เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน
ก-1 , ก-2	125	105	140	115
ข-1 , ข-2	125	105	-	-
ค-1 , ค-2	85	70	-	-

จากนิยามของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก จะพบว่าดินซีเมนต์บล็อกแบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง ชนิดครึ่งก้อน ขนาดขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร จัดอยู่ในประเภทเดียวกับคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก และเนื่องจากการหล่อแข็งของเสียที่เป็นอันตรายในรูปดินซีเมนต์บล็อก ไม่ควรมีความเสี่ยงต่อผุพังจากดินฟ้าอากาศ ซึ่งอาจทำให้ของเสียที่ถูกตรึงไว้รั่วซึมออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ตามคุณภาพชั้น ค-2 ซึ่งเป็นชั้นคุณภาพสำหรับกำแพงทั่วไปเหนือระดับดินที่มีการป้องกันผิว และไม่มีการควบคุมความชื้นของผลิตภัณฑ์ มาเป็นมาตรฐานในการควบคุมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหล่อแข็งของเสียอันตราย

Copyright by Mahidol University

2.13 การทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests)

การทดสอบการชะละลาย มีการกำหนดวิธีการทดสอบหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องการทดสอบ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีการใช้ปริมาณสาร วิธีการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องมือที่แตกต่างกัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 Comparison of reference extraction test procedures

Laboratory Procedure	Standard – Leach Test	Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	EP Toxic (EPA Method1310A)
Amount of sample	28.6 g sample (solid fraction)	No minimum weight	350 g	100 g minimum (0.5 g solids)
Sample preparation	Liquid separation, 0.45 µm pressure filtration	Liquid separation, centrifugation/ filtration	Anticipated field form	Grind to 9.5 mm or subject to structural integrity test
Liquid/solid ratio	10 : 1 to 7 : 1	10 : 1 (8 : 1 initially)	4 : 1	20 : 1 (16 : 1 initially)
Extraction solution	Buffered acetic acid / distilled water	Acetic acid or sodium hydroxide	ASTM Type IV water	0.5 N acetic acid maximum, 4 ml/g of sample
pH control	Varied	4.9 to 5.2	None	4.8 to 5.2
Extraction vessel	Closed container	None specified	Wide mouth bottle (close)	stirring device or equivalent
Method of mixing and time	Rotating shaker / 24 h	Mechanical stirring / 24 h	Reciprocating shaker / 48 h	Continuous agitation / 24 h
Liquid/solid separation	Filter through 0.45 µm filter	Centrifugation / filtration , 0.45 µm volume adjusted to x10 solid fractions weight	0.45 µm filtration	0.45 µm filtration
Number of elution	3	2	1	1
Moisture content addressed	Yes	No	No	-

ที่มา : (40)

Copyright by Mahidol University

วิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการสำหรับการสกัดของเสียที่มีของแข็งปะปนอยู่ดังนี้ ดังต่อไปนี้ (41)

1. สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาด 0.6 – 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์

2. สำหรับของเสียที่มีของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็ง แล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์ ส่วนของแข็งทำการย่อยให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร และนำมาทดสอบเพื่อเลือกสารสกัด โดย

สารสกัดชนิดที่ 1 เป็นสารที่เตรียมจาก 5.7 มิลลิลิตร ของกรดเกลืออะซิติกผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 11.4 มิลลิลิตร กับ 64.3 มิลลิลิตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 128.6 มิลลิลิตรนำสารทั้งสองผสมเข้าด้วยกันและทำให้เจือจาง โดยเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร ทำการปั่นจนกระทั่ง pH คงที่ ทำการตรวจสอบ pH หาก pH สูงกว่า 4.93 ± 0.05 ให้เติม กรดเกลืออะซิติก หาก pH ต่ำกว่า 4.93 ± 0.05 ให้เติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล สารสกัดชนิดที่ 1 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิด และจะต้องใช้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง

สารสกัดชนิดที่ 2 เป็นสารสกัดที่ได้จากการนำ 5.7 มิลลิลิตรของเกลืออะซิติก ผสมน้ำให้ได้ปริมาตร 11.4 มิลลิลิตร และทำให้เจือจางโดยเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ทำการตรวจสอบ pH หากสูงกว่า 2.88 ± 0.05 ให้เติม กรดเกลืออะซิติก หาก pH ต่ำกว่า 2.88 ± 0.05 ให้เติมน้ำกลั่น สารสกัดชนิดที่ 2 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิด และจะต้องใช้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง

3. ในการเลือกสารสกัด ให้นำของแข็งจำนวน 5 กรัมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร ผสมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร กวนอย่างแรงเป็นเวลา 5 นาที ถ้า pH น้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้า pH มากกว่า 5 ให้เติม 3.5 มิลลิลิตรของกรดไฮโดรคลอลิค 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน 50 ^{o}C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว pH น้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 ถ้า pH มากกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่ 2 สำหรับของเสียที่เป็นสารระเหยได้ ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 เท่านั้น

4. นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม และใช้สารสกัดในปริมาณ 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ นำตัวอย่างที่ใส่สารสกัดแล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบ Rotary อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมากรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ขนาด 0.6 - 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์

Copyright by Mahidol University

วิธีการสกัดอีกวิธีได้แก่ วิธี Extraction Procedure Toxicity Test Method (EP Toxicity) มีขั้นตอนการดำเนินการสำหรับการสกัดของเสียที่มีของแข็งปะปนอยู่ดังนี้ ดังต่อไปนี้ (41)

1. สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาด 0.6 – 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์

2. สำหรับของเสียที่มีของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็ง แล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์ ส่วนของแข็งทำการย่อยให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร

3. การเตรียมกรดอะซิติก (0.5 N) เตรียมจากการนำ 57 มิลลิลิตรของเกลืออะซิติก ผสมน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร และทำให้เจือจางโดยเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 2 ลิตร กรดอะซิติกที่เตรียมไว้จะใช้ในการปรับ pH ในกระบวนการสกัดต่อไป

4. นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ใช้ในภาชนะสำหรับการสกัด แล้วเติมน้ำกลั่นในปริมาณ 16 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง ทำการตรวจสอบค่า pH ของของผสม หาก pH มากกว่า 5.0 ให้ทำการเติมกรดอะซิติก อย่างช้าๆ ให้มีค่า pH เท่ากับ 5.0 ± 0.2 หาก pH น้อยกว่า 5.0 ไม่ต้องเติมสารอะไร นำอย่างที่ใส่สารสกัดและปรับค่า pH แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบ Rotary อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง โดยในระหว่างการดำเนินการต้องทำการตรวจสอบค่า pH ของของผสมให้มีค่า pH เท่ากับ 5.0 ± 0.2 หาก โดยการปรับด้วยกรดอะซิติก ทุกๆ ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที ต่อเนื่อง 6 ชั่วโมง และทำการจดบันทึกปริมาณกรดที่เติมทุกครั้ง

5. เมื่อครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ให้ทำการตรวจสอบค่า pH ของของผสม หาก pH ของของผสมให้มีค่ามากกว่า 5.2 และปริมาณกรดอะซิติดที่เติมในระหว่างการดำเนินการมีปริมาณไม่เกิน 4 มิลลิลิตร ต่อกรัมน้ำหนักของของเสีย จะต้องทำการปรับ pH ของของผสมให้มีค่าเท่ากับ 5.0 ± 0.2 ด้วยกรดอะซิติกและดำเนินการสกัดต่ออีก 4 ชั่วโมง โดยการปรับด้วยกรดอะซิติกทุกๆ ระยะเวลา 1 ชั่วโมง และทำการจดบันทึกปริมาณกรดที่เติมทุกครั้ง

6. หลังจากนั้นนำของผสมที่ได้มาทำการเติมน้ำกลั่น ในปริมาตรที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$V = (20)(W) - (16)(W) - A \quad \text{..... (2.1)}$$

เมื่อ V = ปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องเติมเพิ่ม (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของเสีย (กรัม)

A = ปริมาณกรดอะซิติกที่เติมทั้งหมดตลอดช่วงการสกัด (มิลลิลิตร)

Copyright by Mahidol University

7. หลังจากนั้นนำตัวอย่างมากรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ขนาด 0.6 - 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์

ค่าปริมาณของสารอันตรายแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ได้จากน้ำสกัดจากการสกัดด้วยวิธีต่างๆ จะต้องมีค่าไม่เกินมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.12 จึงถือว่าเป็นของเสียที่ไม่จัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย

ตารางที่ 2.12 ระดับมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัด ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ชนิดสาร	ระดับมาตรฐาน (mg/l)	ชนิดสาร	ระดับมาตรฐาน (mg/l)
อาร์เซนิค	5.0	Hexachlorobenzene	0.13
แบเรียม	100.0	Hexachlorobutadiene	0.5
เบนซีน	0.5	Hexachkoroethane	3.0
แคดเมียม	1.0	ตะกั่ว	5.0
Carbon tetrachloride	0.5	Lindane	0.4
Chlordane	0.03	ปรอท	0.2
Chlorobenzene	100.0	Methoxychlor	10.0
คลอโรฟอร์ม	6.0	Methyl ethyl ketone	200.0
โครเมียม	5.0	Nitrobenzene	2.0
o-Cresol	200.0	Pentrachlorophenol	100.0
m-Cresol	200.0	Pyridine	5.0
p-Cresol	200.0	เซเลเนียม	1.0
Cresol	200.0	เงิน	5.0
2,4-D*	10.0	Tetrachloroethylene	0.7
1,4-Dichlorobenzene	7.5	Toxaphene	0.5
1,2-Dicchloroethane	0.5	Trichloroethylene	0.5
1,1-Dicchloroethylene	0.7	2,4,5-Trichlorophenol	400.0
2,4-Dinitrotoluene	0.13	2,4,6-Trichlorophenol	2.0
Endrin	0.02	2,4,5-TP (Silvex)**	1.0
Heptachlor	0.008	Vinyl chloride	0.2

หมายเหตุ : * สารประกอบประเภท Diclorophenel , ** สารประกอบประเภท Trichlorophenol

ที่มา : (41)

Copyright by Mahidol University

สำหรับประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2540) ได้ออกประกาศ ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว กำหนดวิธีการทดสอบการสกัดของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) ดังมีรายละเอียดและขั้นตอนดังนี้

หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเป็นของเหลว หรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่า 0.5 % ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์

หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว มีของแข็ง(Dry solids) ปะปนในปริมาณมากกว่า 0.5 % ให้ดำเนินการดังนี้

1. ทำการบดตัวอย่างให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

2. หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่มีขนาดผ่านตะแกรงจำนวน 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถัน และกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดด่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

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

4. กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน นำของเหลวที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะใช้วิธีการสกัดสารด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ในการสกัดของเสีย และก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

Copyright by Mahidol University

2.14 การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อนหล่อแข็ง

ของเสียที่ผ่านการทำเป็นก้อนหล่อแข็งแล้ว มีลักษณะที่ต้องพิจารณาดังนี้

1. ของเสียที่อยู่ในก้อนหล่อแข็งจะต้องอยู่ในรูปของสารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble) และไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

2. ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ก้อนหล่อแข็งจะต้องมีการทดสอบความสามารถซึมผ่านของน้ำ ซึ่งสามารถบอกได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient : K) มีหน่วยเป็น cm/s วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้อยจะมีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ หรือใช้เวลาที่ของเหลวจะซึมผ่านเข้าไปนาน เครื่องมือที่ใช้วัดได้แก่ Falling Head Permeability สำหรับคอนกรีตจะมีค่า $K \sim 10^{-6}$ cm/s เมื่อนำไปหล่อแข็งของเสียจะมีค่า $K \sim 10^{-7}$ cm/s เราสามารถคำนวณเวลาที่น้ำจะซึมผ่านก้อนหล่อแข็งได้จากสมการที่ 2.2

$$k = 2.3 (aL/AT) \log (h_1/h_2) \quad \text{..... (2.2)}$$

k = permeability coefficient (cm/s) L = Thickness of the material (cm)

h_1 = The initial depth of the water h_2 = The final depth of water

a = Area of glass tube (sq.cm) A = Area of the material (sq.cm)

T = Time of change from the initial depth to final depth

3. การรั่วซึมของของเสียออกจากก้อนหล่อแข็ง สามารถบอกได้ในรูปของความสามารถในการรั่วซึม (Leachability : L) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารที่รั่วไหลออกจากก้อนหล่อแข็ง หลังจากทำการสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับปริมาณสารก่อนทำการสกัด สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.3

$$L = W_1 / W_0 \quad \text{..... (2.3)}$$

L = Leachability (mg/g)

W_1 = ปริมาณสารที่รั่วไหลออกจากก้อนหล่อแข็งหลังทำการสกัด 24 ชั่วโมง (มิลลิกรัม)

W_0 = ปริมาณสารก่อนทำการสกัด (กรัม)

Copyright by Mahidol University

4. ความสามารถในการรับแรงอัด (Compressive Strength) การทดสอบกำลังรับแรงอัดสามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะ คือ ทดสอบกำลังอัดแบบปิดกั้น (Confined Compressive strength) และ ทดสอบกำลังอัดแบบไม่ปิดกั้น (Unconfine Compressive strength) โดยทั่วไปจะนิยมใช้การทดสอบแบบไม่ปิดกั้นมากกว่า ยกเว้นถ้าวัสดุตัวอย่างมีลักษณะของการวิบัติแบบพลาสติก สำหรับค่าของกำลังรับแรงอัดจะต้องพิจารณาให้อยู่ในเกณฑ์ของการใช้งานตามวัตถุประสงค์ต่างๆ

นอกจากนี้ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ยังได้ออกประกาศ ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว กำหนดให้สิ่งปฏิกูลที่นำมาทำเป็นก้อนหล่อแข็งจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความสามารถรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย

2. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

3. มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachant extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ก่อนนำไปฝังกลบ

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้จะพิจารณาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก เฉพาะความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็ง และปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) ตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ยังได้ออกประกาศ ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว กำหนดให้สิ่งปฏิกูลที่นำมาทำเป็นก้อนหล่อแข็ง เท่านั้น ส่วนความสามารถรับแรงอัด จะใช้ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2

Copyright by Mahidol University

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bensted and Verna (1973)(42) พบว่า ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิด Calcium Sulphoaluminates (Ettringite) และจะถูกเปลี่ยนเป็น monosulphate อิออนของโลหะบางชนิด ได้แก่ Fe^{3+}, Mn^{3+}, Cr^{3+} และ Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ Al^{3+} ion ทันที่ใน Ettringite และ Monosulphate

Phontong Sujiwatthana (10) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อการหล่อแข็งของเสียอันตรายโดยใช้ Cement-silica based Technique ของเสียอันตรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย Cadmium (Cd) ,Lead (Pb) ,Aldrin (AD) และ Chlordane องค์ประกอบที่ศึกษาประกอบด้วย จำนวนการเพิ่มของของเสียอันตราย ,Water/Cement Ratio ,อัตราส่วนพื้นที่ผิว / ปริมาตรก้อน (Surface area/Volumn Ratio) , pH ของน้ำที่ใช้สกัด และระยะเวลาในการบ่มชื้น จากการศึกษาพบว่า

1. ปริมาณของเสียอันตรายที่รั่วไหล จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของเสียที่ใช้ในการหล่อแข็ง
2. กำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันกับปริมาณของเสียในส่วนผสม
3. การเพิ่มของ อัตราส่วน พื้นที่ผิว/ปริมาตรก้อน (Surface area/Volumn Ratio) ของแท่งหล่อแข็ง จะแปรผกผันกับค่า pH ของสารที่ใช้ในการสกัด และระยะเวลาในการบ่มชื้น
4. ความสามารถในการชะละลายจะแปรตาม อัตราส่วน พื้นที่ผิว/ปริมาตรก้อน (Surface area / volumn ratio)
5. ระยะเวลาการในการบ่มชื้นจะไม่มีผลต่อปริมาณการรั่วไหล
6. ค่า Water/Cement Ratio ที่ค่า 0.5 จะมีปริมาณการรั่วไหลของเสียจากการหล่อแข็งได้น้อย และมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดี
7. การหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์และทราย เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรของเสียที่เป็นโลหะ มากกว่าของเสียที่เป็นสารอินทรีย์

Bishop (20) ได้ทำการศึกษากลไกของการยึดโลหะหนัก ของการหล่อแข็งด้วยปูน-ซีเมนต์ โดยโลหะที่นำมาศึกษา ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว จากการศึกษาสามารถหาความจุบัฟเฟอร์ของของเสียที่ผ่านการหล่อเป็นก้อนหล่อแข็งได้ 18.3 มิลลิสมมูล/กรัม โดยสรุปกลไกการจับยึดได้ดังนี้

1. แคดเมียมจะอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ที่แทรกตัวอยู่ตามรูพรุน หรือช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็ง

Copyright by Mahidol University

2. โครเมียม และตะกั่ว จะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับซิลิกา

Shin , Her และ Koo (43) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัย 4 ปัจจัย ที่มีผลต่อการหล่อเป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ได้แก่ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณกากของเสีย และประมาณสารเร่งการตกตะกอน (Precipitator) โดยในการศึกษาได้ทำการหล่อแข็งกากของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะที่มีสังกะสี โครเมียม และเฮกเซน ปนเปื้อนอยู่ ได้ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสังกะสีและโครเมียมในน้ำสกัดลดลง เมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูน-ซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสารเร่งการตกตะกอน (Precipitator)

2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะบ่ม 14 วัน เพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และลดปริมาณกากของเสีย

3. จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA พบว่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัด

4. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อแข็งกากของเสียแห้งหนัก 30 กรัม ที่ประมวลได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณสารเร่งการตกตะกอน (Precipitator) เท่ากับ 1, 1.5, 1.075 กรัม ตามลำดับ

Nawal Jaggi (44) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อการหล่อแข็งของเสียอันตรายโดยใช้ Cement-silica based Technique โดยใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ (PRHAC) และ Cement kiln dust (CKD) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มาทำการหล่อแข็งกากของเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะ และอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ซึ่งมี Cadmium (Cd) , Lead (Pb) เป็นส่วนประกอบอยู่ และกากของเสียจากอุตสาหกรรมพลาสติก ที่มี Aldrin เป็น Toxic organic เป็นส่วนประกอบอยู่องค์ประกอบที่ศึกษาประกอบด้วย จำนวนการเพิ่มของของเสียอันตราย Water/Cement ratio อัตราส่วน พื้นที่ผิว/ปริมาตรก้อน (Surface area/Volumn Ratio) pH ของน้ำที่ใช้สกัด และระยะเวลาในการบ่มชื้น จากการศึกษาพบว่า

1. การเพิ่มของการรั่วไหลจะเป็นฟังก์ชั่นกับจำนวนของเสีย อัตราส่วน พื้นที่ผิว/ปริมาตรก้อนหล่อแข็ง (Surface area/Volumn Ratio) จะแปรผกผันกับค่า pH ของสารที่ใช้สกัด

Copyright by Mahidol University

2. กำลังอัดจะแปรผกผันกับปริมาณของเสีย

3. Water/Cement Ratio ที่ค่า 0.5 จะเหมาะสมสำหรับสารอนินทรีย์ และที่ค่า 0.35 จะเหมาะสมกับสารอินทรีย์

4. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ (PRHAC) สามารถยึดตรึงของเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะได้ดี และสามารถจับยึด Lead (Pb) จากอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ได้ดี

5. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) สามารถกักเก็บ Cadmium ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. Cement kiln dust (CKD) เมื่อนำมาหล่อแข็งสาร pesticide จะทำให้การรั่วไหลของสารออกมาได้น้อย

Chang Chine Lung (45) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งโลหะหนักด้วยวิธี Cement-based Techniques โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อหล่อแข็งโลหะหนักที่ประกอบไปด้วย Cr, Cu และ Hg จากการศึกษาพบว่า Cr ที่ถูกหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบมาการรั่วไหลสูงกว่าที่ถูกหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วน Cu และ Hg ที่ถูกหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีปริมาณการรั่วไหลสูงกว่าที่ถูกหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ

Shanbhu Prasad Rijial (17) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งโลหะหนักด้วยวิธี Cement-based Techniques เพื่อหล่อแข็งน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ Asian Institute of Technology ที่มีโลหะหนักประกอบไปด้วย Cr และ Zn ปนเปื้อนอยู่ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบในอัตราส่วน 1 : 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน นำมาผสมเป็นมอร์ต้าในอัตราส่วน วัสดุเชื่อมประสาน : ทราย เท่ากับ 1 : 2 กำหนดค่า Water/Cement Ratio สำหรับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 0.5 และสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ เท่ากับ 0.65 จากการศึกษาได้ผลดังนี้

1. ค่าความสามารถรับกำลังอัดจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน และความสามารถในการรับกำลังอัดเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ

2. การรั่วไหลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน ที่ปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน น้อยกว่า 2 การรั่วไหลของ Cr ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะน้อยกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ แต่เมื่อปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน

Copyright by Mahidol University

มากกว่า 0.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ จะสามารถจะมีปริมาณการรั่วไหลของ Cr น้อยกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วน Zn สามารถยึดตรึงได้ดีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3. ค่าปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมสำหรับการผสมเป็นมอร์ต้าเท่ากับ 0.5

Jong Ho Youn (46) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งโลหะหนักด้วยวิธี Cement-based Techniques เพื่อหล่อแข็งน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ Asian Institute of Technology ที่อยู่ในรูปของเสีย COD ที่มีโลหะหนักประกอบไปด้วย Cr, Hg, Zn และ Pb ปนเปื้อนอยู่ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน นำมาผสมเป็นมอร์ต้าในอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสาน : ทราย เท่ากับ 1 : 2 กำหนดค่า Water/Cement Ratio สำหรับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 0.5 และสำหรับปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบ เท่ากับ 0.9 จากการศึกษาพบว่า

1. ปริมาณการรั่วไหลของสารเป็นสัดส่วนกับปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสานและแปรผกผันกับระยะเวลาในการบ่ม

2. ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะดีกว่าปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบ

3. ก้อนหล่อแข็งด้วยปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบ มีความสามารถในการตรึงสาร ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Shin และคณะ (47) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement –Based Techniques โดยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำการหล่อแข็งโลหะหนักสังเคราะห์ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม และไฮดรอกไซด์ของโลหะทั้ง 3 ผสมรวมกัน ทำการทดสอบการชะละลายด้วยตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด 3 ชนิด คือ น้ำทะเล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด และน้ำกลั่น จากการศึกษาพบว่าชนิดของสารสกัดมีผลโดยตรงต่อค่า pH และปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด การเติมเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่า pH สุดท้ายของน้ำสกัดลดลง และเป็นการเพิ่มปริมาณโลหะที่ถูกชะละลายออกมา จากการทดสอบการชะละลายทางจลน์ศาสตร์ (Dynamic leaching test) ในช่วงระยะเวลา 50 วัน พบว่า เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย จะมีปริมาณแคดเมียมถูกชะละลายออกมาเล็กน้อย สำหรับโครเมียมจะถูกชะละลายออกมาได้น้อยกว่าแคดเมียมและตะกั่ว และตรวจไม่พบยกเว้นที่เวลาเริ่มต้น สำหรับตะกั่วจะถูกชะละลายออกมาน้อยลงเมื่อระยะเวลานานขึ้น ก้อนตัวอย่างจะมีน้ำหนักลดลงเมื่อระยะเวลานานขึ้น เนื่องจากเกิดการละลายของ

Copyright by Mahidol University

ปูนขาวและโลหะหนัก และเมื่อใช้น้ำทะเลเป็นตัวทำละลาย พบว่าในสภาวะที่เป็นด่างของน้ำทะเล โลหะหนักที่ละลายจะเกิดการตกผลึกขึ้นอีก และก้อนตัวอย่างที่มีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน จะมีคุณสมบัติทนทานต่อน้ำทะเลได้ดีกว่า

Cheng และ Bishop (48) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิค ที่ถูกนำมาหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ ผลจากการศึกษาด้วย SEM , EDX และ Wet digestion/AA พบว่าที่บริเวณผิวของก้อนหล่อแข็งมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยเกิดจากกรดอะซิติกที่ใช้ทำละลาย ซึ่งแคลเซียมส่วนใหญ่จะถูกชะละลายในขณะที่ซิลิกอน เหล็กและอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ที่ผิว ซึ่งสารที่เหลืออยู่นี้มีคุณสมบัติดูดซับ ดูดซึมและป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้ ทำให้สรุปได้ว่า การชะละลายของโลหะหนักจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของก้อนหล่อแข็งเท่านั้น

Cheng และ Bishop (49) ได้ทำการศึกษาถึงการดูดซับ (Sorption) โลหะอิออน ได้แก่ Pb^{2+} , As^{3+} , Cd^{2+} และ Ca^{2+} ของซิลิก้าออกไซด์ (SiO_2) ในก้อนหล่อแข็งโลหะด้วยซีเมนต์ พบว่า Pb^{2+} ,และ As^{3+} จะเริ่มดูดซับในช่วง pH 5-6.5 ส่วน Cd^{2+} จะเริ่มดูดซับในช่วง pH 6-8.5 และ Ca^{2+} จะเริ่มดูดซับในช่วง pH 8-12 และยังพบอีกว่า 100% ของแคลเซียม, 90 % ของแคดเมียม, 70% ของตะกั่วและ 60% ของอาซีนิก จะไม่ดูดซับและถูกชะละลายที่ pH 5 ดังนั้น หากก้อนหล่อแข็งด้วยซีเมนต์มี pH มากกว่า 9 โลหะอิออนจะสามารถดูดซับอยู่ภายในก้อนหล่อแข็งได้

Khomgrit Leangon (15) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement –Based Techniques โดยทำการหล่อแข็งตะกอนของเสียอันตรายจากโรงงานฟอกหนัง ที่มีโครเมียม และสารอินทรีย์ ประกอบอยู่ และของเสียจากอุตสาหกรรมอิเลคโทรนิกส์ ที่มี ทองแดง ตะกั่ว และดีบุก ประกอบอยู่ มาทำการหล่อแข็งโดยใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ปูนขาว(LM) ขี้เถ้าแกลบ(RHA) เถ้าลอย (FA) และซิลิก้าฟูม (SF) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากการศึกษาพบค่ามีเหมาะสมดังนี้

1. ตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมประกอบไปด้วย ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ และ เถ้าลอย ที่ผสมเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ในอัตราส่วน OPC : RHA : FA เท่ากับ 0.7 : 0.2 : 0.1 โดยมีค่า ปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.6

2. ตะกอนจากอุตสาหกรรมอิเลคทรอนิกส์ วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมประกอบไปด้วย ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ และ เถ้าลอย ที่ผสมเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ในอัตราส่วน OPC : RHA : FA เท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 โดยมีค่า ปริมาณของเสียต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 1.37

Copyright by Mahidol University

วิชัย มาชูตระกูล (50) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement –Based Techniques โดยใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มาทำการหล่อแข็ง Cr (VI) และ Cr (III) ที่เป็นของเสียสังเคราะห์ จากการศึกษาพบว่า วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ ผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนของเสียในช่วง 2- 10 gCr/kg ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ ความต้านทานกำลังอัดจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนของเสีย มากกว่า 10 gCr/kg ความต้านทานกำลังอัดจะลดลง เมื่อนำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบที่หล่อแข็งแข็ง Cr (VI) และ Cr (III) มาทดสอบการรั่วไหลด้วยวิธี Extraction procedures toxicity (EP tox.) , สารละลายซัลเฟต 60 ppb และสารละลายไบคาร์บอเนต 400 ppb มีการรั่วไหลไม่เกิน 5.0 mg/l

ประทีป เลียงเพ็ชร (51) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement –Based Techniques มาทำการหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่ว โดยใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากการศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ 70% ที่มีค่าอัตราส่วน น้ำ/วัสดุเชื่อมประสาน (Water/Binder Ratio) เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 1 : 2 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการตรึงกากตะกอนตะกั่ว

ชูชัย เทียวประสงค์ (52) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement –Based Techniques มาทำการหล่อแข็ง Cr (III) ที่เป็นของเสียสังเคราะห์ โดยใช้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ผสมเป็นมอร์ต้า ที่มีค่าอัตราส่วน น้ำ/วัสดุเชื่อมประสาน (Water/Binder Ratio) เท่ากับ 0.42 จากการศึกษาพบว่า ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย 35 % สามารถรับปริมาณโครเมียมสังเคราะห์ได้มากที่สุด 40 gCr/kg วัสดุเชื่อมประสาน โดยมีปริมาณการรั่วไหลที่ทดสอบด้วยวิธี EP. Tox. ไม่เกิน 0.05 ppm.

Hillier และคณะ (53) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักและสารพิษจากก้อนคอนกรีตมอร์ต้า ในระยะเวลานาน โดยวิธีการทดสอบการชะละลายที่เรียกว่า “Diffusion” พบว่าหลังจากทำการชะละลายเป็นเวลา 256 วัน มีเพียง วาเนเดียม (Vanadium) เท่านั้นที่สามารถตรวจพบในปริมาณที่มีนัยยะ ส่วนโลหะและสารพิษชนิดอื่นไม่สามารถตรวจพบได้ และการชะละลายจะเป็นเพียงแค่บริเวณผิวของก้อนคอนกรีตเท่านั้น

Copyright by Mahidol University

บรุฉัตร ฉัตรวีระ และ พีรชล สุภัททธรรม (54) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าผสมขี้เถ้าแกลบ ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบออโตจีเนียส และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด โดยมีตัวแปรในการทดลอง คือ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผง (0.4, 0.5 และ 0.6) และร้อยละการแทนที่ขี้เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50) ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าผสมขี้เถ้าแกลบร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด

2. เมื่อร้อยละการแทนที่ขี้เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ความสามารถต้านทานสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด การหดตัวแบบออโตจีเนียส การหดตัวแบบแห้ง และความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเพิ่มขึ้นด้วย

ปริญญา จินดาประเสริฐ , สมศักดิ์ เมตะนันท์ , สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี , ธีรวัฒน์ สินศิริ (55) ได้ทำการศึกษาคอนกรีตบดอัดที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าแกลบดำ โดยใช้การทดสอบการบดอัดด้วยวิธีโมดิฟายด์ พรอคเตอร์ (Modified Proctor) ผลการทดสอบพบว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัดขึ้นอยู่กับความสามารถในการบดอัดของส่วนผสม และขนาดคละของมวลรวม และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบดอัดขึ้นอยู่กับ การบดอัดและการทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารซีเมนต์ ทั้งเถ้าลอยและแกลบดำสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการผสมทำคอนกรีตบดอัดได้

Copyright by Mahidol University

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุในการวิจัย

3.1.1 วัสดุเชื่อมประสาน และวัสดุผสม

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ผลิตโดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด
2. ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาด้วยเตาเผาอุตสาหกรรมเผาอิฐ มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน แล้วนำมาผ่านเครื่องบดแบบหมุน ใช้โลหะบดเป็นเหล็กละมุนทำการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้มีความละเอียดผ่านตะแกรง No.325 มากกว่า 90 %
3. หินฝุ่น จากโรงโม่หิน บริษัท ศิลาสานนท์ จำกัด ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ทำการชะล้างด้วยการรดน้ำแล้วตากให้แห้ง นำมาใช้งานโดยไม่มีการคัดขนาด
4. ใช้น้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยรังสิต
5. ตะกอนโครเมียม หมายถึง ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน ของบริษัท ไดซิน จำกัด สาขาจังหวัดนครราชสีมา

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

1. กรดไนตริกเข้มข้น
2. น้ำกลั่น pH 5.8-6.3
3. กรดอะซิติกเข้มข้น
4. โครเมียมไตรออกไซด์ (CrO_3)
5. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก และองค์ประกอบของวัสดุ

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น Spectr AA 220

Copyright by Mahidol University

2. Vacuum Pump & Vacuum Flask

3. กระดาษกรองใยแก้วขนาดรู 0.6-0.8 ไมครอน

3.2.2 เครื่องมือสำหรับการบดขี้เถ้าแกลบ

1. เครื่องบดขี้เถ้าแกลบ ห้องปฏิบัติการโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเซีย (AIT)

2. ตะแกรงร่อนเปียก (Wet Sieve) ขนาดตะแกรง No. 325

3. เครื่องชั่งน้ำหนักขนาด 1000 กรัม ความละเอียด 0.1 กรัม

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการอัดซีเมนต์มอร์ต้าเป็นบล็อกคอนกรีต และทดสอบกำลังรับแรงอัด

1. เครื่องชั่งน้ำหนักขนาด 5000 กรัม ความละเอียด 0.5 กรัม

2. เครื่องชั่งน้ำหนักขนาด 1000 กรัม ความละเอียด 0.1 กรัม

3. เครื่องซินวาแรมสำหรับอัดบล็อก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง ขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร ผลิตและจำหน่าย โดย บริษัท เค. ไทย คอนวัลแตนท์ แอนด์ แมชชีนเนอรี่ จำกัด

4. เครื่องผสมมอร์ต้าขนาดความจุ 10 ลิตร

5. กระบอกตวงขนาดความจุ 2 ลิตร

6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาด 100 ตัน ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UH-100A

7. ตู้อบ (Drying Oven)

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการสกัดของโลหะหนัก

1. เครื่องเขย่าแบบ Rotary อัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ห้องปฏิบัติการ-สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

2. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 3/8 นิ้ว

3. ขวดแก้วขนาดความจุ 2 ลิตร

4. เครื่องชั่งขนาด 500 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม

5. Volumetric Flask 1000 มิลลิลิตร

6. Vacuum Pump & Vacuum Flask

7. กระดาษกรองใยแก้วขนาดรู 0.6-0.8 ไมครอน

8. เครื่องวัด pH (pH meter) ยี่ห้อ Hach รุ่น EC 30

9. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น Spectr AA 220

Copyright by Mahidol University

3.3 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยการทดลองทั้งสิ้น 9 การทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม

<u>วิธีการทดลอง</u> นำตะกอนโครเมียม ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาดำเนินการย่อย (Digestion) ตามวิธี Standard Method (APHA-AWWA-WPCF) สำหรับการย่อยตะกอนเพื่อการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Cr) หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปทำการวิเคราะห์หาประมาณโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) จะทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมต่อปริมาณตะกอนโครเมียมแห้ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) ข้อมูลส่วนนี้จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

<u>จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์</u> ทำการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม จำนวน 6 ตัวอย่างโดยการสุ่มจากตัวอย่างคละ ผลของปริมาณโครเมียมจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของปริมาณโครเมียมต่อปริมาณตะกอนโครเมียมแห้ง

3.3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม ด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

<u>วิธีการทดลอง</u> นำตะกอนโครเมียมอบแห้ง (เป็นตัวอย่างเดียวกับการทดลองที่ 1) คัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาสกัดด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ดังรายละเอียดขั้นตอน และวิธีการสกัด ในบทที่ 2 หน้า 45 หลังจากนั้นนำน้ำสกัดไปทำการวิเคราะห์หาประมาณโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) จะทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากตะกอนโครเมียมอบแห้ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ผลจากการทดลองที่ 2 สามารถคำนวณหาความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม ดังสมการที่ 3.1

Copyright by Mahidol University

สูตรในการคำนวณความสามารถในการชะละลาย

$L = W_1 / W_2$ ..... (3.1)

L = ความสามารถในการชะละลาย (Leachability : mg/g)

W_1 = ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg)

W_2 = ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในตะกอนโครเมียมก่อนการสกัด (g)

โดยปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากตะกอนโครเมียม มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) สามารถคำนวณหาปริมาณโครเมียมที่มีอยู่ในน้ำสกัดทั้งหมด เป็นค่า W_1 และปริมาณโครเมียมที่มีในตะกอนโครเมียมทั้งหมดก่อนการสกัดคำนวณมาจากปริมาณตะกอนโครเมียมที่ใช้ในการสกัด กับปริมาณโครเมียมต่อปริมาณตะกอนโครเมียม (mg/g) จากการทดลองที่ 1 เป็นค่า W_2 ค่าความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียมที่คำนวณได้ จะนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพในการชะละลายจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกต่อไป

ตัวอย่างการคำนวณ ความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม

- ในการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ใช้ตะกอนโครเมียมหนัก 100 กรัม จะต้องใช้น้ำสกัดมีปริมาณ 20 เท่า คือเท่ากับ 2 ลิตร หากมีปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมอยู่ 10 mg/g หากทำการสกัดโดยมีตะกอนโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 100 กรัม จะมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดก่อนการสกัดเท่ากับ 1000 mg หรือ 1 กรัม (เป็นค่า W_2)
- ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 5 mg/l แต่น้ำสกัดเริ่มต้นมีปริมาณเท่ากับ 2 ลิตร ดังนั้นจึงมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัดเท่ากับ 10 mg (เป็นค่า W_1)
- ดังนั้น ความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม มีค่าเท่ากับ 10 mg/g

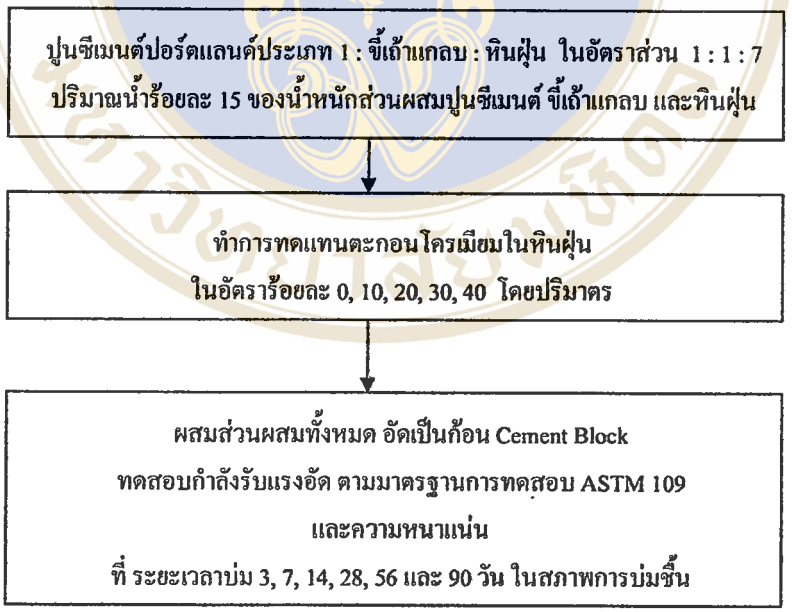
<u>จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์</u> ทำการสกัดโครเมียมจากตะกอนโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) จำนวน 6 ตัวอย่างโดยการสุ่มตะกอนโครเมียม ใช้ค่าเฉลี่ยของปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด เป็นตัวแทนของปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากตะกอนโครเมียม

Copyright by Mahidol University

3.3.3 การทดลองที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

<u>วิธีการทดลอง</u> ทำคำนวณส่วนผสม ระหว่าง ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 ปริมาณน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักรวมของปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น และใช้ปริมาณน้ำคงที่ทุกๆ อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ซึ่งจะทำการทดแทนอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

ทำการผสมส่วนผสมที่คำนวณได้ทั้งหมดด้วยเครื่องผสม นำส่วนผสมที่ได้มาอัดเป็นคอนกรีตบล็อกขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องซินวา-แรม แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างที่ได้จากอัตราส่วนผสมต่างๆ มาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 109 และค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ในสภาพการบ่มชื้น ดังรายละเอียดแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดลองที่ 3

Copyright by Mahidol University

วิธีการอัดคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

1. ชั่งน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ หินฝุ่น และตะกอนโครเมียม ตามน้ำหนักที่คำนวณไว้เตรียมไว้เพื่อใส่ในหม้อผสม

2. ตวงน้ำตามอัตราส่วนน้ำต่อของผสม ของแต่ละอัตราส่วน

3. แล้วเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ ประมาณ 140 +/- 5 รอบ ต่อ นาที เมื่อของผสมเข้ากันได้ดีแล้ว จึงแล้วค่อยๆ ใส่น้ำ รอจนของผสมกับน้ำเข้ากันเป็นเนื้อเดียว จึงปรับความเร็วเครื่องผสมเป็นความเร็วปานกลาง ประมาณ 285 +/- 10 รอบ ต่อ นาที ให้เดินเครื่องผสมในความเร็วนี้ประมาณ 30 วินาที

4. หลังจากนั้นให้ทำการปิดเครื่องผสม แล้วปาดของผสมที่ติดอยู่ข้างหม้อผสมให้รวมกันภายในเวลา 15 วินาที แล้วปิดฝาหม้อผสมไว้อีกเป็นเวลา 1 นาที 15 วินาที

5. เปิดเครื่องผสมอีกครั้งที่ระดับความเร็วปานกลาง อีกเป็นเวลา 1 นาที แล้วปิดเครื่องผสม นำของผสมออกมาเตรียมใส่ในแบบอัดคอนกรีตบล็อก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง

6. นำของผสมที่ได้มาใส่ในช่องแบบ ในเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก แบบอินเตอร์-ล็อกกิ้ง โดยระวังไม่ให้มีการตกหล่น แล้วทำการอัดโดยดึงคันโยกจนสุด

7. ก้อนคอนกรีตบล็อกที่ได้ จะถูกยกนำออกไปผึ่งแดด 1 วัน หลังจากนั้นจึงนำไปบ่มชื้นต่อไป

ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ - ล็อกกิ้งบล็อก ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน จะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และหาค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็ง โดยคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด และค่าความหนาแน่น ได้ดังนี้

การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

กำลังรับแรงอัด (ksc) = ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (kg) / พื้นที่หน้าตัด (sq.cm) ..... (3.2)

การคำนวณค่าความหนาแน่น คำนวณได้จากสมการที่ 3.3

ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง = น้ำหนักก้อนตัวอย่าง / ปริมาตรก้อนตัวอย่าง ..... (3.3)

Copyright by Mahidol University

จำนวนตัวอย่างในการทดลองที่ 3

การทดสอบกำลังรับแรงอัดรวมจำนวนทั้งสิ้น (6x6x5) = 180 ตัวอย่าง

- อัตราส่วนการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร รวมทั้งสิ้น 5 อัตราส่วนผสม
- ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน อัตราส่วนผสมละ 6 ตัวอย่าง

3.3.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

วิธีการทดลอง นำก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ซึ่งผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้ว มาทำการบดและคัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำมาสกัดด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) หลังจากนั้นนำน้ำสกัดไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ผลจากการทดลองทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งจะใช้เพื่อการพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ต่อไป

จากปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) สามารถนำมาคำนวณความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ด้วยสมการที่ 3.1 เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 โดยทำการหาความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน เพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในลดการชะละลายจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกต่อไป

Copyright by Mahidol University

3.3.5 การทดลองที่ 5 การเปรียบเทียบการสกัดด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) กับวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ในการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

<u>วิธีการทดลอง</u> นำก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกโดยการทดแทนหินฝุ่นโดยปริมาตร ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 90 วัน มาทำการบดและคัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำมาสกัดด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และวิธีสกัด Extraction Procedure Toxicity Test Method (EP Toxicity) ของตัวอย่างทุกอัตราส่วนผสม หลังจากนั้นนำน้ำสกัดไปทำการวิเคราะห์หาประมาณโครเมียม ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ผลจากการทดลองทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) จากการสกัดก้อนหล่อแข็งที่อยู่ในสภาวะเดียวกัน ทำให้สามารถพิจารณาเปรียบเทียบการสกัดด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) กับวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ได้

3.3.6 การทดลองที่ 6 การเตรียมโครเมียม (III) สังเคราะห์

<u>วิธีการทดลอง</u> การตกตะกอนโครเมียมจะทำการใช้สารตั้งต้นได้แก่ โครเมียมไตรออกไซด์ (CrO_3) มาทำการตกตะกอนให้ได้เป็น Cr^{3+} โดยในขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำให้ Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+}

วิธีรีดักชั่นทางเคมีสามารถทำให้ Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+} ได้ภายในเวลาไม่เกิน 30 นาที ที่ pH ประมาณ 2 สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ SO_2, $FeSO_4$, Sodium busulfite ($NaHSO_3$) และ Sodium metabisulfite ($Na_2S_2O_5$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$2CrO_3 + 6FeSO_4.7H\ O + 6H_2SO_3 \text{----------} > Cr_2(SO_4)_3 + 3Fe_2(SO_4)_3 + Cr_2(SO_4)_3 + 13H_2O$$

$$4CrO_3 + 6NaHSO_3 + 3H_2SO_3 \text{----------} > 2Cr_2(SO_4) + 3Na_2SO_4 + 6H_2O$$

$$SO_2 + H_2O \text{----------} > H_2SO_3$$

$$2CrO_3 + 3H_2SO_3 \text{----------} > Cr_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

Copyright by Mahidol University

ขั้นตอนที่ 2 ทำให้ Cr^{3+} ตกตะกอนในรูปของ $Cr(OH)_3$

โครเมียมที่อยู่ในรูป Cr^{3+} แล้วสามารถตกตะกอนในรูปของ $Cr(OH)_3$ ได้ จึงต้องมีการเติมด่างเช่นโซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว ($Ca(OH)_2$) เพื่อปรับให้ได้ค่า pH ประมาณ 8-9 ซึ่งเป็นช่วงที่โครเมียมละลายน้ำได้น้อยที่สุด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้

$$Cr_2(SO_4)_3 + 6NaOH \text{ ----------> } 2Cr(OH)_3 + 3Na_2SO_4$$

$$Cr_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \text{ ----------> } 2Cr(OH)_3 + 3CaSO_4$$

จากปฏิกิริยาการตกตะกอนข้างต้นได้มีการสรุปปริมาณสารเคมีที่ต้องนำมาใช้เพื่อทำการตกตะกอนจากสารตั้งต้นที่ปริมาณโครเมียม Cr^{6+} 1 มิลลิกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการตกตะกอนโครเมียม (Cr^{6+}) 1 มิลลิกรัม (ตามทฤษฎี)

สารเคมี	ปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎี (mg/l)
$FeSO_4.7H_2O$	16.03
H_2SO_3	6.01
Lime (90%)	9.48
$Na_2S_2O_5$ (97.5%)	2.81
H_2SO_3	1.52
Lime (90%)	2.38
$NaHSO_3$	3.00
H_2SO_3	1.41
Lime (90%)	2.38

หมายเหตุ ข้อมูลในตารางมาจากการสมดุลสมการการรีดักชั่นทางเคมีสามารถทำให้ Cr^{6+} กลายเป็น Cr^{3+} แล้วทำให้ตกตะกอน ตามทฤษฎี

ในการวิจัยในครั้งนี้จะใช้โครเมียมไตรออกไซด์ที่มี Cr^{6+} เป็นองค์ประกอบ มาทำการตกตะกอนเป็นตะกอน Cr^{3+} ซึ่งจากตารางที่ 3.1 หากใช้ โครเมียมไตรออกไซด์ 500 กรัม ซึ่ง

Copyright by Mahidol University

มี Cr^{6+} อยู่ 260 กรัม จะต้องใช้ $FeSO_4.7H_2O$ จำนวน 4167.8 กรัม และใช้ H_2SO_3 เข้มข้น จำนวน 1562.6 กรัม

นำสารละลายที่ได้ทิ้งให้โครเมียมตกตะกอน แล้วจึงรินน้ำใสทิ้ง นำกากตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วจัดเก็บไว้ในภาชนะป้องกันความชื้น

3.3.7 การทดลองที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์

<u>วิธีการทดลอง</u> นำโครเมียมสังเคราะห์ ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาดำเนินการย่อย (Digestion) ตามวิธี Standard Method (APHA-AWWA-WPCF) สำหรับการย่อยตะกอนสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Cr) หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปทำการวิเคราะห์หาประมาณโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) จะทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมต่อปริมาณโครเมียมสังเคราะห์แห้ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) ข้อมูลส่วนนี้จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

<u>จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์</u> ทำการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์ จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยการสุ่มจากตัวอย่างคละ ผลของปริมาณโครเมียมจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์

3.3.8 การทดลองที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียมโดยปริมาตรที่เหมาะสม โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

<u>วิธีการทดลอง</u> นำอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม ซึ่งสรุปได้จากการทดลองที่ 3 และ 4 นำมาทำการคำนวณส่วนผสมให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม โดยการทดแทนด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60 80 และ 100 โดยปริมาตร

ทำการผสมส่วนผสมที่คำนวณได้ทั้งหมดด้วยเครื่องผสม นำส่วนผสมที่ได้มาอัดเป็นคอนกรีตบล็อกขนาดสูง 9 เซนติเมตร กว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่อง

Copyright by Mahidol University

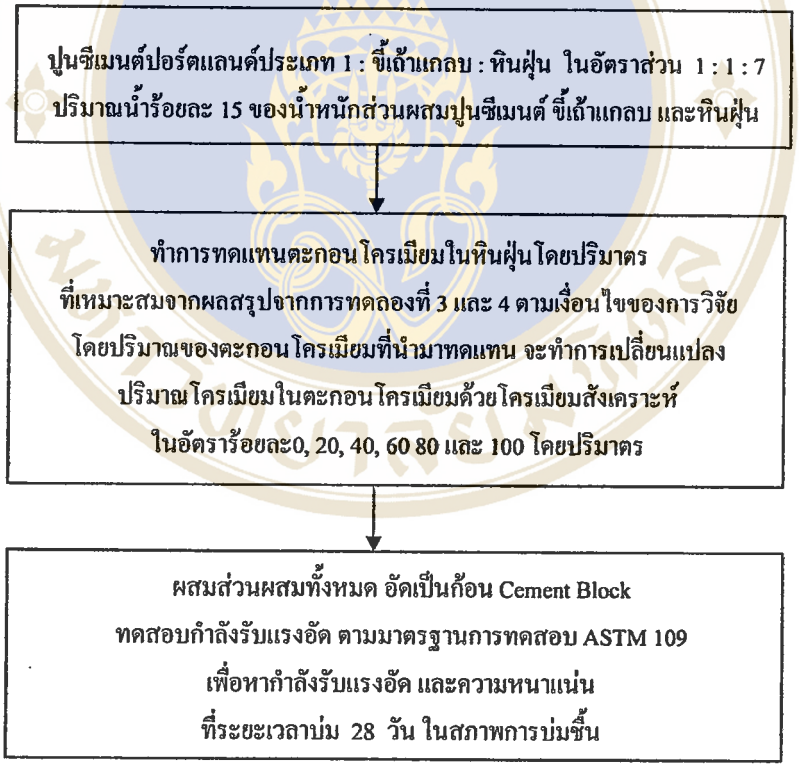
ซินวาแรม แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างที่ได้จากอัตราส่วนผสมต่างๆ มาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM 109 และค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ในสภาพการบ่มชื้น ดังรายละเอียดแสดงในภาพที่ 3.2

จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์

การทดสอบกำลังรับแรงอัด จำนวนทั้งสิ้น (6x1x2) = 12 ตัวอย่าง

อัตราส่วนในทดแทนโครเมียมสังเคราะห์ในตะกอนโครเมียม ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60 80 และ 100 โดยปริมาตร รวมทั้งสิ้น 6 อัตราส่วนผสม

- ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 28 วัน อัตราส่วนผสมละ 2 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดลองที่ 8

Copyright by Mahidol University

วิธีการอัดคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 และหาค่ากำลังรับแรงอัด และค่าความหนาแน่น ได้จากสมการที่ 3.2 และ 3.3

3.3.9 การทดลองที่ 9 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียมโดยปริมาตรที่เหมาะสม โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

<u>วิธีการทดลอง</u> นำก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกจากการทดลองที่ 8 ซึ่งผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้วมาทำการบดและคัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร นำมาสกัดด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) หลังจากนั้นนำน้ำสกัดไปทำการวิเคราะห์หาประมาณโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ผลจากการทดลองทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หรือปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็ง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งจะใช้เพื่อการพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์และประมวลผล

3.4.1 จากผลการทดลองที่ 3 จะทำให้ทราบถึงกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการบ่มชื้นต่างกัน และผลจากการทดลองที่ 4 จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการบ่มชื้นต่างกัน

นำผลจากการทดลองทั้งสองมาทำการหาความสัมพันธ์ ระหว่างความสามารถในการชะละลายโครเมียมกับกำลังรับแรงอัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ใน

Copyright by Mahidol University

อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน และทำการวิเคราะห์และประมวลผลของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

3.4.2 จากผลการทดลองที่ 3 จะทำให้ทราบถึงกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการบ่มชื้นต่างกัน และผลจากการทดลองที่ 4 จะทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการบ่มชื้นต่างกัน นำมาพิจารณาเพื่อเลือกอัตราการทด-แทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่เหมาะสม ในการผสมสำหรับอัดคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยต้องมีปริมาณโลหะหนักในน้ำ-สกัดไม่เกินค่ามาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2

3.4.3 จากการทดลองที่ 4 นำค่าความสามารถในการชะละลายโครเมียมออกจากก้อน-หล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก เฉพาะผลจากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นที่เหมาะสม ในการผสมสำหรับอัดคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน โดยต้องมีปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดไม่เกินค่ามาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานกำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจากก้อน-หล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกดังสมการที่ 3.4 และมีขั้นตอนการคำนวณดังภาพที่ 3.3

สมการคำนวณหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

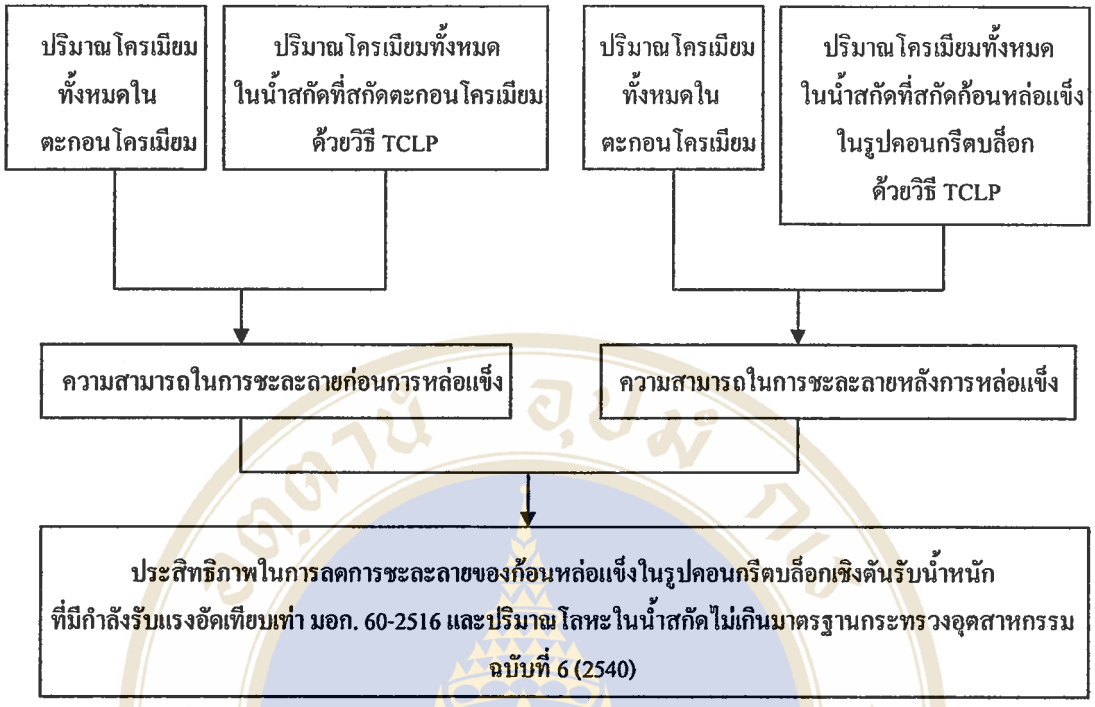
$$L_0 = [(L_1-L_2) / L_1] \times 100 \quad \text{..... (3.4)}$$

L_0 = ประสิทธิภาพในลดการชะละลาย (%)

L_1 = ความสามารถในการชะละลายก่อนการหล่อแข็ง

L_2 = ความสามารถในการชะละลายหลังการหล่อแข็ง

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนในการหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

3.4.4 ผลจากการทดลองที่ 8 จะทำให้ทราบถึงกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็ง ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่นำมาทดแทนหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม ที่ระยะเวลาการบ่มชื้นต่างกัน และผลจากการทดลองที่ 9 จะทำให้ทราบถึงปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมที่แตกต่างกันในตะกอนโครเมียมที่นำมาทดแทนหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม นำมาพิจารณาเพื่อเลือกปริมาณโครเมียมที่เหมาะสมในตะกอนโครเมียม ในการผสมสำหรับอัดคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 28 วัน โดยต้องมีปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดไม่เกินค่ามาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2

Copyright by Mahidol University

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม และปริมาณโครเมียมจากการชะละลายตะกอนโครเมียมด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ของบริษัท ไดชิน จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนที่มีกระบวนการชุบโครเมียม เป็นกระบวนการหนึ่งในการผลิต ทำให้ตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดมีโครเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ การหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในตะกอนโครเมียม โดยการนำตะกอนโครเมียมทั้งหมดที่สุ่มมาจากแหล่งเก็บตะกอนจากระบบบำบัดภายในโรงงานเพื่อรอการบำบัด มาทำการคละผสมกัน แล้วสุ่มตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง มาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการย่อย (Digestion) ตามวิธี Standard Method (APHA-AWWA-WPCF) นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ผลจากการทดลองได้ค่าปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 6.108 มิลลิกรัมต่อกรัมตะกอนแห้ง (mg/g dry sludge) ซึ่งมีผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลจากการวัดปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมี่ยม (mg/g dry sludge)
1	7.115
2	5.411
3	6.425
4	5.478
5	5.954
6	6.261
ค่าเฉลี่ย	6.108

Copyright by Mahidol University

ในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งประเด็นไปยังการบำบัดของเสียอันตราย ซึ่งตะกอนโครเมียมที่นำมาใช้ในการวิจัยจะต้องมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เกินกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามมาตรฐานปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด เพื่อตรวจสอบว่าเป็นของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

จากการทดสอบตะกอนโครเมียมที่นำมาใช้ในการวิจัย โดยการสกัดตะกอนโครเมียมด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) จำนวน 6 ตัวอย่าง (เป็นตัวอย่างเดียวกับตัวอย่างในการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม) ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสกัด ทำการย่อย (Digestion) ตามวิธี Standard Method (APHA-AWWA-WPCF) หลังจากนั้นนำของเหลวไปวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ทำการวัดในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเฉลี่ยจาก 6 ตัวอย่างได้เท่ากับ 8.693 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ทำให้ตะกอนโครเมียมที่นำมาใช้ในการวิจัยจัดอยู่ในกลุ่มของเสียอันตราย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด จากการสกัดตะกอนโครเมียม ด้วยวิธี TCLP

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมี่ยมในน้ำสกัด (mg/l)
1	7.760
2	7.955
3	11.160
4	11.450
5	7.085
6	6.745
ค่าเฉลี่ย	8.693

Copyright by Mahidol University

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

การบำบัดของเสียอันตรายในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้วิธีการหล่อแข็งให้เป็นก้อน ในรูปของคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ่งบล็อก (Interlocking Block) ที่กำหนดให้มีอัตราส่วนผสมคงที่เสมอ ในอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น เท่ากับ 1 : 1 : 7 น้ำในปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด โดยจะทำการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียม ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ดังนั้นในการคำนวณอัตราส่วนผสมเพื่ออัดเป็นคอนกรีตบล็อก จำเป็นต้องทราบ ค่าปริมาณความชื้น ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ของตะกอนโครเมียม และหินฝุ่น โดยค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) ที่คำนวณได้ด้วยสมการที่ 4.1

ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) = A / (A-C) ..... (4.1)

เมื่อ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (g)

C = น้ำหนักของวัสดุชั่งในน้ำ (g)

ตะกอนโครเมียมในการวิจัยครั้งนี้ มีลักษณะเป็น Cake สีน้ำตาลอ่อน มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH ; sludge : water = 1:10) เท่ากับ 7.5 โดยใช้ในการวิจัยในสภาพที่ชื้น ตามลักษณะเดียวกับตะกอนที่ได้จากระบบบำบัด ผลจากการวิจัยพบว่าตะกอนโครเมียม มีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 58.6 จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง จากตัวอย่างทั้งหมดที่ผสมรวมกันและคลุกเคล้าให้ทั่วถึง และมีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเฉลี่ยเท่ากับ 2.23 จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง จากตัวอย่างทั้งหมดที่ผสมรวมกันและคลุกเคล้าให้ทั่วถึง ดังข้อมูลที่ได้จากการทดลองในภาคผนวก หินฝุ่นที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้อยู่ในสภาพที่แห้ง ผลจากการวิจัยพบว่า หินฝุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.84 จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง ดังข้อมูลที่ได้จากการทดลองในภาคผนวก

จากคำนวณอัตราส่วนผสมเพื่ออัดเป็นคอนกรีตบล็อก ในปริมาณการผสมต่อการอัดคอนกรีตบล็อกจำนวน 1 ก้อน โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนผสมคงที่เสมอ ในอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ขี้เถ้าแกลบ หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 1 : 7 และน้ำในปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แล้วทำการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียม ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ได้อัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.3

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20,30 และ 40 โดยปริมาตร

อัตราทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่นโดยปริมาตร (%)	ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	น้ำหนักหินฝุ่น (g)	น้ำหนักตะกอน Cr (g)	ปริมาณความชื้นในตะกอน Cr หลังอบแห้ง (%)	น้ำหนักน้ำหักน้ำในตะกอน Cr (g)
0	250.0	250.0	1750.0	0.0	58.57	337.5
10	250.0	250.0	1575.0	137.5	58.57	257.0
20	250.0	250.0	1400.0	275.0	58.57	176.4
30	250.0	250.0	1225.0	412.5	58.57	95.9
40	250.0	250.0	1050.0	550.0	0.00	337.5

ทำการผสมตามอัตราส่วนผสมที่คำนวณไว้ ใส่ในแบบของเครื่องซิลวาแรม อัดเป็นคอนกรีตบล็อก จำนวนอัตราส่วนละ 40 ก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างทุกก้อนทำการบ่มชื้น โดยการคลุมด้วยกระสอบป่านและพรมน้ำให้ชื้นทุกวัน ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน นำก้อนตัวอย่างมาตากแดดจนแห้ง วัดขนาด และชั่งน้ำหนัก แล้วทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 109 และหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อน

ผลการทดลองกำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน พบว่าอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 0 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 84.7, 137.5, 152.4, 167.8, 205.4 และ 228.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2037.1, 2023.3, 2015.9, 2018.8, 2187.7 และ 2076.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดอายุการบ่มชื้นเท่ากับ 2059.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์ก-เมตร

Copyright by Mahidol University

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 78.0, 112.1, 124.9, 155.6, 180.7 และ 198.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2008.6, 1967.5, 1975.6, 1983.6, 1973.8 และ 1932.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดอายุการบ่มชื้นเท่ากับ 1973.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 45.0, 55.9, 87.7, 91.9, 144.8 และ 169.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1860.1, 1890.6, 1825.3, 1857.3, 1893.5 และ 1887.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดอายุการบ่มชื้นเท่ากับ 1869.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.)

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 30 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 40.9, 61.0, 71.1, 110.3, 153.3 และ 157.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1897.5, 1872.1, 1866.5, 1940.3, 1897.0 และ 1800.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดอายุการบ่มชื้นเท่ากับ 1878.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.)

และอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ40 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 20.0, 29.4, 61.4, 54.4, 56.3 และ 75.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1834.6, 1849.2, 1873.3, 1848.5 และ 1782.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดอายุการบ่มชื้นเท่ากับ 1819.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.)

สรุปผลการทดลองกำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

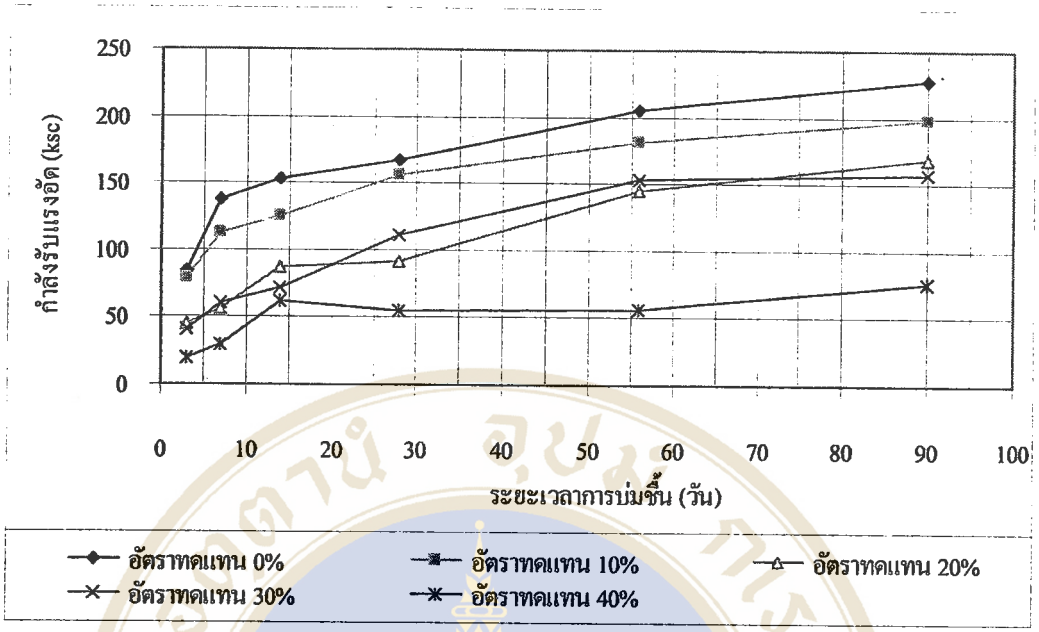
ระยะการบ่มชื้น	กำลังรับแรงอัด (ksc.) ของก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร				
(days)	0%	10%	20%	30%	40%
3	84.7	78.0	45.0	40.9	20.0
7	137.5	112.1	55.9	61.0	29.4
14	152.4	124.9	87.7	71.1	61.4
28	167.8	155.6	91.9	110.3	54.4
56	205.4	180.7	144.8	153.3	56.3
90	228.1	198.2	169.2	157.6	75.9

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ระยะการบ่มชื้น	ความหนาแน่น (kg./cu.m.) ของก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร				
(days)	0%	10%	20%	30%	40%
3	2037.1	2008.6	1860.1	1897.5	1834.6
7	2023.3	1967.5	1890.6	1872.1	1849.2
14	2015.9	1975.6	1825.3	1866.5	1873.3
28	2018.8	1983.6	1857.3	1940.3	1848.5
56	2187.7	1973.8	1893.5	1897.0	1782.7
90	2076.6	1932.9	1887.1	1800.1	1726.5

จากตารางที่ 4.4 สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.1

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง บล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

จากภาพที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก โดยภาพรวมจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของก้อนหล่อแข็งลดลง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 20 และ 30 โดยปริมาตร จะมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน แต่เมื่ออัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น เพิ่มเป็นร้อยละ 40 โดยปริมาตร ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก กับค่ากำลังค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 ที่กำหนดไว้เท่ากับ 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) พบว่าการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก โดยการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร มีค่าจุดวิกฤตอยู่ที่ อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 40 โดยปริมาตร

ก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยปริมาตร จะมีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน ในช่วง

Copyright by Mahidol University

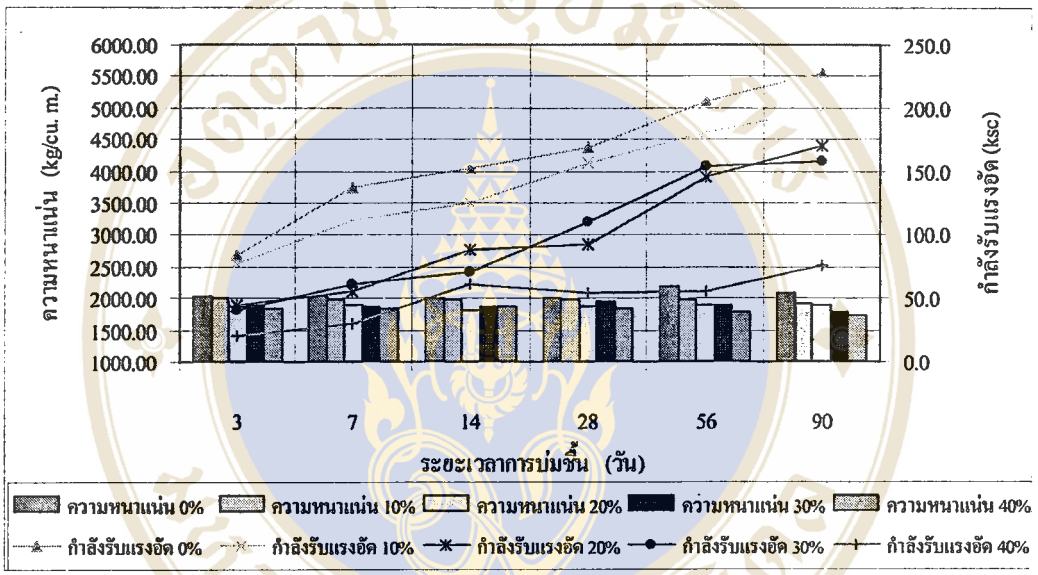
ระยะเวลาการบ่มชื้น 14 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นจะเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอย่างช้าๆ และที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 90 วัน ยังมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มชื้นเนื่องจากเมื่อผสมปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบกับน้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นก่อน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารอื่นๆ ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยในระยะแรกจะมีลักษณะเป็นวุ้น (gel)ที่ไม่แข็งตัว และเมื่อปฏิกิริยาสมบูรณ์ยิ่งขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม จะเข้าสู่ระยะแข็งตัวและจับยึดกันแข็งแรงขึ้น (22)(23)(24) หลังจากระยะเวลาผ่านไประยะหนึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ในขี้เถ้าแกลบ เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกต-ไฮเดรต, แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ สารประกอบที่เกิดจากทั้ง 2 ปฏิกิริยาจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างของก้อนหล่อแข็ง ทำหน้าที่ยึดประสานให้เกิดความแข็งแรงขึ้น ส่วนก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 40 โดยปริมาตร ในช่วงระยะเวลาการบ่มชื้น 14 วัน จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง ลักษณะดังกล่าวเกิดเนื่องจาก เมื่อมีการผสมตะกอนโครเมียมเพิ่มมากขึ้นในระดับหนึ่งในส่วนผสมของคอนกรีต จะทำให้สารประกอบในตะกอนโครเมียม ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ เข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น (12)(23)(24) ทำให้เกิดการบวมของก้อนหล่อแข็ง ซึ่งการบวมของก้อนหล่อแข็งนี้จะไม่มีผลในช่วงแรก เนื่องจากสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังมีลักษณะเป็นวุ้น (gel) แต่เมื่อผ่านเข้าสู่ระยะแข็งตัวการบวมจะส่งผลต่อการรับกำลังของก้อนหล่อแข็ง (12)(44)

การบวมของก้อนหล่อแข็งนอกจากจะเกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในตะกอนโครเมียมแล้ว ยังอาจเกิดเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในตะกอนซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ และสารประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้เกิดการบวมของก้อนส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด (12)(44) สำหรับตะกอนโครเมียมที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นตะกอนโครเมียมจากระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีกระบวนการรีดิวซ์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ด้วย SO_2, $FeSO_4$, Sodium bisulfite ($NaHSO_3$) หรือ Sodium metabisulfite ($Na_2S_2O_5$) หลังจากนั้นปรับค่าความเป็นกรดด่างเพื่อให้โครเมียมตกตะกอนด้วยการเติมด่างเช่นโซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้ตะกอนโครเมียมมีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบอยู่ (ดังสมการในหัวข้อ 3.3.6) เมื่อมีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นมากขึ้น จะทำให้ปริมาณซัลเฟตมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งเกิดการบวม

Copyright by Mahidol University

และทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร

จากตารางที่ 4.5 สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูป ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

จากภาพที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นกับระยะเวลาในการบ่มชื้นไม่มีความสัมพันธ์กัน ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นจะแปรผันตาม ปริมาตร และน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง รวมทั้งค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของวัสดุผสมต่างๆ

Copyright by Mahidol University

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของแต่ละอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อมีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่าความหนาแน่นจะคำนวณจากน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง และปริมาตรของก้อนตัวอย่าง ดังนั้นหากมีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของหินฝุ่นและตะกอนโครเมียมมีค่าที่ไม่เท่ากัน ที่ปริมาตรของหินฝุ่นและตะกอนโครเมียมเท่ากัน น้ำหนักหินฝุ่นจะมากกว่าน้ำหนักตะกอนโครเมียม แต่โดยภาพรวมพบว่า ค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียม ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จะมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก ที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (23)

4.3 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิง-ตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์-ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้ว จะถูกทำการย่อยด้วย Standard Test Hammer และคัดขนาดให้มีขนาดคละที่ขนาดใหญ่สุดไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างที่คัดขนาดแล้วไปทำการสกัดด้วยวิธีการสกัด TCLP นำของเหลวที่ได้จากกระบวนการสกัด ทำการวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH) แล้วทำการย่อย (Digestion) เพื่อส่งไปวัดค่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ AAS

ผลจากการทดลอง พบว่า อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 0 เมื่อการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดน้อยกว่า 0.050 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) และมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด มีค่าเท่ากับ 9.42, 9.17, 8.58, 7.71, 7.12 และ 6.69 ตามลำดับ

Copyright by Mahidol University

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 10 เมื่อการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด มีค่าเท่ากับ 0.144, 0.160, 0.190, 0.212, 0.199 และ 0.199 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด มีค่าเท่ากับ 9.51, 9.28, 8.67, 7.91, 7.27 และ 6.74 ตามลำดับ

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 20 เมื่อการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด มีค่าเท่ากับ 0.170, 0.187, 0.225, 0.293, 0.216 และ 0.211 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด มีค่าเท่ากับ 9.62, 9.40, 9.10, 8.00, 7.86 และ 6.93 ตามลำดับ

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 30 เมื่อการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด มีค่าเท่ากับ 0.171, 0.192, 0.240, 0.321, 0.224 และ 0.217 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด มีค่าเท่ากับ 9.66, 9.64, 9.48, 8.54, 7.42 และ 6.42 ตามลำดับ

และอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 40 เมื่อทำการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด มีค่าเท่ากับ 0.187, 0.213, 0.251, 0.350, 0.247 และ 0.244 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด มีค่าเท่ากับ 11.13, 11.02, 11.04, 10.41, 7.70 และ 6.82 ตามลำดับ

สรุปผลการวัดค่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด (mg/l) และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังจากการสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด จากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรด้วยวิธีการสกัด TCLP ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

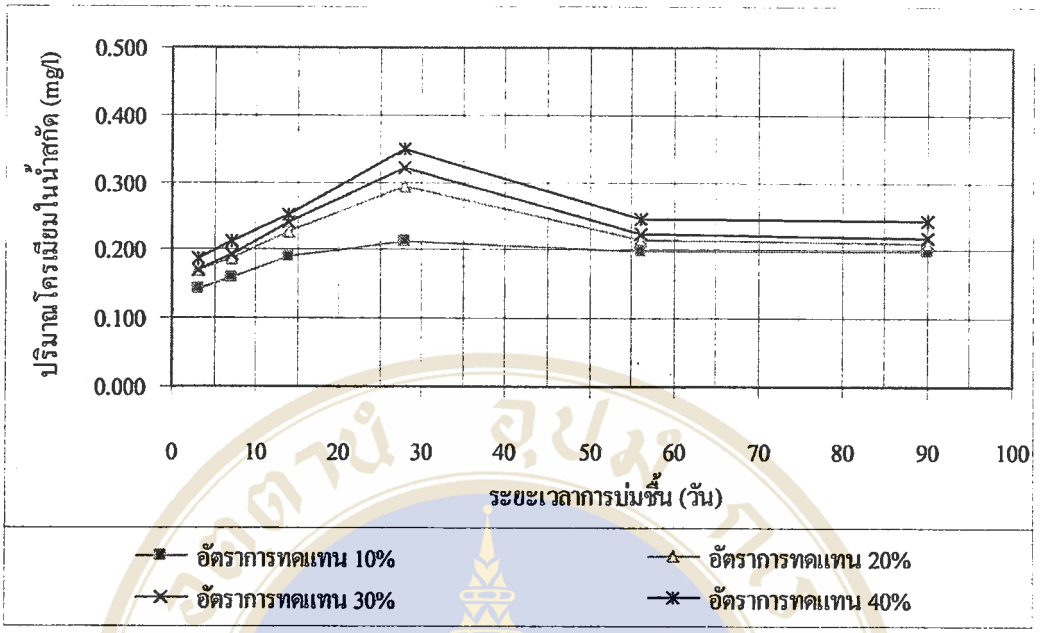
อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น (%)	ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg/l)						
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน	เฉลี่ย
0	less than 0.050	less than 0.050	less than 0.050	less than 0.050	less than 0.050	less than 0.050	less than 0.050
10	0.144	0.160	0.190	0.212	0.199	0.199	0.184
20	0.170	0.187	0.225	0.293	0.216	0.211	0.217
30	0.171	0.192	0.240	0.321	0.224	0.217	0.227
40	0.187	0.213	0.251	0.350	0.247	0.244	0.248

ตารางที่ 4.7 ความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรด้วยวิธีการสกัด TCLP ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น (%)	ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
0	9.42	9.17	8.58	7.71	7.12	6.69
10	9.51	9.28	8.67	7.91	7.27	6.74
20	9.62	9.40	9.10	8.00	7.86	6.93
30	9.66	9.64	9.48	8.54	7.42	6.42
40	11.13	11.02	11.04	10.41	7.70	6.82

จากตารางที่ 4.6 สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.3

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์-ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทน ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร

จากภาพที่ 4.3 พบว่าในช่วงระยะการบ่มชื้น 3 ถึง 28 วัน ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะมีความสัมพันธ์แปรผันตามระยะเวลาในการบ่มชื้น หลังจากนั้นจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับระยะเวลาในการบ่มชื้น กล่าวคือ ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มชื้นนานขึ้นจนถึงระยะเวลาบ่มชื้น 28 วัน หลังจากนั้นปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงระยะเวลาการบ่มชื้นก่อน 28 วัน สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่ยังมีลักษณะเป็นวุ้น (gel) (22)(23) การจับยึดโลหะหนักยังไม่มีความแข็งแรงพอ หรือยังไม่มีการเข้าไปแทรกตัวในสารประกอบซิลิกอนกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (20) หลังจากผ่านระยะเวลาในการบ่มชื้น 28 วันแล้ว แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบซิลิกอนที่เป็นตัวยึดประสาน ซึ่งสารประกอบซิลิกอนนี้จะจับยึดโครเมียมไว้ จึงทำให้มีปริมาณโครเมียมถูกชะละลายออกมาได้น้อยลง

จากตารางที่ 4.6 จะพบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30

Copyright by Mahidol University

และ 40 โดยปริมาตร มีค่าไม่สูงมากนัก หากพิจารณาปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดกับปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ที่กำหนดให้มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) จะพบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร มีปริมาณที่ไม่ต่างกันอย่างชัดเจน อาจสรุปว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่นำการทดแทนหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร พบว่ามีค่าเท่ากับ 0, 348.0, 695.9, 1043.9 และ 1391.8 มิลลิกรัมโครเมียม (mgCr) ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่ใช้ในแต่ละอัตราส่วนผสมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก อัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น (%)	น้ำหนักตะกอน Cr ที่นำมาทดแทน (g)	น้ำหนักตะกอน Cr แห้ง (g)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr ทั้งหมดที่นำมาทดแทน (mg)
250.00	250.00	0	0.00	0.00	0.0
250.00	250.00	10	137.50	56.97	348.0
250.00	250.00	20	275.00	113.94	695.9
250.00	250.00	30	412.51	170.92	1043.9
250.00	250.00	40	550.01	227.89	1391.8

ในการคำนวณตารางที่ 4.8 เป็นการคำนวณอัตราส่วนผสมเพื่ออัดเป็นคอนกรีตบล็อกจำนวน 1 ก้อน ที่มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ขี้เถ้าแกลบ หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 1 : 7 และน้ำในปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ 250 กรัม ขี้เถ้าแกลบ 250 กรัม ดังนั้นปริมาณโครเมียมต่อปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (Cement Rice Husk Ash : CRHA) มีค่าเท่ากับ 0, 0.696, 1.392, 2.088 และ 2.784 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (mgCr/ gCRHA) หรือเท่ากับ 0, 0.696, 1.392, 2.088 และ 2.784 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/ kgCRHA)ดังตารางที่ 4.9

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโครเมียมต่อกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (CRHA) ที่ใช้ในแต่ละอัตราส่วนผสมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์-ล็อกกิ้งบล็อก อัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

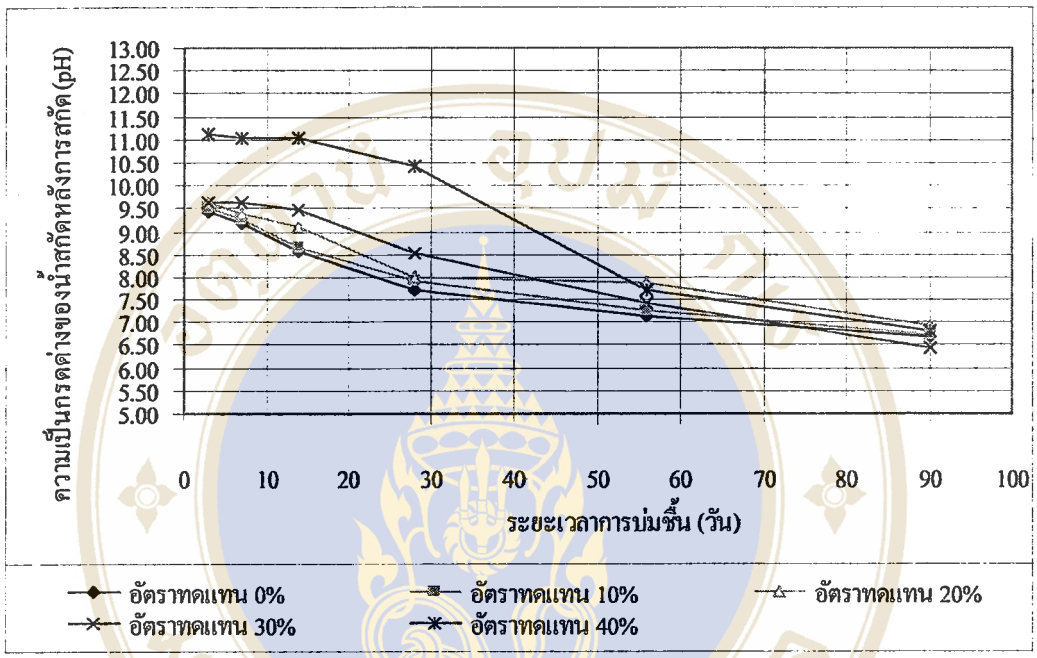
ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น (%)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr ทั้งหมดที่นำมาทดแทน (mg)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กรัม (mgCr/gCRHA)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กิโลกรัม (gCr/kgCRHA)
250.00	250.00	0	0.0	0.000	0.000
250.00	250.00	10	348.0	0.696	0.696
250.00	250.00	20	695.9	1.392	1.392
250.00	250.00	30	1043.9	2.088	2.088
250.00	250.00	40	1391.8	2.784	2.784

จากตารางที่ 4.6 และ 4.9 พบว่า เมื่อทำการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต-บล็อก ที่มีอัตราทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร เมื่อมีปริมาณโครเมียมต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ 1 กิโลกรัม เท่ากับ 0.696, 1.392, 2.088 และ 2.784 กรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kg CRHA) จะมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเฉลี่ยตลอดระยะการบ่มชื้น จากการสกัดวิธีการสกัด TCLP เท่ากับ 0.184, 0.217, 0.227 และ 0.248 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับผลงานวิจัยของ พจนีย์ ขุมมงคล และ สิรินทรเทพ เต้า-ประยูร (56) ซึ่งพบว่า ที่ระดับปริมาณกากตะกอนโครเมียมในปริมาณ 2 และ 5 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) ที่ระยะการบ่มต่างๆ จะมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ต่ำกว่า 0.500 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l)

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการสกัด TCLP และวิธีการสกัด EP Tox จะมีผลของการสกัดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอภิปรายผลในหัวข้อต่อไป

Copyright by Mahidol University

จากตารางที่ 4.7 สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.4



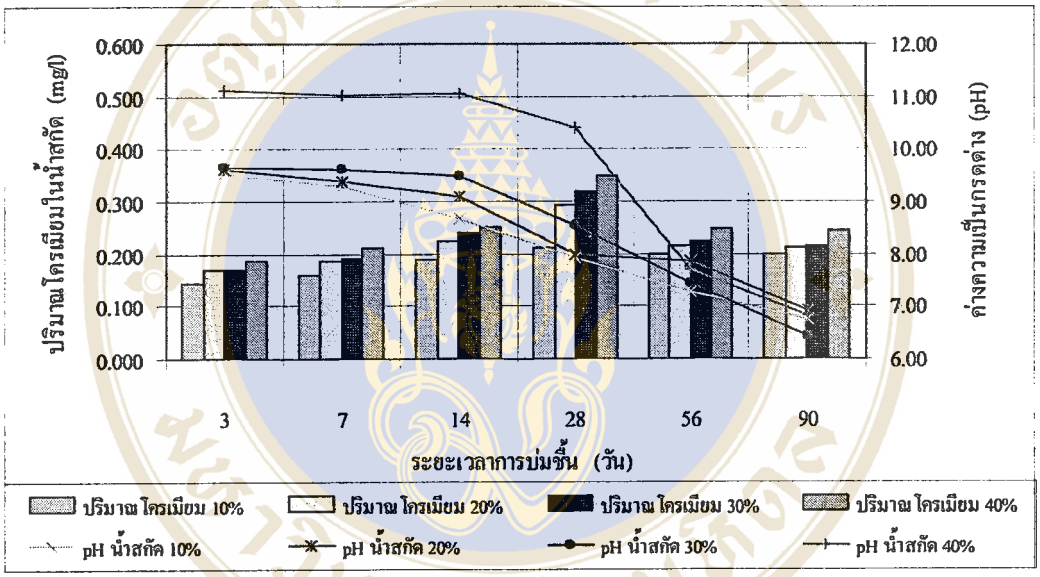
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับ-น้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร

ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด จะปรับตัวเพิ่มขึ้นจากค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดเริ่มต้นที่ 2.88 โดยจะมีเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงระยะเวลาในการบ่มชื้น 3 วัน หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง เมื่อระยะเวลาในการบ่มชื้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทั้งจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และในตะกอนโครเมียม ที่เป็นอิสระยังไม่ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ หรือทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารประกอบอื่น สามารถถูกชะละลายออกมาได้ง่าย ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดปรับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาในการบ่มชื้นแรกๆ แต่เมื่อเวลาในการบ่มชื้นมากกว่า 28 วัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มแข็งตัว หรือเกิดปฏิกริยา

Copyright by Mahidol University

ต่อเนื่องกับซิลิกอนไดออกไซด์ แล้วได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงขึ้น ทำให้มีแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นอิสระในปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างปรับเพิ่มขึ้นน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัด จากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหิน-ฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน จะได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4.5



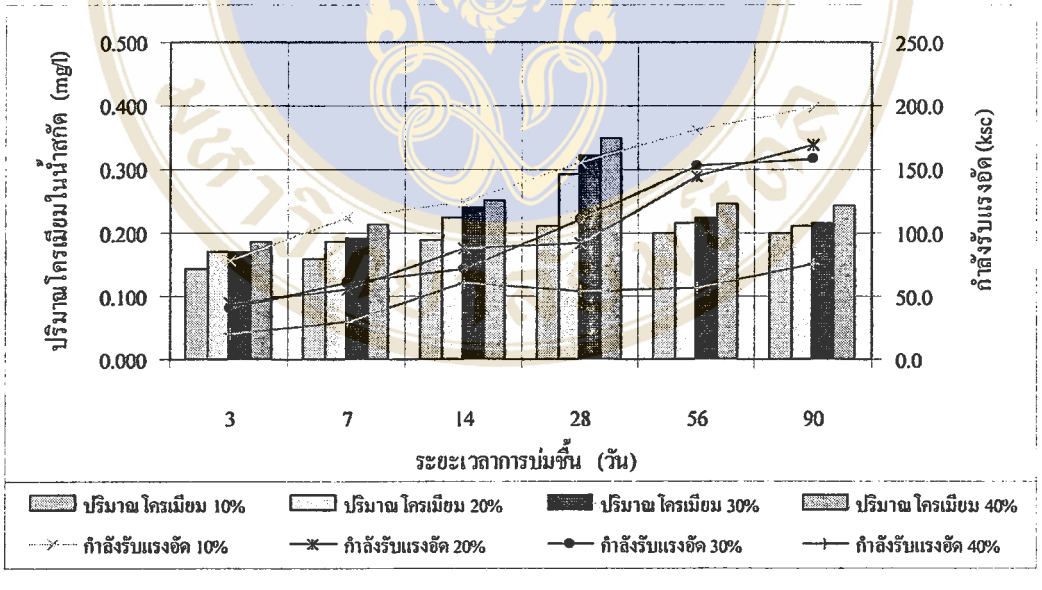
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด กับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

จากภาพที่ 4.5 พบว่าที่ระยะการบ่มชื้น 3 ถึง 28 วัน ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรดด่างลดต่ำลง แต่เมื่อผ่านระยะการบ่มชื้น 28 วัน ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดก้อนหล่อแข็งจะเริ่มคงที่ ในขณะที่ค่าความเป็นกรดด่างยังคงลดต่ำลง เนื่องจาก ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดและ ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการ

Copyright by Mahidol University

สกัด ไม่ได้มีความสัมพันธ์กันโดยตรง แต่มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งก้อนหล่อแข็งเมื่อผ่านระยะการบ่มชื้น 28 วัน แคลเซียมไฮดรอไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เป็นอิสระจะเริ่มทำปฏิกริยาต่อเนื่องกับซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้แคลเซียมไฮดรอไซด์ที่เป็นอิสระลดน้อยลง ส่งผลต่อการปรับตัวของค่าความเป็นกรดด่างดังที่กล่าวไปแล้ว และผลจากปฏิกริยาต่อเนื่องระหว่างแคลเซียมไฮดรอไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบซิลิกอนที่สามารถจับยึดโครเมียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทนต่อการชะละลายของกรด (20) ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดลดน้อยลงด้วย

เมื่อนำผลค่ากำลังรับแรงอัด และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม จากตารางที่ 4.4 และ 4.6 มาทำการหาความสัมพันธ์ในรูปกราฟ ระหว่างปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กำลังรับแรงอัด กับระยะเวลาในการบ่มชื้น โดยได้ผลดังภาพที่ 4.6 พบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดในช่วงระยะเวลาในการบ่มชื้น 3 ถึง 28 วัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยก้อนหล่อแข็งมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อผ่านระยะการบ่มชื้น 28 วันแล้วปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะเริ่มลดลง ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งยังคงมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด และค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

Copyright by Mahidol University

การเกิดลักษณะดังกล่าวเนื่องจากอัตราส่วนที่ใช้สำหรับการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ในการวิจัยครั้งนี้ มีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1 : 7 ทำให้ปูนซีเมนต์รวมขี้เถ้าแกลบมีเพียงแค่ 2 ใน 9 ส่วนในอัตราส่วนผสมทั้งหมด เมื่อปูนซีเมนต์รวมขี้เถ้าแกลบผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อนปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดเป็นวัสดุเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ขึ้นในช่วงระยะเวลาแรก ซึ่งยังมีลักษณะเป็นวุ้น (gel) (22) (23) วัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวจะทำการยึดเหนี่ยวหินฝุ่นเป็นส่วนใหญ่ และการที่วัสดุเชื่อมประสานยังมีลักษณะเป็นวุ้น (gel)ทำให้ช่องว่างในก้อนหล่อแข็งมีน้อย โครเมียมจึงแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างในลักษณะที่ไม่แข็งแรงสามารถถูกชะละลายออกมาได้ เมื่อระยะเวลาผ่านไป วัสดุเชื่อมประสานเริ่มแข็งตัวขึ้น ช่องว่างในก้อนหล่อแข็งจึงเพิ่มมากขึ้น เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเริ่มสมบูรณ์ขึ้น แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นวัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่จะเข้าไปช่วยยึดประสานหินฝุ่นให้แข็งแรงขึ้น วัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบอยู่ โดยเชื่อกันว่าการที่มีซิลิกอนในปูนซีเมนต์ และขี้เถ้าแกลบ อยู่มากๆ จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Polymerization ของ SiO_4 เป็น Si_4O_7 ซึ่งเป็นโครงผลึกของซิลิกอนที่แข็งแรง (44) ซึ่งจากการศึกษาของ Bishop พบว่า โครเมียมจะไม่ถูกจับยึดในช่องว่างในก้อนหล่อแข็ง แต่จับยึดในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ (20) ดังนั้นโครเมียมในก้อนหล่อแข็งจึงถูกจับยึดในลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อน ที่มีความแข็งแรงยากต่อการชะละลาย

4.4 การเปรียบเทียบการสกัดด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching (TCLP)กับวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) ในการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

เนื่องจากงานวิจัยในฉบับนี้ทำการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ด้วยวิธีวิธีการสกัด TCLP แต่งานวิจัยอ้างอิงส่วนใหญ่จะใช้วิธีการสกัด EP Tox ทำให้การเปรียบเทียบผลไม่เด่นชัด อีกทั้งผลของค่าความเป็นกรดด่างจากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมด้วยวิธีการสกัด TCLP ในงานวิจัยฉบับนี้ เฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 8 ถึง 10 ซึ่งมีช่วงพิสัยที่โครเมียมละลายได้น้อย (20) อาจทำให้ผลของปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดไม่ถูกต้องและไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จึงได้ทำการทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งเปรียบเทียบระหว่างการสกัดด้วยวิธีการสกัด TCLP กับวิธีการสกัด EP Tox โดยใช้ก้อนหล่อแข็งที่มีอายุการบ่มชื้น 90 วัน ที่เป็นตัวอย่างเดียวกันได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบการสกัดก้อนหล่อแข็ง ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นต่างๆ ด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) กับวิธีการสกัด TCLP

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมียมหลังจากการสกัดด้วยวิธี EP Tox				ปริมาณโครเมียมหลังจากการสกัดด้วยวิธี TCLP			
	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
1	0.226	0.24	0.189	0.263	0.237	0.235	0.241	0.269
2	0.228	0.239	0.199	0.271	0.238	0.24	0.198	0.318
3	0.226	0.235	0.189	0.249	-	-	-	-
เฉลี่ย	**0.227**	**0.238**	**0.192**	**0.261**	**0.238**	**0.238**	**0.220**	**0.294**

ซึ่งพบว่าผลของปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดตัวอย่างเดียวกัน ด้วยวิธีการสกัด EP Tox และวิธีการสกัด TCLP มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลของปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีการสกัด TCLP ในการวิจัยครั้งนี้จึงยอมรับได้

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้านรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ่งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร

ในศึกษาเกี่ยวกับของเสียอันตรายนั้น ความสามารถในการชะละลาย (Leachability) เป็นตัวบ่งชี้อย่างหนึ่ง ที่บอกถึงปริมาณของสารอันตรายที่สามารถชะละลายออกมาได้จากของเสียอันตราย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$L = W_1 / W_2 \quad \text{..... (3.1)}$$

L = ความสามารถในการชะละลาย (Leach ability : mg/g)

W_1 = ปริมาณสารอันตรายทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg)

W_2 = ปริมาณสารอันตรายทั้งหมดในของเสียอันตรายก่อนการสกัด (g)

ในการบำบัดของเสียอันตราย หากสามารถทราบถึงความสามารถในการชะละลายของเสียก่อนการบำบัด และความสามารถในการชะละลายของเสียอันตรายหลังจากการบำบัด ก็จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย หรือประสิทธิภาพของการบำบัด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

Copyright by Mahidol University

$L_0 = [(L_1-L_2) / L_1] \times 100$ ..... (3.4)

L_0 = ประสิทธิภาพในลดการชะละลาย (%)

L_1 = ความสามารถในการชะละลายก่อนการหล่อแข็ง

L_2 = ความสามารถในการชะละลายหลังการหล่อแข็ง

จากสมการที่ 3.1 และ 3.4 จะพบว่า ประสิทธิภาพในการชะละลายจะแปรผันตามความสามารถในการชะลายหลังการหล่อแข็ง เนื่องจากความสามารถในการชะละลายก่อนการหล่อแข็งจะเป็นค่าที่คงที่ แต่ค่าความสามารถในการชะละลายหลังการหล่อแข็งจะแปรตามปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็ง

4.5.1 ความสามารถในการชะละลายก่อนการหล่อแข็ง

นำค่าปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมจากตารางที่ 4.1 และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากสกัดตะกอนโครเมียมจากตารางที่ 4.2 มาคำนวณความสามารถในการชะละลายของโครเมียมออกจากตะกอนโครเมียม จากการสกัดด้วยวิธีการสกัด TCLP จากสมการที่ 3.1 ได้เท่ากับ 28.500 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมโครเมียม (mgCr/gCr) และค่าร้อยละในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 2.850 โดยดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลายโครเมียมออกจากตะกอนโครเมียม จากวิธีการสกัด TCLP

ตัวอย่างที่	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr 50 กรัม (g)	ปริมาณ Cr ในในน้ำสกัด 1 ลิตร (mg)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
1	0.305	7.760	25.443	2.544
2	0.305	7.955	26.082	2.608
3	0.305	11.160	36.590	3.659
4	0.305	11.450	37.541	3.754
5	0.305	7.085	23.230	2.323
6	0.305	6.745	22.115	2.211
ค่าเฉลี่ย	0.305	8.693	28.500	2.850

Copyright by Mahidol University

4.5.2 ความสามารถในการชะละลายหลังการหล่อแข็ง

ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก แต่ละอัตราส่วนผสมที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จะทำการคำนวณหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง โดยใช้ค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดในตะกอนโครเมียมเฉลี่ย จากตารางที่ 4.8 กับ น้ำหนักเฉลี่ยของก้อนหล่อแข็ง มาทำการคำนวณหาปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็ง มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง (mg/g) ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ได้ผลของค่าเฉลี่ยปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งแต่ละอัตราส่วนผสมที่ระยะการบ่มชื้นต่างๆ ดังตารางที่ 4.12 (รายละเอียดการคำนวณในตารางในภาคผนวก)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้นต่างๆ

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่นโดยปริมาตร (%)	ปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็ง (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)						
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.150	0.152	0.154	0.150	0.150	0.152	0.151
20	0.327	0.318	0.331	0.330	0.311	0.310	0.321
30	0.476	0.490	0.494	0.475	0.469	0.493	0.483
40	0.657	0.664	0.638	0.678	0.669	0.693	0.666

จากปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด (mg/l) จากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน จากตารางที่ 4.6 ทำการคำนวณหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัด (mg) หลังจากนั้นคำนวณหาความสามารถในการชะละลายโครเมียมหลังการหล่อแข็ง จากสมการที่ 3.1 ได้ผลดังตารางที่ 4.13

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลายโครเมียมหลังการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่นโดยปริมาตร (%)	ระยะเวลาการบ่มชื้น (days)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง (mgCr/g solid)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัด 1 ลิตร (mg)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
10	3	0.150	0.008	0.144	18.000	1.800
20	3	0.327	0.016	0.170	10.625	1.063
30	3	0.476	0.024	0.171	7.125	0.713
40	3	0.657	0.033	0.187	5.667	0.567
10	7	0.152	0.008	0.160	20.000	2.000
20	7	0.318	0.016	0.187	11.688	1.169
30	7	0.490	0.025	0.192	7.680	0.768
40	7	0.664	0.033	0.213	6.455	0.645
10	14	0.154	0.008	0.190	23.750	2.375
20	14	0.331	0.017	0.225	13.235	1.324
30	14	0.494	0.025	0.240	9.600	0.960
40	14	0.638	0.032	0.251	7.844	0.784
10	28	0.150	0.008	0.212	26.500	2.650
20	28	0.330	0.017	0.293	17.235	1.724
30	28	0.475	0.024	0.321	13.375	1.338
40	28	0.678	0.034	0.350	10.294	1.029
10	56	0.150	0.008	0.199	24.875	2.488
20	56	0.311	0.016	0.216	13.500	1.350
30	56	0.469	0.023	0.224	9.739	0.974
40	56	0.669	0.033	0.247	7.485	0.748

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลายโครเมียมหลัง การหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน (ต่อ)

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น โดยปริมาตร (%)	ระยะเวลาการบ่มชื้น (days)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง (mgCr/g solid)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัด 1 ลิตร (mg)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
10	90	0.152	0.008	0.199	24.875	2.488
20	90	0.310	0.016	0.211	13.188	1.319
30	90	0.493	0.025	0.217	8.680	0.868
40	90	0.693	0.035	0.244	6.971	0.697

4.5.3 ประสิทธิภาพในลดการชะละลายโครเมียมด้วยวิธีการหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร

จากความสามารถในการชะละลายก่อนการบำบัดเฉลี่ย จากตารางที่ 4.11 และความสามารถหลังการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.13 ทำการคำนวณประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย จากสมการที่ 3.4 ได้ดังตารางที่ 4.14

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย โครเมียมด้วยการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

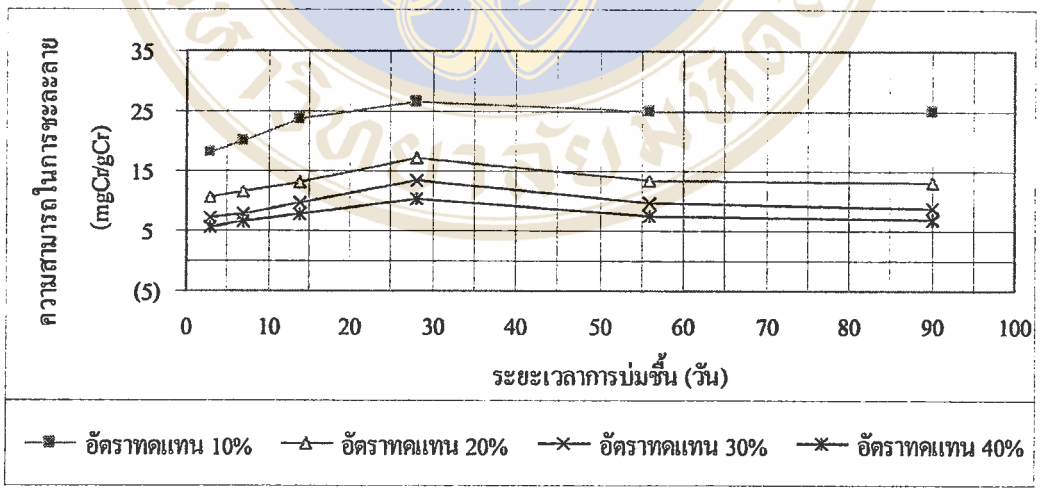
อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น โดยปริมาตร (%)	ระยะเวลาการบ่มชื้น (days)	ความสามารถในการชะละลายก่อนการบำบัด (mgCr/gCr)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัด (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย
10	3	28.465	18.000	36.764
20	3	28.465	10.625	62.673
30	3	28.465	7.125	74.969
40	3	28.465	5.667	80.093
10	7	28.465	20.000	29.738
20	7	28.465	11.688	58.941
30	7	28.465	7.680	73.019
40	7	28.465	6.455	77.325
10	14	28.465	23.750	16.564
20	14	28.465	13.235	53.503
30	14	28.465	9.600	66.274
40	14	28.465	7.844	72.444
10	28	28.465	26.500	6.903
20	28	28.465	17.235	39.451
30	28	28.465	13.375	53.012
40	28	28.465	10.294	63.836
10	56	28.465	24.875	12.612
20	56	28.465	13.500	52.573
30	56	28.465	9.739	65.786
40	56	28.465	7.485	73.705

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย โครเมียมด้วยการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10,20,30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน (ต่อ)

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น โดยปริมาตร (%)	ระยะเวลาการบ่มชื้น (days)	ความสามารถในการชะละลายก่อนการบำบัด (mgCr/gCr)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัด (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย
10	90	28.465	24.875	12.612
20	90	28.465	13.188	53.671
30	90	28.465	8.680	69.506
40	90	28.465	6.971	75.509

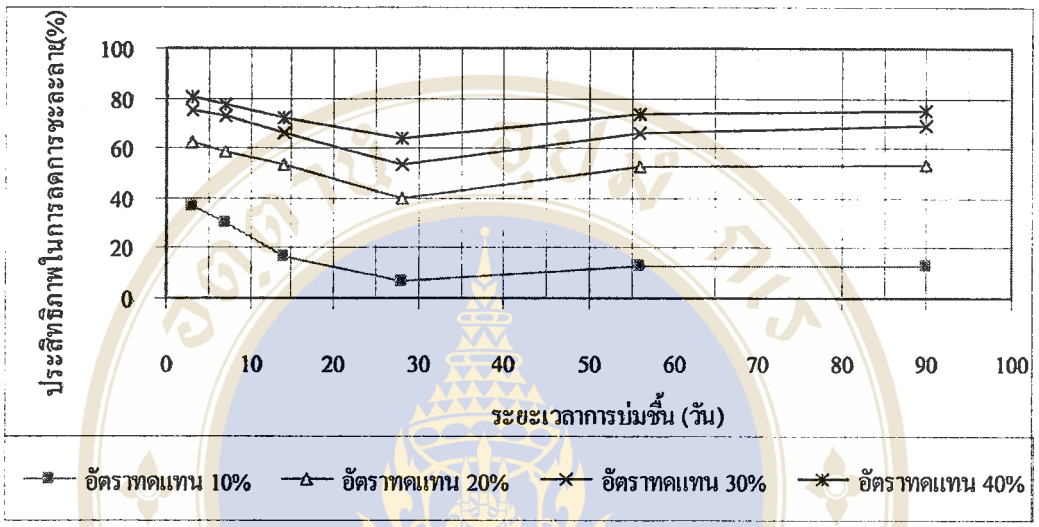
ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ได้ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการชะละลายโครเมียม จากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

Copyright by Mahidol University

และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม จากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร กับอายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ได้ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม จากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

จากภาพที่ 4.7 พบว่าความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 3, 7, 14 และ28 วัน จะมีความสามารถในการชะละลายเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความสามารถในการชะละลายจะเริ่มลดลงที่อายุการบ่มชื้น 56 และ 90 วัน ทั้งนี้เนื่องจากก้อนหล่อแข็งในช่วงอายุการบ่มชื้น 3, 7, 14 และ 28 วัน สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ที่มีคุณสมบัติ เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ที่ยังมีลักษณะเป็นวุ้น (gel) การจับยึดโลหะหนักยังไม่มีความแข็งแรงพอ (22)(23) หรือยังไม่มีการเข้าไปแทรกตัวในสารประกอบซิลิกอนกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (20) ทำให้โครเมียมที่เป็นอิสระมีมาก และสามารถถูกชะละลายได้ง่าย แต่เมื่อผ่านระยะเวลาการบ่มชื้น 28 วันแล้ว แคลเซียมไฮดรอไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เป็นอิสระจะเริ่มทำปฏิกริยาต่อเนื่องกับ

Copyright by Mahidol University

ซิลิกอนไดออกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบซิลิกอน ที่สามารถจับยึดโครเมียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทนต่อการชะละลายของกรด (20) ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดลดน้อยลงด้วย ส่งผลต่อค่าความสามารถในการชะละลาย

แต่กลับพบว่าความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก จะแปรผันกับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ทั้งนี้อาจเนื่องจากในการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกจะมีปริมาณตัวยึดประสาน ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน ค่อนข้างจำกัด เมื่อเทียบกับปริมาณหินฝุ่น เมื่อทำการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกโดยการทดแทนปริมาณตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณหินฝุ่นในก้อนหล่อแข็งลดลง ส่งผลให้ช่องว่างในก้อนหล่อแข็งลดลง โครเมียมจะสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างได้ ส่งผลต่อการชะละลายโครเมียมได้น้อยลง ดังนั้นอาจเป็นไปได้ที่ช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งมีผลต่อการจับยึดโครเมียม และมีผลต่อการชะละลายโครเมียมออกจากก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีหินฝุ่นเป็นส่วนผสม

4.6 การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราร้อยละในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร

เงื่อนไขในการเลือกอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่เหมาะสม ที่สามารถนำมาหล่อแข็งให้เป็นก้อนในรูปคอนกรีตบล็อก ในงานวิจัยฉบับนี้ จะพิจารณาจากกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ประเภท ค. ที่กำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดแบบเฉลี่ยจากพื้นที่รวม ไม่น้อยกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตบล็อกจะต้องไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร และมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานก้อนหล่อแข็ง ในประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ผลจากการทดลองพบว่า ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10 , 20 และ 30 โดยปริมาตร เมื่ออายุการบ่มชื้นมากกว่าหรือเท่ากับ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ประเภท ค-2 ส่วนก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 40 โดย

Copyright by Mahidol University

ปริมาตร มีกำลังรับแรงอัดเมื่ออายุการบ่มชื้นมากกว่าหรือเท่ากับ 90 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร มีค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยที่อายุการบ่มชื้น 28 วัน เท่ากับ 2059.9, 1973.7, 1869.0, 1878.9 และ 1819.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่า มาตรฐานก้อนหล่อแข็ง ตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก ที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (23) ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานก้อนหล่อแข็งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ในส่วนของปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด พบว่า ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ40 โดยปริมาตร ทุกระยะการบ่มชื้นมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.151, 0.321, 0.483 และ 0.666 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง ตามลำดับ จากปริมาณโครเมียมที่มีอยู่ในก้อนหล่อแข็งซึ่งมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของก้อนหล่อแข็ง ทำให้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งเพิ่มมากขึ้นถึงระดับเท่าใด ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะเพิ่มขึ้นจนเกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ดังนั้นเงื่อนไขในการพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ในรูปคอนกรีตบล็อก จากอัตราส่วนผสมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จะพิจารณาเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่น โดยค่ากำลังรับแรงอัดจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แบบเฉลี่ยจากพื้นที่รวม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ประเภท ค-2 และค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตบล็อกจะต้องไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร ตามมาตรฐานก้อนหล่อแข็ง ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โดยอัตราส่วนที่

Copyright by Mahidol University

เหมาะสมจะต้องมีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรที่มากที่สุด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร มีความเหมาะสมตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น

อัตราส่วนผสมที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร จะใช้ในการศึกษาปริมาณโครเมียมที่เหมาะสมในการหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีต-บล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ่งบล็อก ต่อไป

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์

นำโครเมียมสังเคราะห์ที่เตรียมไว้สำหรับการวิจัย ซึ่งได้จากการรีดักชั่นทางเคมีให้ Cr^{6+} ในสารละลายโครเมียมไตรออกไซด์ (CrO_3) กลายเป็น Cr^{3+} โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) แล้วทำให้เกิดการตกตะกอนโดยใช้ โซดาไฟ (NaOH) มาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการย่อย (Digestion) ตามวิธี Standard Method (APHA-AWWA-WPCF) นำสารละลายที่ผ่านการย่อยแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่อง AAS ได้ค่าปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมเฉลี่ย เท่ากับ 58.531 มิลลิกรัมต่อกรัมตะกอนแห้ง (mgCr/g dry sludge) ซึ่งมีผลดังตาราง ที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลจากการวัดปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์ (mgCr/g dry sludge)
1	57.744
2	55.983
3	56.727
4	60.500
5	61.500
6	58.732
เฉลี่ย	58.531

Copyright by Mahidol University

โครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ได้อัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 อัตราส่วนผสมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	หินฝุ่น (g)	อัตราทดแทนปริมาตรตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์ (%)	น้ำหนักตะกอน Cr สังเคราะห์ (g)	น้ำหนักตะกอน Cr (g)	ปริมาณน้ำหักน้ำในตะกอนทั้งหมด (g)
250	250	1225	0	0.0	412.5	95.9
250	250	1225	20	37.1	330.0	140.0
250	250	1225	40	74.1	247.5	184.1
250	250	1225	60	111.2	165.0	228.2
250	250	1225	80	148.2	82.5	272.4
250	250	1225	100	185.3	0.0	316.5

ทำการผสมตามอัตราส่วนผสมที่คำนวณไว้ ใส่ในแบบของเครื่องซิลวาแรม อัดเป็นคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนักแบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร จำนวนอัตราส่วนผสมละ 2 ก้อนตัวอย่าง ทำการบ่มชื้นก้อนตัวอย่างจนถึงระยะการบ่มชื้น 28 วัน นำก้อนตัวอย่างมาตากแดดจนแห้ง ทำวัดขนาด และชั่งน้ำหนัก แล้วทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อน ผลจากการทดลอง พบว่าที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ก้อนคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร มีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 117.3, 138.3, 142.5, 143.7, 137.1 และ 136.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) และมีความหนาแน่น เท่ากับ 1884.87, 1866.14, 1852.06, 1826.56, 1818.44 และ 1810.37 กิโลกรัมต่อลูกบาก์ศเมตร (kg/cu.m.) ตามลำดับ สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.17

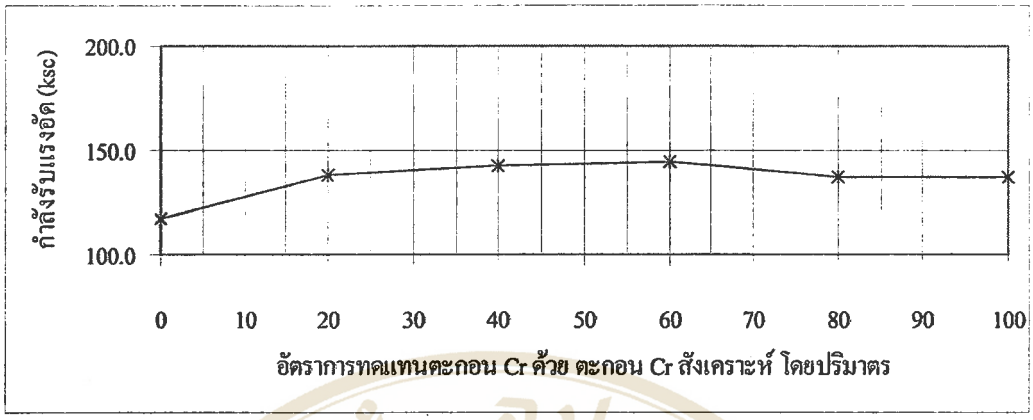
Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.17 ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์ โดยปริมาตร (%)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	ความหนาแน่น (kg/cu.m)
0	117.3	1884.87
20	138.3	1866.14
40	142.5	1852.06
60	143.7	1826.56
80	137.1	1818.44
100	136.6	1810.37

จากตารางที่ 4.17 สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงอัด กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.9 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ได้ดังภาพที่ 4.10

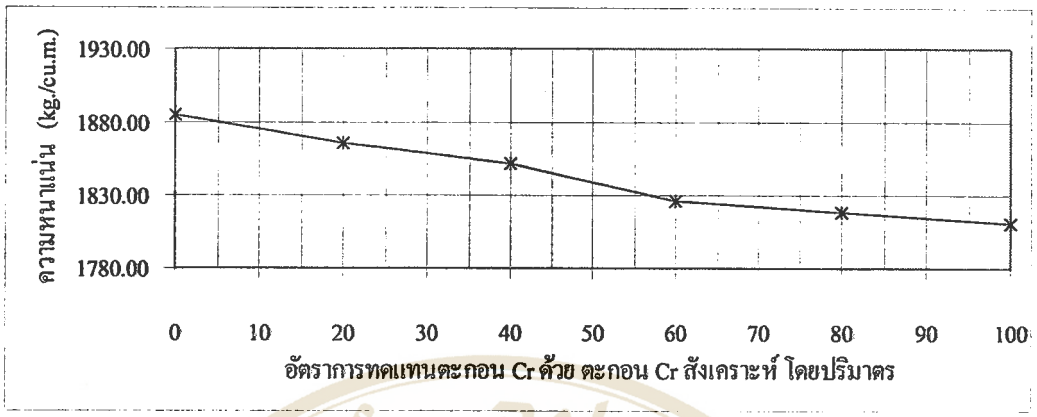
Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.9 กำลังรับแรงอัด กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ในอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 28 วัน

จากภาพที่ 4.9 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดจะมีพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์มากกว่าร้อยละ 60 โดยปริมาตร กำลังรับแรงอัดจะเริ่มลดลง การที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตามอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์นั้น เนื่องจากโครเมียมในก้อนหล่อแข็งจะอยู่ในรูปของสาร-ประกอบซิลิกอน (20) อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ที่เป็นโครงผลึกของโลหะหนักเข้าไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็ง ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น (57) นอกจากนี้จากการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตรเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ในตะกอนโครเมียมลดลง ส่งผลให้การบวมของก้อนหล่อแข็งลดน้อยลง ส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.10 ความหนาแน่น กับอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ในอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มชื้น 28 วัน

จากภาพที่ 4.10 พบว่าค่าความหนาแน่นแปรผันตามอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60 80 และ 100 โดยปริมาตร เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของตะกอนโครเมียม และโครเมียมสังเคราะห์มีค่าที่ไม่เท่ากัน เมื่อทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตร จะทำให้มีน้ำหนักของก้อนหล่อแข็งที่ไม่เท่ากัน และมีผลต่อการคำนวณค่าความหนาแน่น แต่โยภาพรวมยังมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก ที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (23)

เมื่อทำการคำนวณปริมาณโครเมียมทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง(mg) และปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ได้ผลดังตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ (รายละเอียดในภาคผนวก)

Copyright by Mahidol University

ตารางที่ 4.18 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิง-ตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์โดยปริมาตร (%)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr รวม Cr สังเคราะห์ (mg)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
0.0	1043.87	0.475
20.0	2758.15	1.260
40.0	4472.43	2.050
60.0	6186.72	2.849
80.0	7901.00	3.655
100.0	9615.28	4.468

ตารางที่ 4.19 ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์ โดยปริมาตร (%)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง (mg Cr/g ก้อนหล่อแข็ง)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กรัม (mgCr/gCRHA)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กิโลกรัม (gCr/kgCRHA)
0.0	0.475	2.088	2.088
20.0	1.260	5.516	5.516
40.0	2.050	8.945	8.945
60.0	2.849	12.373	12.373
80.0	3.655	15.802	15.802
100.0	4.468	19.231	19.231

Copyright by Mahidol University

จากการวิจัยของ Rijal (17) พบว่าโดยทั่วไปโลหะหนักจะไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำรุนแรงมากนัก โดยเฉพาะโครเมียม (Cr^{3+}) แต่โครเมียม (Cr^{3+}) กลับมีส่วนช่วยให้ซีเมนต์แข็งแรงขึ้น (58) จากการวิจัยของ วิชัย มาชูตระกูล (50) พบว่า การหล่อแข็งตะกอนโครเมียม 2 - 10 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kg CRHA) จะทำให้ก้อนตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามปริมาณโครเมียม เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัด และปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ(gCr/kgCRHA) ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร เดียวกัน ในตารางที่ 4.17 และ 4.19 พบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 117.3, 138.3, 142.5, 143.7, 137.1 และ 136.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) โดยมีปริมาณโครเมียมเท่ากับ 2.088, 5.516, 8.945, 12.375, 15.802 และ 19.231 กรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kg CRHA) ตามลำดับ พบว่าเมื่อก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกมีค่าปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ อยู่ระหว่าง 2.088 – 12.375 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kg CRHA) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบมากกว่า 12.375 gCr/kgCRHA ค่ากำลังรับแรงอัดจะเริ่มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิจัยของ วิชัย มาชูตระกูล ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.9 การทดสอบการชะละลายโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

นำก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้ว จะทำการย่อยด้วย Standard Test Hammer แล้วคัดขนาดให้มีขนาดคละที่ขนาดใหญ่สุดไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่คัดขนาดแล้วไปทำการสกัดด้วยวิธีการสกัด TCLP นำของเหลวที่ได้จากกระบวนการสกัด ทำการวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH) แล้วทำการย่อย (Digestion) เพื่อส่งไปวัดค่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะ AAS

Copyright by Mahidol University

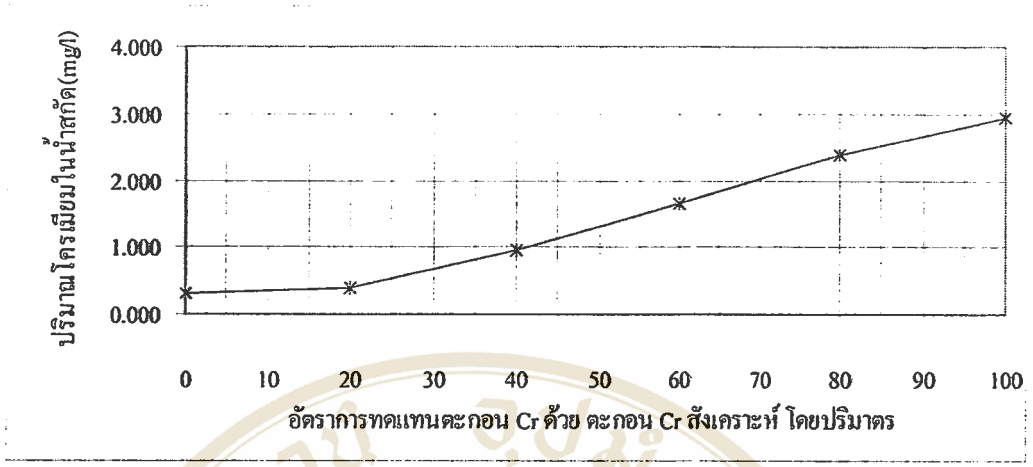
ผลจากการวัดปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด (mg/l) และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังจากการสกัด พบว่า ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร เมื่อการสกัดก้อนคอนกรีตบล็อกด้วยวิธีสกัด TCLP พบว่ามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด เท่ากับ 8.85, 8.20, 7.78, 7.74, 8.25 และ 8.37 ตามลำดับ และ มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด เท่ากับ 0.315, 0.405, 0.945, 1.640, 2.380 และ 2.930 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด หลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ด้วยวิธีการสกัด TCLP

อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์โดยปริมาตร (%)	กำลังรับแรงอัด (ksc)	ความหนาแน่น (kg/cu.m)
0	117.3	1884.87
20	138.3	1866.14
40	142.5	1852.06
60	143.7	1826.56
80	137.1	1818.44
100	136.6	1810.37

จากตารางที่ 4.20 สร้างเป็นกราฟปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด กับ อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และสร้างเป็นกราฟค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด กับ อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 4.12

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.11 ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

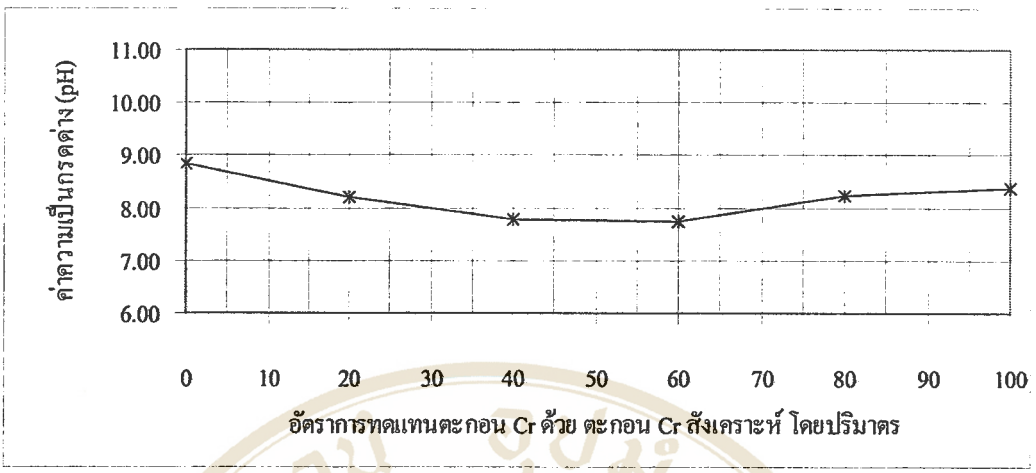
จากภาพที่ 4.11 พบว่าจากการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน เป็นระยะที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น อยู่ในภาวะแข็งตัว ในขณะเดียวกันปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกัน (22) (26) ซึ่งโครเมียมในก้อนหล่อแข็งจะถูกจับยึดโดยการเข้าไปแทรกตัวในสารประกอบซิลิกอน กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (20) แต่เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์รวมขี้เถ้าแกลบ ในการผสมเพื่ออัดเป็นคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน มีปริมาณเท่ากับ 500 กรัม จึงทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) มีปริมาณที่ไม่มากพอต่อการจับยึดโครเมียมทั้งหมด แต่จะสามารถจับโครเมียมได้ในระดับหนึ่ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมโครเมียมสังเคราะห์ จะทำให้

Copyright by Mahidol University

มีปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำให้โครเมียมที่เป็นอิสระไม่ถูกจับยึดโดยสารประกอบซิลิกอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และจะสามารถชะละลายออกมาได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.19 และ 4.20 พบว่า ค่าปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.088, 5.516, 8.945, 12.375, 15.802 และ 19.231 กรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kg CRHA) มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัดเท่ากับ 0.315, 0.405, 0.945, 1.640, 2.380 และ 2.930 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) เมื่อก้อนหล่อแข็งมีอายุบ่มชื้น 28 วัน ซึ่งผ่านมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ที่กำหนดให้มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ วิชัย มาชูตระกูล (50) ซึ่งทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมที่เป็นโครเมียมสังเคราะห์โดยใช้ปูนซีเมนต์ขี้เถ้า-แกลบ ได้ผลว่า การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียม ในอัตรา 2, 5, 10, 20, 50 และ 75 gCr/kgCRHA ที่อายุการบ่ม 28 วัน เมื่อทำการสกัดด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 0.238, 0.294, 0.369, 0.394, 2.443 และ 4.221 mg/l ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) ในงานวิจัยฉบับนี้มีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัดสูงกว่า ค่าจากผลงานวิจัยของ วิชัย มาชูตระกูล ทั้งนี้เนื่องจากการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก มีส่วนผสมที่เป็นหินฝุ่น ซึ่งทำให้เกิดเป็นโพรง หรือช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งมาก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโครเมียมในการหล่อแข็ง จะมีโครเมียมเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปซิลิเกต โครเมียมส่วนที่เหลือจะถูกจับยึดกับสารยึดประสานอื่นๆ ไว้ในก้อนหล่อแข็ง แต่เมื่อมีช่องว่างการยึดประสานโครเมียมจึงไม่แข็งแรง และสามารถถูกชะละลายได้ง่าย

Copyright by Mahidol University



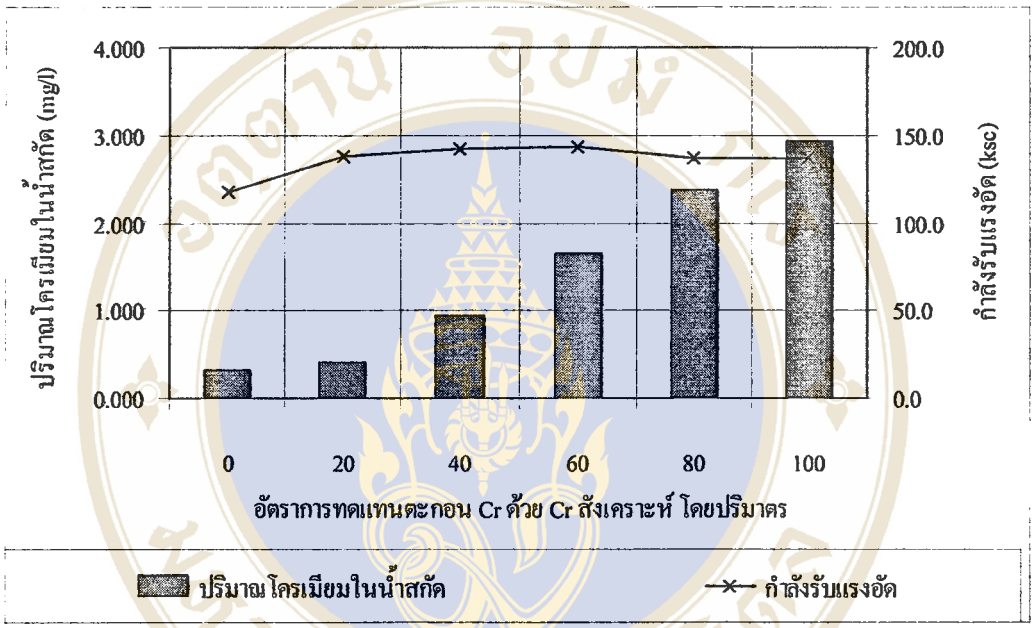
ภาพที่ 4.12 ความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

จากภาพที่ 4.12 พบว่าค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัดจะลดลงเมื่ออัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 60 โดยปริมาตร หลังจากนั้นค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัดจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80 เป็นร้อยละ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 28 วัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.9 ซึ่งการที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัดปรับลดลง เมื่อมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการทดแทนโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จะทำให้ตะกอนโครเมียมลดลง ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นอิสระในก้อนหล่อแข็งลดลงด้วย จึงมีการปรับเพิ่มขึ้นของน้ำสกัดจากค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นที่ 2.88 ลดลงด้วย

แต่กลับพบว่ามีการปรับเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดด่าง อีกครั้งทั้งที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นอิสระในตะกอนโครเมียมมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน หรือมีปริมาณที่น้อยจนไม่มีผลต่อการปรับค่าความเป็นกรดด่างได้อย่างชัดเจน ดังนั้นแต่อาจสรุปได้ว่า โดยภาพรวมค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.20

Copyright by Mahidol University

นำค่ากำลังรับแรงอัด และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.17 และ 4.20 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ที่อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ได้ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 28 วัน

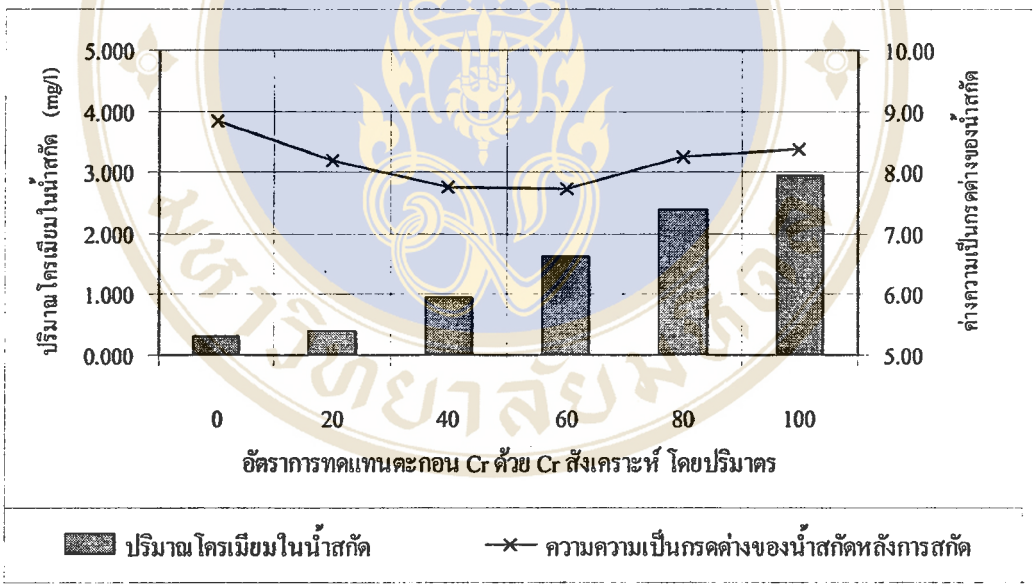
จากภาพที่ 4.13 พบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการสกัดก้อนหล่อแข็งไม่มีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดจะมีผลมาจากปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อมีปริมาณโครเมียมถึงระดับหนึ่ง กำลังรับแรงอัดจะลดลง (50) ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็ง ก็จะส่งผลให้มีโครเมียม

Copyright by Mahidol University

อิสระในก้อนหล่อแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารประกอบซิลิกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถจับยึดได้หมด โครเมียมจึงถูกชะละลายได้มากขึ้น

นำค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก จากตารางที่ 4.20 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด กับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ที่อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ได้ดังภาพที่ 4.14

จากภาพที่ 4.14 พบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะแปรผันตามอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดหลังการสกัด



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสกัดหลังการสกัด กับปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราในการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ30โดยปริมาตร โดยมีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 28 วัน

Copyright by Mahidol University

4.10 การศึกษาความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตรที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

นำค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.18 และค่าน้ำหนักเฉลี่ยของก้อนหล่อแข็ง มาคำนวณปริมาณโครเมียมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง (mgCr/gก้อนหล่อแข็ง) ที่อายุการบ่มชื้น 28 วัน ได้ผลดังตารางที่ 4.21 (รายละเอียดการคำนวณในตารางในภาคผนวก)

ตารางที่ 4.21 ค่าปริมาณโครเมียมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง) ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์ โดยปริมาตร (%)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง (mg Cr/g ก้อนหล่อแข็ง)
250.0	250.0	0.0	0.475
250.0	250.0	20.0	1.260
250.0	250.0	40.0	2.050
250.0	250.0	60.0	2.849
250.0	250.0	80.0	3.655
250.0	250.0	100.0	4.468

จากปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด (mg/l) จากก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการ

Copyright by Mahidol University

การทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.20 ทำการคำนวณหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัด (mg) หลังจากนั้นคำนวณหาความสามารถในการชะละลายโครเมียมหลังการหล่อแข็ง จากสมการที่ 3.1 ได้ผลดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ความสามารถในการชะละลาย และร้อยละในการชะละลายโครเมียม หลังก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง-บล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

อัตราทดแทนปริมาณตะกอน Cr ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ (%)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 100 กรัม (g)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.048	0.630	13.125	1.313
20	0.126	0.810	6.429	0.643
40	0.205	1.890	9.220	0.922
60	0.285	3.280	11.509	1.151
80	0.366	4.760	13.005	1.301
100	0.447	5.860	13.110	1.311

จากตารางที่ 4.22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมโดยการทดแทนด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตร จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 20 พบว่าความสามารถในการชะละลายจะลดลง แต่เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมโดยการทดแทนด้วยโครเมียมสังเคราะห์มากกว่าร้อยละ 20 โดยปริมาตร ความสามารถในการชะละลายจะกลับเพิ่มมากขึ้น

จากการนำข้อมูลปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังการสกัดเฉลี่ย และปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.9 และของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับ-

Copyright by Mahidol University

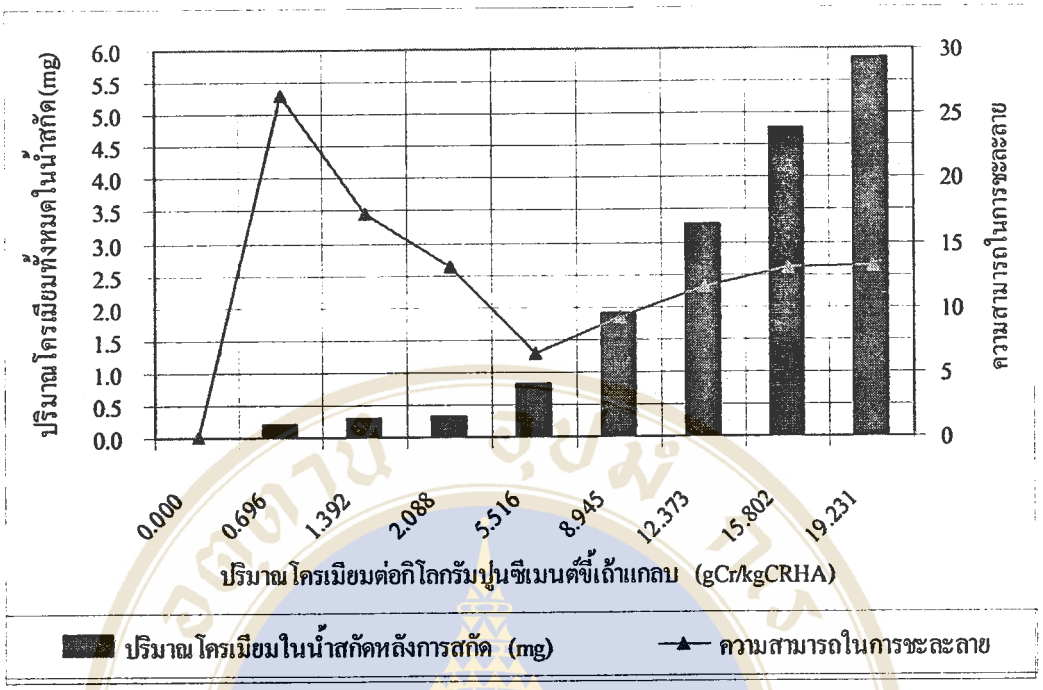
น้ำหนัก แบบอินเตอร์ ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร จากตารางที่ 4.19 มาพิจารณาร่วมกับความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งทั้ง 2 ลักษณะ ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน จากตารางที่ 4.13 และ 4.22 ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 4.23 และสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4.15

ตารางที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัดเฉลี่ย ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ และความสามารถในการ ชะละลายของก้อนหล่อแข็ง ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร และก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ปริมาณปูนซีเมนต์รวมขี้เถ้าแกลบ (g)	ปริมาณหินฝุ่น (g)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (mg)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กิโลกรัม (gCr/kgCRHA)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	อัตราทดแทนตะกอน Cr ในหินฝุ่น (%)
500.0	1750.0	0.010	0	0	0
500.0	1575.0	0.212	0.696	26.500	10
500.0	1400.0	0.293	1.392	17.235	20
500.0	1225.0	0.321	2.088	13.125	30(0)
500.0	1225.0	0.810	5.516	6.429	30(20)
500.0	1225.0	1.890	8.945	9.220	30(40)
500.0	1225.0	3.280	12.373	11.509	30(60)
500.0	1225.0	4.760	15.802	13.005	30(80)
500.0	1225.0	5.860	19.231	13.110	30(100)

หมายเหตุ (-) หมายถึงอัตราร้อยละการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตร

Copyright by Mahidol University



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัดหลังการสกัด ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ และความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร และก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยทำการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

จากตารางที่ 4.23 และภาพที่ 4.15 พบว่า ในช่วงปริมาณโครเมียม 0 ถึง 2.088 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) เป็นช่วงของการหล่อแข็งที่กำหนดให้มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ซึ่งก้อนหล่อแข็งแต่ละอัตราทดแทนจะมีหินฝุ่นที่ไม่เท่ากัน หากก้อนหล่อแข็งมีปริมาณหินฝุ่นมากเท่าใด ปริมาณช่องว่างระหว่างหินฝุ่นในก้อนหล่อแข็งก็จะมากตามไปด้วย และเมื่อช่องว่างระหว่างหินฝุ่นมีมากตัวยึดประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน จะต้องทำหน้าที่ยึดประสานหินฝุ่นซึ่งเป็นส่วนผสมหลักก่อน จากการพิจารณาปริมาณหินฝุ่นและความสามารถในการชะละลายที่ค่าปริมาณโครเมียม

Copyright by Mahidol University

0, 0.696, 1.392 และ 2.088 กรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) พบว่ามีปริมาณหินฝุ่นในส่วนผสม เท่ากับ 1575, 1400 และ 1225 กรัม และมีความสามารถในการชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็งเท่ากับ 26.500, 17.235 และ 13.125 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมโครเมียม (mgCr/gCr) ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการชะละลายแปรผกผันกับปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ แต่แปรผันตามปริมาณหินฝุ่น ทำให้อาจสรุปได้ว่าความสามารถในการชะละลายแปรผันตามปริมาณช่องว่างของก้อนหล่อแข็งที่แปรผันตามปริมาณของหินฝุ่น

ส่วนในช่วงของปริมาณโครเมียม 5.516 ถึง 19.231 กรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (gCr/kgCRHA) เป็นช่วงของการหล่อแข็งที่กำหนดให้มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาณคงที่ตลอด และทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมโดยการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ซึ่งก้อนหล่อแข็งแต่ละอัตราทดแทนจะมีหินฝุ่นที่เท่ากัน ปริมาณช่องว่างระหว่างหินฝุ่นในก้อนหล่อแข็งจึงมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ตัวยึดประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ทำหน้าที่ยึดประสานหินฝุ่นในก้อนหล่อแข็งแต่ละอัตราทดแทนในระดับที่ใกล้เคียงกัน จากการพิจารณาปริมาณหินฝุ่นและความสามารถในการชะละลายในช่วงของปริมาณโครเมียม 5.516, 8.945, 12.373, 15.802 และ 19.231 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ พบว่า ก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก มีปริมาณหินฝุ่นในส่วนผสมคงที่เท่ากับ 1225 กรัม มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดในในน้ำสกัด เท่ากับ 0.810, 1.890, 3.280, 4.760 และ 5.860 มิลลิกรัม และมีความสามารถในการชะละลายออกจากก้อนหล่อแข็ง เท่ากับ 6.429, 9.220, 11.509, 13.005 และ 13.110 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ พบว่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำสกัด และความสามารถในการชะละลายจะแปรผันตาม ปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ ทำให้อาจสรุปได้ว่า ความสามารถในการชะละลายแปรผันตามปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งที่แปรผันตามปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ

Copyright by Mahidol University

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการกำจัดของเสียอันตรายที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ ด้วยวิธีการหล่อแข็ง (Solidification) ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม (ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และหินฝุ่น) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงอัตราการทดแทนของเสียอันตรายในรูปตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และยังศึกษาถึงระดับของปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่เหมาะสม ที่จะสามารถบำบัดด้วยวิธีการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกดังกล่าวได้ โดยจะต้องมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่มากเกินกว่ามาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ใหม่ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่สามารถใช้ในการก่อสร้างอาคาร และสิ่งปลูกสร้าง ในลักษณะเหนือระดับน้ำใต้ดินโดยมีวัสดุฉาบผิว ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทำคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราส่วนผสมส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม สามารถบำบัดของเสียอันตรายที่เป็นตะกอนโครเมียมในลักษณะการหล่อแข็ง โดยการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโครเมียม ของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ประมาณร้อยละ 53 ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน โดยมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 110.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร(ksc) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1940.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) และมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เท่ากับ 0.321

Copyright by Mahidol University

มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) แบบเฉลี่ยพื้นที่รวม ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 มีความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งเทียบเท่ากับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

5.1.2 ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม 19.231 กรัมโครเมียม สามารถนำมาบำบัดของเสียอันตรายด้วยการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้ง-บล็อก ที่มีอัตราส่วนผสมส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1 : 1: 7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์รวมขี้เถ้าแกลบเท่ากับ 1 กิโลกรัม โดยที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 136.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) มีความหนาแน่นเท่ากับ 1810.37 กิโลกรัมต่อลูกบาก์ศเมตร (kg/cu.m.) และปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เท่ากับ 2.930 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) แบบเฉลี่ยพื้นที่รวม ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 มีความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งเทียบเท่ากับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

5.1.3 ความสามารถในการชะละลายโครเมียม ขึ้นอยู่กับปริมาณหินฝุ่นในอัตราส่วนผสม ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่าง หรือความพรุนของก้อนหล่อแข็ง โดยผลการศึกษาสรุปได้ว่า การหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ซึ่งมีอัตราส่วนผสมส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม โดยการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร จะเป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่สามารถบำบัดของเสียอันตรายในรูปตะกอนโครเมียม ด้วยวิธีการหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน โดยมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 110.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร(ksc) มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 1940.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) และมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เท่ากับ

Copyright by Mahidol University

0.321 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) แบบเฉลี่ยพื้นที่รวม ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 มีความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งเทียบเท่ากับคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร (kg/cu.m.) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อก และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จากการทดสอบการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

5.1.4 กำลังรับแรงอัดไม่มีความสัมพันธ์ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจากการชะละลายของโครเมียมของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการบ่มชื้น 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ด้วยวิธีสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

5.1.5 ค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ที่มีอัตราการทดแทนหินฝุ่นด้วยตะกอนโครเมียม ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จะมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับลักษณะของคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete) ประเภทคอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight Concrete) สำหรับการทำคอนกรีตบล็อกที่กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศ์กเมตร

5.1.6 การสกัดด้วยวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) และวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) จะมีผลจากการสกัดที่ใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำการวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลา และเครื่องมือในการทดสอบ ทำให้ไม่สามารถศึกษาได้ครบทุกประเด็น ซึ่งมีประเด็นที่น่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

5.2.1 ทำการศึกษาการชะละลายในระยะยาว (Long Term Leaching) ด้วยวิธี Accumulated Test เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานก้อนหล่อแข็ง ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก ในการก่อสร้าง

Copyright by Mahidol University

5.2.2 ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนวัสดุปอซโซลานจากแกลบเป็นเถ้าลอย หรือ Silica flume เพื่อทำให้ก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก มีกำลังรับแรงอัด หรือกำลังรับแรงดัดที่ดีขึ้น

5.2.3 ทำการศึกษาหาส่วนผสมเพิ่ม เช่น ทราย หรือดินลูกรัง ในการลดช่องว่างของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก

5.2.4 ทำการศึกษาการหล่อแข็งของเสียอันตราย ในรูปคอนกรีตบล็อกลักษณะอื่นๆ เช่น บล็อกรูปตัวหนอน บล็อกสี่เหลี่ยมสำหรับปูพื้น เป็นต้น

5.2.5 ทำการศึกษาการหล่อแข็งของเสียอันตราย ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อก กับโลหะหนักชนิดอื่น เช่น ตะกั่ว นิกเกิล เป็นต้น

Copyright by Mahidol University

รายการอ้างอิง

1. จิราภรณ์ อรัณยะนาค. สาเหตุที่ทำให้อิฐและหินบนโบราณสถานผุเปื่อย. วารสารวิทยาศาสตรและเทคโนโลยี 2538; 10(2): 18-28.
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. โรงงานสีเขียว รักษ์สิ่งแวดล้อมคืนสมดุลย์สู่ธรรมชาติ. ใน: ฐาน-เศรษฐกิจ. ฐานเศรษฐกิจเอ็กเซกคิวทีฟ มีเดีย. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ; 2542.
3. Company Profile Daisin Group of Companies from: http:// www.daisin.co.th [accession 2001 May 20]
4. Nelson Leonaed Nemerow and Avijit Dasgupta . Industrial and Hazardous waste treatment . New York : Van Nostrand Reinhold ; 1991.
5. บุญยงค์ โลห์วงศ์วัฒน. การจัดการของเสียที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม. วิศวกรรมสาร ฉบับ ว.ส.ท.เทคโนโลยี 2536; 46(3) : 69-73.
6. Pojasek RB. Using Solidification as a Waste Detoxication Process. In Exner JH. Detoxication of Hazardous Waste. Michigan: Ann Arbor Scince; 1982.
7. Jeffrey LM, Lawrence AS, Karl WN, Susan EB, Arun RG, Bruce MS and Other. The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials. Florida: Lewis Publishers; 1995.
8. Conner JR. Chemical fixation and solidification of Hazardous waste. New York: Van Nostrand Reinhold; 1990.
9. Davis LM and David AC. Introduction to environmental engineering. Singapore: McGraw-Hill; 1991.
10. Sujiwattana P. Factor affecting solidification of Hazardous waste materials [Master of Scince]. Phathumthani: Environment Engineering Program, Asian Instute of Technology ; 1987.
11. Shukrow AJ , Pajak AP and Touhill CJ. Hazardous waste Leachate management manual . Park Ridge. New Jersey: Noyes Data Corporation; 1982 อ้างใน รักษพล ชูชาติ . การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซด์โดยการทำให้เป็นก้อน [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2538.

Copyright by Mahidol University

12. Pojasek RB. Solid-Waste Disposal : Solidification, Industrial Wastewater and Solidwaste Engineering. New York: Mcgraw-Hill; 1979. อ้างใน พจนีย์ ขุมมงคลม สิรินทรเทพ เต้าประยูร. การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการหล่อแข็ง. กรุงเทพฯ: สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2542. ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทกำหนดเรื่อง ประจำปี 2538-2539. สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

13. Robert AC. Standard Handbook of Environmental Engineering. 2nd ed. New York: Mcgraw-Hill; 1998.

14. Loo YC , Numityongskul P and Karasudhi P. Economical Rice Husk Ash Concrete. Building Research and Practice: Asian Institute of Technology : p. 233-238

15. Leangon K. Solidification of Hazardous Waste by Cement-based techniques [Master of Engineering]. Phathumthani: Environment Program, Asian Instute of Technology; 1993.

16. Srivastava AK. Solidification of Hazadous Waste from Pesticide Industries by Using Cementitious Binders [Master of Engineering]. Phathumthani: Environment Engineering Program, Asian Instute of Technology; 1989.

17. Rijal SP. Solidification of Laboratory waste using cementitous binders [Master of Engineering]. Phathumthani: Environment Engineering Program, Asian Instute of Technology; 1990.

18. Thompson DW, Malone PG and Jones LW. Survey of available stabilization technology. In : Pojasek RB , editor. Toxic and hazardous waste disposal. Michigan : ann Arbor Science; 1979. P. 9-12.

19. Sollars CJ and Perry R. Cement-based stabilization of waste: Practical and theoretical considerations. J. IWEM 1989; 3:125-131.

20. Bishop PL. Leaching of inorganic hazardous constituents from stabilized/solidified hazardous wastes. Hazardous Waste & Hazardous Materials 1988; 5(2):129-143.

21. Poon CS, Clark AI, Peter CJ and Perry R. Mechanics of Matal Fixation and Leaching by Cement Base Fixation Process. Waste Management & Research 1985; 3:127-142.

22. Neville AM. Properties of Concrete, Pitman Pubblishing Latd. 3th ed. London: Longman Scientific & Technical; 1981.

Copyright by Mahidol University

23. วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8 .กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สัมพันธ์พาณิชย์; 2539.

24. Mindress S and Yong JF. Concrete. New Jersey: Prentice Hall ; 1981.

25. ปริญญา จินดาประเสริฐ และ สหรัฐ พุทธวรรณะ. การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบซัลไฟด์ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า. วารสารวิศวกรรมสาร 2538; 48(4):65-70.

26. American Society for Testing and Materials . Standard C618-94a . Annual Book of ASTM Standards Section 04 Volumn 04.02 ; 1995.

27. ไกรทอง ชัยศิริวิเรนทร์, นฤชา เกษมสำราญ, พรพิมล มณีรัตน์, วิจิตร เอมมาโนชญ์ และ สกล แซ่แต้. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยการใช้ขี้เถ้าแกลบ [วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2534.

28. วัชระ ทองเจริญ, วรชัย จิรานุชัยวัฒนา และอนุภาพ สุภาพันธ์. การผลิตและทดสอบคุณสมบัติบางประการของซีเมนต์เถ้าแกลบ. วารสารสงขลานครินทร์ 2529; 8(4):479-484.

29. Damer SA. Rice Husk Ash as Pozzolanic Material [Master of Engineering]. Phathumthani: Civil Engineering Programme , Asian Instute of Technology; 1976.

30. สำนักงานสถิติแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี. สมุดสถิติรายปี ประเทศไทย 2537 (ฉบับย่อ)

31. Justin A de Silva. Current Stage of Research on Reactivity of Rice Husk Ash Cement [Master of Engineering]. Phathumthani: Civil Engineering Programme, Asian Instute of Technology; 1981.

32. Moayad N. Al-Khalaf and Hana AY. Use of rice Husk ash in concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete 1984; 6(4):241-248.

33. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, พิชัย นิมิตยงสกุล และ พมน สีหาบุตร. เครื่องบดขี้เถาแกลบ. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตรและเทคโนโลยี 2537; 4(1) :53-78.

34. สาโรจน์ ดำรงศีล. แบบจำลองในการทำนายกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมขี้เถ้าแกลบ [วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต] . ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต; 2541.

35. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล. วัสดุผสมซีเมนต์จากหินปูนและแกลบ. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตรและเทคโนโลยี 2537; 4(2): 105-118.

36. Cook DJ. Cementitous Materials Based on Rice Husk Ash. In : Rice Husk Ask Cement. India : Regional Center for Technology Transfer; 1975.

Copyright by Mahidol University

37. Metha PK. Properties of Blended Cement made from Rice Husk. ACI Journal 1977; 74 (4): 440-442.

38. ประณต กุลประสูตร . เทคนิคงานปูน-คอนกรีต . กรุงเทพฯ: บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด; 2541.

39. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก (มอก. 60-2516) . 2517.

40. Perket CL and Webster WC. Hazardous Solid Waste Testing : First Conference . ASTM STP 760 : American Society of Testing and Materials . อ้างในวิชัย มาชูตระกูล . การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบ [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2538.

41. U.S. EPA . Toxicity Characteristic Leaching Procedure [Online]2000:[PDF file]. Available from: http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/1xxx.htm [accession 2000 Aug 14]

42. Bented and Verna อ้างใน. ชูชัย เทียวประสงค์. การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2539.

43. Shin HS, Her NY and Koo JK. Design optimization for solidification of hazardous waste. Hazardous Waste & Hazardous Material 1988; 5(3) :239-250.

44. Jaggi N. Solidification of Hazardous Waste Using Cementitious Binders [Master of Engineering] . Phathumthani: Environment Engineering Programe , Asian Instute of Technology; 1988.

45. Lung CC. Solidification of Heavy Metels Using Cement and Rice Husk Ask [Master of Engineering]. Phathumthani: Environment Engineering Program, Asian Institute of Technology; 1989.

46. Youn JH. Solidification of Laborratory Waste by Using Ordinary Protland Cement and Lime-Rice Husk ask Cement [Master of Engineering]. Phathumthani: Environment Engineering Program, Asian Institute of Technology; 1990.

Copyright by Mahidol University

47. Shin H.S, Koo JK, Kim JO and Yoon SP. Leaching characteristics of heavy metal from solified sludge under seawater condition. Hazadous Waste & Hazadous Materials 1990; 7(3): 261-271.

48. Chang KY and Bishop P. Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching. Hazadous Waste & Hazadous Materials 1992; 9(2):163-171.

49. Chang KY and Bishop PL. Sorption, Important in Stabilized/Solidified Waste Forms. Hazardous waste & Hazardous Materials 1992 ; 9(3):289-296.

50. วิชัย มาชูตระกูล. การหล่อแข็ง Cr (VI) และ Cr (III) โดยใช้ปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบ [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจองเกล้าธนบุรี; 2538.

51. ประทีป เลียงเพ็ชร. การหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจองเกล้าธนบุรี; 2538.

52. ชูชัย เทียวประสงค์. การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจองเกล้าธนบุรี; 2539.

53. Hillier SR , Sangha CM , Plunkett BA and Walden PJ. Long-term leaching of toxic trace metals from portland cement concrete . Cement and Cencerte Research 1999; 29: 515-521.

54. บรุฉัตร ฉัตรวีระ และ พีรชล สุภัททธรรม. คุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ. ใน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 . 10-12 พฤษภาคม 2543;โรงแรมดุสิตรีสอร์ท และโปโลคลับ ชะอำ: สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์; 2543. MAT 19-24.

55. ปริญญา จินดาประเสริฐ , สมศักดิ์ เมตะนันท์ , สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และ ธีรวัฒน์ สินศิริ. คุณสมบัติของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบดำ. ใน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 . 10-12 พฤษภาคม 2543 ; โรงแรมดุสิตรีสอร์ท และโปโลคลับ ชะอำ: สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์; 2543. MAT 47-57.

Copyright by Mahidol University

56. พจนีย์ ขุมมงคล และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร. การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการหล่อแข็ง. กรุงเทพ: ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2542

57. Roy A., Eaton H.C., Cartladge F.K. and Tittlebaum M.E. . Solidification/Stabilization of Heavy Metal Sludge by Portland Cement/Fly Ash Binding Mixture . Hazadous Waste & Hazadous Materials 1992; 8 (1) : 33-40

58. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเมธี เวชารัตรา . ผลกระทบของโครเมียมต่อกำลังของวัสดุจำพวกซีเมนต์ . ภาควิชาวิศวกรรมโยธา .สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. อ้างในวิชัย มาชูตระกูล . การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบ [วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2538.

Copyright by Mahidol University

ภาคผนวก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม

ตัวอย่างที่	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปรับปริมาตรหลังการ Digest (ml)	ปรับปริมาตร 20 เท่า มีปริมาณโครเมียม (mgCr/l)	ปริมาณโครเมียมในปริมาตรหลังการ Digest (mgCr/l)	ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม (mgCr/gCr)
1	1.0001	100.00	3.558	7.12	7.12
2	1.0002	100.00	2.706	5.41	5.41
3	1.0001	100.00	3.213	6.43	6.43
4	1.0000	100.00	2.739	5.48	5.48
5	1.0003	100.00	2.978	5.96	5.95
6	1.0001	100.00	3.131	6.26	6.26
เฉลี่ย	1.0001	100.00	3.054	6.11	6.108

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด จากการสกัดตะกอนโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมี่ยมในน้ำสกัด (mgCr/l)	ปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียม 50 กรัม (gCr)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณโครเมี่ยมในน้ำสกัด (mgCr)
1	7.760	0.305	1.000	7.760
2	7.955	0.305	1.000	7.955
3	11.160	0.305	1.000	11.160
4	11.450	0.305	1.000	11.450
5	7.085	0.305	1.000	7.085
6	6.745	0.305	1.000	6.745
ค่าเฉลี่ย	8.693	0.305	1.000	8.693

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมตะกอนโครเมียม เท่ากับ 6.108 mg/g

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น และตะกอนโครเมียม

ตัวอย่างที่	น้ำหนักหินฝุ่นอบแห้ง (g)	น้ำหนักหินฝุ่นชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักตะกอน Cr อบแห้ง (g)	น้ำหนักตะกอน Cr ชั่งในน้ำ (g)	ค่าความถ่วงจำเพาะหินฝุ่น	ค่าความถ่วงจำเพาะตะกอน Cr
1	5543.5	3660.0	2620.0	1443.5	2.94	2.23
2	5498.0	3601.5	2784.5	1593.5	2.90	2.34
3	5674.5	3789.5	2546.5	1389.5	3.01	2.20
4	5128.5	3240.5	2681.0	1509.5	2.72	2.29
5	5346.5	3461.0	2498.5	1369.5	2.84	2.21
6	5143.0	3253.5	2542.0	1389.5	2.72	2.21
7	5271.0	3389.0	2487.5	1359.5	2.80	2.21
8	5149.5	3265.5	2384.0	1314.5	2.73	2.23
9	5481.0	3595.0	2591.0	1416.5	2.91	2.21
10	5264.0	3376.0	2464.5	1326.5	2.79	2.17
ค่าเฉลี่ย	5350.0	3463.2	2560.0	1411.2	2.84	2.23

ตารางแสดงการหาความชื้นในตะกอนโครเมียม หลังอบที่อุณหภูมิ 105 $^{\circ}$C จนแห้ง

ตัวอย่างที่	น้ำหนักภาชนะอบแห้ง (g)	น้ำหนักตะกอนโครเมียม (g)	น้ำหนักตะกอนโครเมียมอบแห้งรวมภาชนะ (g)	ปริมาณความชื้นในตะกอนโครเมียม (%)
1	52.2	10.0	56.5	57.1
2	60.0	10.0	63.4	66.3
3	50.3	10.0	54.6	57.2
4	51.3	10.0	55.8	55.2
5	56.4	10.0	61.2	51.5
6	45.3	10.0	48.9	64.1
ค่าเฉลี่ย	52.6	10.0	56.7	58.6

Copyright by Mahidol University

ตารางคำนวณอัตราส่วนผสมต่อการอัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร จำนวน 1 ก้อน

ปูน (g)	เส้นเกลบ (g)	หินฝุ่น (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	ปริมาตรหินฝุ่น (cu.m.)	ร้อยละทดแทนปริมาตรหินฝุ่น	ปริมาตรหินฝุ่นที่ถูกทดแทน (cu.m.)	น้ำหนักหินฝุ่นที่ถูกทดแทน (g)	น้ำหนักตะกอนโครเมียมที่นำมาทดแทน (g)	ปริมาณความชื้นในตะกอนโครเมียมหลังอบแห้ง	ปริมาณน้ำในหักน้ำในตะกอนโครเมียม (g)	น้ำหนักหินฝุ่นคงเหลือ (g)
250.00	250.00	1750.00	337.50	0.00062	0	0.00000	0.0	0.0	58.6	337.5	1750.00
250.00	250.00	1750.00	337.50	0.00062	10	0.00006	175.0	137.5	58.6	257.0	1575.00
250.00	250.00	1750.00	337.50	0.00062	20	0.00012	350.0	275.0	58.6	176.4	1400.00
250.00	250.00	1750.00	337.50	0.00062	30	0.00019	525.0	412.5	58.6	95.9	1225.00
250.00	250.00	1750.00	337.50	0.00062	40	0.00025	700.0	550.0	0.0	337.5	1050.00

หมายเหตุ 1. ในการผสมอัตราส่วนที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร ใช้ตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง ซึ่งทำการหาปริมาณความชื้นในตะกอน ได้ค่าเท่ากับ ร้อยละ 58.6

2. ในการผสมอัตราส่วนที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ในอัตราร้อยละ 40 โดยปริมาตร ได้ทำการนำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง ซึ่งจะมีปริมาณความชื้นในตะกอน เท่ากับ ร้อยละ 0

Copyright by Mahidol University

สำนักหอสมุด

ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 0 โดยปริมาตร

ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	3	1225.6	70.20	2463.0	5.645	80.4	2009.70
2	3	1199.3	70.20	2441.5	5.985	85.3	2035.72
3	3	1188.1	70.98	2449.5	6.015	84.7	2061.69
4	3	1188.1	71.83	2452.5	5.820	81.0	2064.21
5	3	1202.9	70.92	2442.5	6.245	88.1	2030.57
6	3	1199.3	71.83	2423.5	6.355	88.5	2020.71
7	7	1199.2	71.83	2433.0	10.342	144.0	2028.79
8	7	1195.5	72.80	2401.0	9.586	131.7	2008.29
9	7	1187.9	70.98	2395.5	9.246	130.3	2016.55
10	7	1221.9	71.83	2426.5	9.663	134.5	1985.89
11	7	1165.7	70.20	2425.5	9.862	140.5	2080.80
12	7	1182.6	70.83	2388.5	10.224	144.3	2019.67
13	14	1217.9	70.98	2422.5	11.102	156.4	1989.03
14	14	1199.3	71.76	2407.2	10.562	147.2	2007.12
15	14	1188.1	72.54	2424.5	11.245	155.0	2040.65
16	14	1199.3	71.76	2418.5	10.426	145.3	2016.55
17	14	1202.9	70.98	2421.4	10.845	152.8	2013.03
18	14	1187.9	70.20	2410.5	11.072	157.7	2029.18
19	28	1180.5	72.80	2324.5	13.610	187.0	1969.01
20	28	1199.2	70.98	2462.0	12.350	174.0	2052.97
21	28	1199.2	70.20	2401.5	11.694	166.6	2002.52
22	28	1188.1	70.83	2413.0	10.985	155.1	2030.97
23	28	1180.5	70.76	2394.5	10.910	154.2	2028.31
24	28	1191.6	70.83	2418.0	12.045	170.1	2029.18
25	56	1158.6	70.20	2560.0	17.785	253.3	2209.60
26	56	1133.0	71.20	2495.5	14.802	207.9	2202.64
27	56	1133.0	67.64	2460.0	12.104	178.9	2171.30
28	56	1122.3	69.42	2426.0	14.373	207.0	2161.67
29	56	1133.0	69.42	2475.5	13.521	194.8	2184.81
30	56	1147.6	68.40	2520.5	13.021	190.4	2196.32
31	90	1176.0	69.42	2389.0	14.308	206.1	2031.53
32	90	1185.2	69.42	2427.5	14.357	206.8	2048.21
33	90	1190.6	70.20	2442.0	15.962	227.4	2051.07
34	90	1223.5	72.00	2557.0	19.603	272.3	2089.84
35	90	1176.0	71.20	2482.5	14.451	203.0	2110.88
36	90	1179.8	70.20	2510.5	17.784	253.3	2127.90

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	3	1133.0	70.98	2230.5	6.055	85.3	1968.58
2	3	1143.8	72.00	2296.5	5.705	79.2	2007.75
3	3	1184.4	71.76	2381.0	4.725	65.8	2010.23
4	3	1114.3	70.00	2244.5	6.235	89.1	2014.28
5	3	1180.5	72.54	2373.5	4.859	67.0	2010.52
6	3	1184.4	71.76	2416.5	5.841	81.4	2040.20
7	7	1129.1	70.20	2289.5	8.102	115.4	2027.80
8	7	1158.6	68.64	2233.5	6.730	98.0	1927.79
9	7	1194.5	70.40	2378.5	9.265	131.6	1991.16
10	7	1158.6	72.00	2237.5	7.854	109.1	1931.24
11	7	1173.3	69.42	2346.0	6.945	100.0	1999.42
12	7	1176.5	71.20	2267.5	8.426	118.3	1927.36
13	14	1129.1	69.42	2270.00	9.125	131.4	2010.53
14	14	1150.4	70.98	2365.00	10.210	143.8	2055.89
15	14	1150.5	70.20	2261.00	9.305	132.5	1965.18
16	14	1158.6	69.42	2295.00	7.940	114.4	1980.87
17	14	1139.8	71.20	2194.50	8.120	114.0	1925.35
18	14	1150.5	70.20	2204.00	7.946	113.2	1915.64
19	28	1169.6	70.20	2353.0	12.561	178.9	2011.87
20	28	1184.4	69.16	2277.5	7.205	104.2	1922.84
21	28	1136.6	70.20	2300.5	12.534	178.5	2023.98
22	28	1169.5	68.40	2347.0	12.534	183.2	2006.89
23	28	1195.5	70.98	2352.5	10.542	148.5	1967.72
24	28	1169.5	70.20	2302.0	9.834	140.1	1968.41
25	56	1176.0	69.42	2334.5	13.842	199.4	1985.19
26	56	1176.0	67.64	2350.0	13.673	202.1	1998.37
27	56	1223.5	68.40	2316.0	11.496	168.1	1892.87
28	56	1157.3	67.86	2263.0	10.434	153.8	1955.42
29	56	1150.8	66.88	2324.0	12.452	186.2	2019.53
30	56	1161.3	68.64	2312.5	11.985	174.6	1991.27
31	90	1186.6	69.42	2283.0	13.665	196.8	1923.92
32	90	1165.3	69.42	2310.5	13.184	189.9	1982.79
33	90	1186.8	71.20	2272.5	15.081	211.8	1914.78
34	90	1201.6	70.20	2284.0	12.924	184.1	1900.83
35	90	1190.7	68.40	2297.5	13.793	201.7	1929.55
36	90	1176.0	69.42	2288.0	14.211	204.7	1945.64

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	3	1114.3	63.96	2083.0	2.216	34.6	1869.35
2	3	1146.1	68.25	2178.5	2.680	39.3	1900.73
3	3	1135.5	69.60	2072.5	3.642	52.3	1825.15
4	3	1165.5	71.20	2245.5	4.124	57.9	1926.58
5	3	1150.5	68.36	2099.0	2.791	40.8	1824.38
6	3	1150.5	69.42	2087.5	3.122	45.0	1814.38
7	7	1154.6	69.42	2194.0	3.915	56.4	1900.25
8	7	1161.3	71.20	2231.5	4.155	58.4	1921.61
9	7	1133.0	68.64	2142.0	3.615	52.7	1890.47
10	7	1154.7	69.42	2161.5	3.792	54.6	1871.95
11	7	1154.7	70.20	2209.0	4.086	58.2	1913.09
12	7	1180.1	69.42	2178.5	3.819	55.0	1846.10
13	14	1114.3	69.42	2025.5	5.235	75.4	1817.74
14	14	1143.8	70.20	2156.5	6.805	96.9	1885.35
15	14	1180.1	69.42	2246.0	6.705	96.6	1903.30
16	14	1146.8	70.20	2050.0	5.186	73.9	1787.55
17	14	1150.5	69.42	2098.5	6.249	90.0	1823.95
18	14	1180.1	68.40	2046.0	6.370	93.1	1733.82
19	28	1126.0	70.20	2145.5	7.421	105.7	1905.42
20	28	1093.1	68.64	2112.0	6.904	100.6	1932.18
21	28	1107.8	69.42	2057.5	5.321	76.6	1857.35
22	28	1188.1	70.98	2145.5	6.846	96.4	1805.82
23	28	1158.6	68.40	2095.4	5.594	81.8	1808.59
24	28	1143.8	69.42	2098.5	6.243	89.9	1834.65
25	56	1193.5	68.64	2167.5	8.587	125.1	1816.04
26	56	1176.0	71.20	2278.0	11.870	166.7	1937.14
27	56	1197.7	69.42	2298.5	10.806	155.7	1919.13
28	56	1171.9	66.88	2207.5	8.268	123.6	1883.73
29	56	1176.0	67.64	2242.5	9.894	146.3	1906.81
30	56	1176.0	69.42	2232.0	10.526	151.6	1898.02
31	90	1186.8	67.64	2261.0	9.793	144.8	1905.09
32	90	1201.6	68.40	2255.5	12.294	179.7	1877.11
33	90	1186.8	69.42	2236.5	12.441	179.2	1884.45
34	90	1186.8	67.64	2198.5	10.778	159.3	1852.43
35	90	1186.8	67.64	2248.5	11.926	176.3	1894.56
36	90	1179.8	68.40	2252.4	12.037	176.0	1909.14

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	3	1154.7	69.42	2149.5	2.657	38.3	1861.56
2	3	1133.0	67.64	2148.5	2.635	39.0	1896.36
3	3	1179.8	69.42	2272.0	3.070	44.2	1925.68
4	3	1147.6	71.20	2222.0	3.190	44.8	1936.21
5	3	1165.5	70.20	2195.5	2.645	37.7	1883.69
6	3	1158.4	68.40	2179.5	2.846	41.6	1881.47
7	7	1150.5	68.64	2143.5	4.185	61.0	1863.06
8	7	1143.6	70.40	2079.5	3.995	56.7	1818.32
9	7	1118.3	69.42	2164.0	4.505	64.9	1935.05
10	7	1136.6	70.20	2185.0	4.660	66.4	1922.37
11	7	1133.0	69.42	2094.5	3.896	56.1	1848.55
12	7	1150.5	67.64	2123.0	4.124	61.0	1845.24
13	14	1103.8	67.86	2095.5	3.925	57.8	1898.50
14	14	1143.8	69.42	2160.0	5.540	79.8	1888.41
15	14	1165.5	71.20	2117.0	5.870	82.4	1816.33
16	14	1143.8	69.42	2089.5	4.921	70.9	1826.78
17	14	1118.4	68.64	2098.0	4.623	67.4	1875.88
18	14	1122.3	67.64	2124.5	4.625	68.4	1893.02
19	28	1125.6	69.42	2152.5	8.075	116.3	1912.25
20	28	1107.6	68.64	2180.0	7.040	102.6	1968.25
21	28	1165.4	71.20	2301.5	8.902	125.0	1974.93
22	28	1122.3	68.64	2142.5	7.125	103.8	1909.06
23	28	1143.8	68.64	2215.5	7.924	115.4	1936.93
24	28	1111.6	66.88	2197.0	6.580	98.4	1976.43
25	56	1186.8	69.42	2127.5	8.124	117.0	1792.61
26	56	1197.7	69.42	2225.0	8.243	118.7	1857.76
27	56	1123.5	70.20	2314.0	12.523	178.4	2059.56
28	56	1172.1	68.64	2209.0	10.942	159.4	1884.72
29	56	1186.8	66.88	2214.5	10.854	162.3	1865.91
30	56	1176.0	67.64	2259.5	12.457	184.2	1921.41
31	90	1186.8	69.42	2233.5	12.131	174.7	1881.92
32	90	1190.6	70.20	2142.0	10.902	155.3	1799.09
33	90	1172.1	66.88	2088.0	9.708	145.2	1781.48
34	90	1150.8	68.64	2012.5	10.582	154.2	1748.84
35	90	1186.8	69.42	2132.5	11.250	162.1	1796.82
36	90	1165.3	69.42	2089.0	10.695	154.1	1792.70

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น ของก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 40 โดยปริมาตร

ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2.)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	3	1154.7	68.64	2105.0	1.187	17.3	1823.02
2	3	1165.5	70.20	2114.5	1.600	22.8	1814.19
3	3	1169.2	70.20	2229.5	1.315	18.7	1906.86
4	3	1129.1	69.42	2072.5	1.487	21.4	1835.60
5	3	1165.5	68.64	2105.0	1.216	17.7	1806.04
6	3	1139.8	69.42	2076.5	1.521	21.9	1821.82
7	7	1097.2	68.64	1983.0	1.877	27.3	1807.33
8	7	1118.3	70.40	2111.0	2.142	30.4	1887.65
9	7	1180.5	70.20	2242.0	2.287	32.6	1899.13
10	7	1136.8	70.20	2088.5	2.241	31.9	1837.17
11	7	1136.8	68.40	2054.5	1.962	28.7	1807.27
12	7	1133.0	69.42	2104.0	1.762	25.4	1856.94
13	14	1143.8	69.42	2053.5	3.955	57.0	1795.30
14	14	1122.3	69.42	2015.0	3.620	52.1	1795.45
15	14	1180.5	70.20	2327.5	4.710	67.1	1971.56
16	14	1195.5	70.98	2238.5	4.815	67.8	1872.37
17	14	1173.3	69.16	2245.5	4.120	59.6	1913.76
18	14	1169.6	70.20	2212.0	4.564	65.0	1891.31
19	28	1154.7	68.64	2022.0	3.390	49.4	1751.14
20	28	1118.3	68.64	2051.0	3.660	53.3	1834.00
21	28	1115.0	69.42	2104.5	4.280	61.7	1887.41
22	28	1072.4	67.86	2009.0	3.170	46.7	1873.44
23	28	1100.9	69.42	2079.5	3.925	56.5	1888.87
24	28	1100.7	70.20	2043.0	4.132	58.9	1856.02
25	56	1186.8	69.42	2122.5	2.549	36.7	1788.40
26	56	1172.1	68.64	2102.5	4.551	66.3	1793.86
27	56	1176.0	69.42	1925.5	3.286	47.3	1637.39
28	56	1121.5	70.20	2133.5	4.826	68.7	1902.41
29	56	1176.0	67.64	2108.0	4.153	61.4	1792.58
30	56	1176.0	67.64	2095.5	3.856	57.0	1781.81
31	90	1150.8	68.64	2015.0	7.115	103.7	1751.02
32	90	1172.1	68.64	2060.0	4.915	71.6	1757.60
33	90	1165.3	67.64	1924.5	4.308	63.7	1651.53
34	90	1172.1	66.88	2041.5	4.661	69.7	1741.81
35	90	1172.1	68.64	2002.0	5.010	73.0	1708.11
36	90	1150.8	66.88	2012.5	4.925	73.6	1748.84

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดก่อน และหลังการสกัด รวมทั้งปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0 โดยปริมาตร

อัตราการทดแทนตะกอนในหินฝุ่น	ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชิ้น	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
0%	1	3	2.86	9.37	less than 0.050
0%	2	3	2.89	9.43	less than 0.050
0%	3	3	2.91	9.46	less than 0.050
0%	4	3	2.87	9.38	less than 0.050
0%	5	3	2.90	9.42	less than 0.050
0%	6	3	2.91	9.48	less than 0.050
0%	7	7	2.91	9.21	less than 0.050
0%	8	7	2.88	9.06	less than 0.050
0%	9	7	2.89	9.16	less than 0.050
0%	10	7	2.87	9.21	less than 0.050
0%	11	7	2.86	9.27	less than 0.050
0%	12	7	2.84	9.11	less than 0.050
0%	13	14	2.91	8.63	less than 0.050
0%	14	14	2.90	8.56	less than 0.050
0%	15	14	2.86	8.79	less than 0.050
0%	16	14	2.89	8.57	less than 0.050
0%	17	14	2.85	8.43	less than 0.050
0%	18	14	2.87	8.49	less than 0.050
0%	19	28	2.86	7.74	less than 0.050
0%	20	28	2.89	7.65	less than 0.050
0%	21	28	2.87	7.52	less than 0.050
0%	22	28	2.90	7.73	less than 0.050
0%	23	28	2.86	7.79	less than 0.050
0%	24	28	2.91	7.81	less than 0.050
0%	25	56	2.88	7.20	less than 0.050
0%	26	56	2.89	7.13	less than 0.050
0%	27	56	2.87	7.16	less than 0.050
0%	28	56	2.87	7.04	less than 0.050
0%	29	56	2.86	7.06	less than 0.050
0%	30	56	2.91	7.14	less than 0.050
0%	31	90	2.90	6.69	less than 0.050
0%	32	90	2.87	6.78	less than 0.050
0%	33	90	2.88	6.61	less than 0.050
0%	34	90	2.86	6.64	less than 0.050
0%	35	90	2.91	6.76	less than 0.050
0%	36	90	2.86	6.63	less than 0.050

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดก่อน และหลังการสกัด รวมทั้งปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 10 โดยปริมาตร

อัตราการทดแทนตะกอนในหินฝุ่น	ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
10%	1	3	2.89	9.41	0.142
10%	2	3	2.87	9.52	0.149
10%	3	3	2.86	9.45	0.138
10%	4	3	3.01	9.49	0.144
10%	5	3	2.88	9.54	0.147
10%	6	3	2.89	9.64	0.142
10%	7	7	2.88	9.35	0.160
10%	8	7	2.85	9.15	0.144
10%	9	7	2.87	9.26	0.162
10%	10	7	2.86	9.31	0.148
10%	11	7	2.88	9.38	0.172
10%	12	7	2.89	9.24	0.174
10%	13	14	2.87	8.53	0.196
10%	14	14	2.88	8.64	0.234
10%	15	14	2.91	8.85	0.187
10%	16	14	2.90	8.66	0.181
10%	17	14	2.89	8.57	0.167
10%	18	14	2.86	8.74	0.174
10%	19	28	2.89	7.87	0.241
10%	20	28	2.87	7.93	0.231
10%	21	28	2.91	7.86	0.194
10%	22	28	2.86	7.91	0.186
10%	23	28	2.90	7.98	0.204
10%	24	28	2.86	7.91	0.216
10%	25	56	2.87	7.35	0.207
10%	26	56	2.87	7.06	0.194
10%	27	56	2.89	7.41	0.208
10%	28	56	2.88	7.30	0.192
10%	29	56	2.90	7.09	0.181
10%	30	56	2.86	7.39	0.214
10%	31	90	2.89	6.75	0.201
10%	32	90	2.91	6.66	0.194
10%	33	90	2.90	6.80	0.186
10%	34	90	2.89	6.73	0.183
10%	35	90	2.86	6.78	0.197
10%	36	90	2.89	6.74	0.201

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดก่อน และหลังการสกัด รวมทั้งปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 20 โดยปริมาตร

อัตราการทดแทนตะกอนในหินฝุ่น	ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
20%	1	3	2.89	9.64	0.171
20%	2	3	2.88	9.59	0.183
20%	3	3	2.84	9.66	0.175
20%	4	3	2.86	9.44	0.184
20%	5	3	2.89	9.74	0.162
20%	6	3	2.87	9.66	0.145
20%	7	7	2.88	9.44	0.174
20%	8	7	2.86	9.37	0.171
20%	9	7	2.89	9.41	0.175
20%	10	7	2.88	9.39	0.249
20%	11	7	2.84	9.42	0.183
20%	12	7	2.86	9.34	0.169
20%	13	14	2.85	9.14	0.220
20%	14	14	2.89	9.15	0.212
20%	15	14	2.91	9.02	0.243
20%	16	14	2.87	9.08	0.232
20%	17	14	2.88	9.11	0.217
20%	18	14	2.86	9.07	0.227
20%	19	28	2.86	7.84	0.303
20%	20	28	2.85	8.10	0.197
20%	21	28	2.89	7.85	0.384
20%	22	28	2.87	7.97	0.245
20%	23	28	2.88	8.22	0.337
20%	24	28	2.91	8.04	error (0.797)
20%	25	56	2.86	7.84	0.221
20%	26	56	2.85	7.87	0.214
20%	27	56	2.89	7.89	0.216
20%	28	56	2.91	7.86	0.216
20%	29	56	2.86	7.88	0.216
20%	30	56	2.87	7.82	0.214
20%	31	90	2.89	7.16	0.193
20%	32	90	2.87	6.98	0.209
20%	33	90	2.91	7.23	0.183
20%	34	90	2.90	7.06	0.216
20%	35	90	2.91	6.71	0.189
20%	36	90	2.89	6.77	0.219

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดก่อน และหลังการสกัด รวมทั้งปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

อัตราการทดแทนตะกอนในหินฝุ่น	ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
30%	1	3	2.88	9.68	0.153
30%	2	3	2.89	9.67	0.179
30%	3	3	2.87	9.63	0.158
30%	4	3	2.89	9.64	0.176
30%	5	3	2.86	9.66	0.183
30%	6	3	2.87	9.65	0.174
30%	7	7	2.85	9.66	0.171
30%	8	7	2.87	9.63	0.159
30%	9	7	2.86	9.64	0.204
30%	10	7	2.87	9.62	0.161
30%	11	7	2.86	9.65	0.174
30%	12	7	2.88	9.61	0.280
30%	13	14	2.87	9.48	0.259
30%	14	14	2.89	9.45	0.237
30%	15	14	2.89	9.49	0.246
30%	16	14	2.91	9.48	0.251
30%	17	14	2.86	9.47	0.238
30%	18	14	2.84	9.51	0.209
30%	19	28	2.87	8.81	0.327
30%	20	28	2.88	8.55	0.353
30%	21	28	2.84	8.19	0.341
30%	22	28	2.86	8.23	0.294
30%	23	28	2.87	8.62	0.324
30%	24	28	2.90	8.83	0.286
30%	25	56	2.87	7.56	0.243
30%	26	56	2.86	7.43	0.237
30%	27	56	2.89	7.10	0.204
30%	28	56	2.85	7.68	0.223
30%	29	56	2.86	7.55	0.205
30%	30	56	2.89	7.22	0.231
30%	31	90	2.89	6.47	error (0.440)
30%	32	90	2.89	6.43	0.238
30%	33	90	2.86	6.46	0.244
30%	34	90	2.90	6.44	0.185
30%	35	90	2.91	6.34	0.213
30%	36	90	2.87	6.44	0.178

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดง ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสกัดก่อน และหลังการสกัด รวมทั้งปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดหลังจากการสกัดก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 40 โดยปริมาตร

อัตราการทดแทนตะกอนในหินฝุ่น	ตัวอย่างที่	อายุการบ่มชื้น	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
40%	1	3	2.89	11.05	0.169
40%	2	3	2.86	11.09	0.196
40%	3	3	2.88	11.16	0.185
40%	4	3	2.87	11.18	0.201
40%	5	3	2.86	11.16	0.193
40%	6	3	2.86	11.12	0.176
40%	7	7	2.86	11.05	0.213
40%	8	7	2.89	10.99	0.203
40%	9	7	2.88	11.03	0.198
40%	10	7	2.87	11.04	0.231
40%	11	7	2.89	10.96	0.248
40%	12	7	2.88	11.06	0.187
40%	13	14	2.84	10.93	0.236
40%	14	14	2.83	10.94	0.265
40%	15	14	2.87	10.97	0.241
40%	16	14	2.89	11.12	0.259
40%	17	14	2.87	11.31	0.238
40%	18	14	2.89	10.98	0.264
40%	19	28	2.89	10.42	0.368
40%	20	28	2.89	10.49	0.321
40%	21	28	2.88	10.37	0.334
40%	22	28	2.86	10.37	0.357
40%	23	28	2.90	10.46	0.369
40%	24	28	2.84	10.36	0.348
40%	25	56	2.84	7.71	0.249
40%	26	56	2.85	7.73	0.251
40%	27	56	2.89	7.68	0.227
40%	28	56	2.86	7.69	0.261
40%	29	56	2.87	7.72	0.238
40%	30	56	2.88	7.66	0.253
40%	31	90	2.91	6.93	0.235
40%	32	90	2.90	6.72	0.224
40%	33	90	2.89	6.91	0.232
40%	34	90	2.86	6.69	0.224
40%	35	90	2.85	6.65	0.226
40%	36	90	2.86	6.97	0.227

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมในน้ำสกัด จากการสกัดที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรต่างๆ ที่มีอายุการบ่มชื้น 90 วัน ด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox)

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร	ปริมาณโครเมียมหลังจากการสกัดด้วยวิธี EP Tox			
	#1	#2	#3	mean
10%	0.226	0.228	0.226	**0.227**
20%	0.240	0.239	0.235	**0.238**
30%	0.189	0.199	0.189	**0.192**
40%	0.263	0.271	0.249	**0.261**

ตารางเปรียบเทียบการสกัดก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นต่างๆ ด้วยวิธีการสกัด Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) กับวิธีการสกัด Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตัวอย่างที่	ปริมาณโครเมียมหลังจากการสกัดด้วยวิธี EP Tox				ปริมาณโครเมียมหลังจากการสกัดด้วยวิธี TCLP			
	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
1	0.226	0.24	0.189	0.263	0.237	0.235	0.241	0.269
2	0.228	0.239	0.199	0.271	0.238	0.24	0.198	0.318
3	0.226	0.235	0.189	0.249	-	-	-	-
เฉลี่ย	**0.227**	**0.238**	**0.192**	**0.261**	**0.238**	**0.238**	**0.220**	**0.294**

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรต่างๆ

อัตราการทดแทนตะกอน Cr ด้วยหินฝุ่นโดยปริมาตร (%)	น้ำหนักตะกอน Cr ที่นำมาทดแทน (g)	น้ำหนักตะกอน Cr แห้ง (g)	ปริมาณ Cr ในตะกอนที่นำมาทดแทน (mgCr)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)	น้ำหนักก้อนหล่อแข็งเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (g)	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็งที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (mgCr ต่อก้อนหล่อแข็ง)
0	0.00	0.00	0.0	2445.42	0.000	2411.7	0.000	2417.4	0.000	2402.3	0.000	2489.6	0.000	2468.1	0.000
10	137.50	56.97	348.0	2323.75	0.150	2292.1	0.152	2264.9	0.154	2322.1	0.150	2316.7	0.150	2289.3	0.152
20	275.00	113.94	695.9	2127.67	0.327	2186.1	0.318	2103.8	0.331	2109.1	0.330	2237.7	0.311	2242.1	0.310
30	412.51	170.92	1043.9	2194.50	0.476	2131.6	0.490	2114.1	0.494	2198.4	0.475	2224.9	0.469	2116.3	0.493
40	550.01	227.89	1391.8	2117.17	0.657	2097.2	0.664	2182.0	0.638	2051.5	0.678	2081.3	0.669	2009.3	0.693

Copyright by Mahidol University

ตารางที่แสดงความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากการสกัดตะกอนโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตัวอย่างที่	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัด (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr 50 กรัม (g)	ปริมาณ น้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัด (mgCr)	ความสามารถ ในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละใน การชะละลาย
1	7.760	0.305	1.000	7.760	25.443	2.544
2	7.955	0.305	1.000	7.955	26.082	2.608
3	11.160	0.305	1.000	11.160	36.590	3.659
4	11.450	0.305	1.000	11.450	37.541	3.754
5	7.085	0.305	1.000	7.085	23.230	2.323
6	6.745	0.305	1.000	6.745	22.115	2.211
ค่าเฉลี่ย	8.693	0.305	1.000	8.693	28.500	2.850

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมตะกอนโครเมียม เท่ากับ 6.108 mg/g

การคำนวณความสามารถในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม

1. ในการสกัดด้วยวิธี TCLP ใช้ตะกอนโครเมียมแห้ง	50	g
2. ใช้น้ำสกัด #2 : pH 2.88 +/- 0.05 ปริมาณ	1	liter
3. ตะกอนโครเมียมมีโครเมียมทั้งหมด	6.108	mg Cr/g dry sludge
4. ดังนั้นจะมีโครเมียมทั้งหมด ในตะกอนโครเมียมแห้ง 50 กรัม เท่ากับ	0.305	g
5. ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดตะกอนโครเมียม ด้วยวิธี TCLP	8.693	mg/l
6. ดังนั้นมีปริมาณโครเมียมทั้งหมด ในน้ำสกัด 1 ลิตร เท่ากับ	8.693	mg
7. ค่าความสามารถในการชะละลายโครเมียม จากตะกอนโครเมียม เท่ากับ	28.500	mg Cr/g dry sludge
8. ร้อยละในการชะละลายโครเมียมจากตะกอนโครเมียม เท่ากับ	2.850	

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็ง ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.144	0.144	18.000	1.800
20	0.016	1.000	0.170	0.170	10.625	1.063
30	0.024	1.000	0.171	0.171	7.125	0.713
40	0.033	1.000	0.187	0.187	5.667	0.567
ค่าเฉลี่ย	0.016	1.000	0.168	0.168	10.354	1.035

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ 0.150 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ 0.327 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ 0.476 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ 0.657 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็ง ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.160	0.160	20.000	2.000
20	0.016	1.000	0.187	0.187	11.688	1.169
30	0.025	1.000	0.192	0.192	7.680	0.768
40	0.033	1.000	0.213	0.213	6.455	0.645
ค่าเฉลี่ย	0.016	1.000	0.188	0.188	11.456	1.146

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ 0.152 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ 0.318 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ 0.490 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ 0.664 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็ง ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.190	0.190	23.750	2.375
20	0.017	1.000	0.225	0.225	13.235	1.324
30	0.025	1.000	0.240	0.240	9.600	0.960
40	0.032	1.000	0.251	0.251	7.844	0.784
ค่าเฉลี่ย	0.016	1.000	0.226	0.227	13.607	1.361

หมายเหตุ	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ	0.154	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ	0.331	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ	0.494	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ	0.638	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.212	0.212	26.500	2.650
20	0.017	1.000	0.293	0.293	17.235	1.724
30	0.024	1.000	0.321	0.321	13.375	1.338
40	0.034	1.000	0.350	0.350	10.294	1.029
ค่าเฉลี่ย	0.017	1.000	0.294	0.294	16.851	1.685

หมายเหตุ	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ	0.150	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ	0.330	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ	0.475	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
	ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ	0.678	(mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.199	0.199	24.875	2.488
20	0.016	1.000	0.216	0.216	13.500	1.350
30	0.023	1.000	0.224	0.224	9.739	0.974
40	0.033	1.000	0.247	0.247	7.485	0.748
ค่าเฉลี่ย	0.016	1.000	0.221	0.222	13.900	1.390

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ 0.150 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ 0.311 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ 0.469 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ 0.669 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน

อัตราการทดแทน	ปริมาณ Cr ในก้อนหล่อแข็ง 50 กรัม (g)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (mgCr/l)	ปริมาณ Cr ในน้ำสกัดเฉลี่ยที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (mgCr)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.000	1.000	less than 0.01	less than 0.01	N/D	N/D
10	0.008	1.000	0.199	0.199	24.875	2.488
20	0.016	1.000	0.211	0.211	13.188	1.319
30	0.025	1.000	0.217	0.217	8.680	0.868
40	0.035	1.000	0.244	0.244	6.971	0.697
ค่าเฉลี่ย	0.017	1.000	0.218	0.218	13.428	1.343

หมายเหตุ ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 10 % เท่ากับ 0.152 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 20 % เท่ากับ 0.310 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 30 % เท่ากับ 0.493 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)
ปริมาณโครเมียมก้อนหล่อแข็งที่มีการทดแทน 40 % เท่ากับ 0.693 (mgCr/g ก้อนหล่อแข็ง)

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลาย และประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของการบำบัดด้วยวิธีการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อก ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร

อัตราทดแทนตะกอน Cr (%)	ความสามารถในการชะละลายก่อนการบำบัด (mgCr/gCr)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 3 วัน (%)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 7 วัน (%)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 14 วัน (%)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (%)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 56 วัน (%)	ความสามารถในการชะละลายหลังการบำบัดที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (mgCr/gCr)	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายที่ระยะการบ่มชื้น 90 วัน (%)
10	28.500	18.000	36.842	20.000	29.825	23.750	16.667	26.500	7.018	24.875	12.719	24.875	12.719
20	28.500	10.625	62.719	11.688	58.991	13.235	53.560	17.235	39.525	13.500	52.632	13.188	53.728
30	28.500	7.125	75.000	7.680	73.053	9.600	66.316	13.375	53.070	9.739	65.828	8.680	69.544
40	28.500	5.667	80.117	6.455	77.352	7.844	72.478	10.294	63.880	7.485	73.737	6.971	75.539
เฉลี่ย	28.500	10.354	63.670	11.456	59.805	13.607	52.255	16.851	40.873	13.900	51.229	13.428	52.883

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงผลการทดลองการหาปริมาณโครเมียมในโครเมียมสังเคราะห์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปรับปริมาตรหลังการ Digest (ml)	ปรับปริมาตร 5000 เท่า มีปริมาณ Cr (mg/l)	ปริมาณ Cr ในปริมาตรหลังการ Digest (mg/l)	ปริมาณ Cr ใน Cr สังเคราะห์ (mg/g)
1	1.0001	50	0.231	57.750	57.744
2	1.0003	50	0.224	56.000	55.983
3	1.0004	50	0.227	56.750	56.727
4	1.0000	50	0.242	60.500	60.500
5	1.0000	50	0.246	61.500	61.500
6	1.0003	50	0.235	58.750	58.732
เฉลี่ย	1.0002	50	0.234	58.542	58.531

ตารางแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของโครเมียมสังเคราะห์

ตัวอย่างที่	น้ำหนักน้ำ (g)	น้ำหนักตะกอน (g)	ค่าความถ่วงจำเพาะโครเมียมสังเคราะห์
1	506.1	506.1	1.0000
2	506.8	506.8	1.0014
3	507.5	507.8	1.0034
4	506.8	506.6	1.0010
5	506.6	506.2	1.0002
6	505.6	506.5	1.0008
7	506.2	505.6	0.9990
8	507.1	506.3	1.0004
9	505.7	506.4	1.0006
10	506.9	506.8	1.0014
ค่าเฉลี่ย	506.5	506.5	1.0008

หมายเหตุ ขนาดปริมาตรกระบอก ที่ใช้ในการหาความถ่วงจำเพาะ

สูง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 113.5 มิลลิเมตร

ปริมาตรกระบอก เท่ากับ 0.000506088 ลูกบาก์ศเมตร

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงการหาความชื้นในตะกอนโครเมียม หลังอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนแห้ง

ตัวอย่างที่	น้ำหนักภาชนะอบแห้ง (g)	น้ำหนักตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ (g)	น้ำหนักตะกอนโครเมียมสังเคราะห์อบแห้งรวมภาชนะ (g)	ปริมาณความชื้นในตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ (%)
1	52.3	10.0	61.2	11.4
2	53.2	10.0	61.9	12.6
3	50.4	10.0	59.3	11.1
4	58.7	10.0	67.6	11.2
5	43.1	10.0	52.1	10.2
6	49.9	10.0	58.7	11.6
ค่าเฉลี่ย	51.3	10.0	60.1	11.4

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงคำนวณอัตราส่วนผสมก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร

ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	หินฝุ่น (g)	น้ำหนักตะกอน Cr ที่นำมาทดแทน (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	ปริมาตรตะกอน Cr (cu.m.)	อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วย Cr สังเคราะห์ โดยปริมาตร	ปริมาตรตะกอน Cr ที่ถูกทดแทน (g)	น้ำหนักตะกอน Cr สังเคราะห์ (g)	น้ำหนักตะกอน Cr ที่ถูกทดแทน (g)	น้ำหนักตะกอน Cr ที่เหลือ (g)	ปริมาณน้ำในตะกอน Cr ที่เหลือ (g)	ปริมาณน้ำในตะกอน Cr สังเคราะห์ (g)	ปริมาณน้ำที่ใช้หักน้ำในตะกอนทั้งหมด (g)
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	0	0.00000	0.0	0.0	412.5	241.6	0.0	95.9
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	20	0.00004	37.1	82.5	330.0	193.3	4.2	140.0
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	40	0.00007	74.1	165.0	247.5	145.0	8.4	184.1
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	60	0.00011	111.2	247.5	165.0	96.6	12.6	228.2
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	80	0.00015	148.2	330.0	82.5	48.3	16.8	272.4
250	250	1225	412.5	337.5	0.00019	100	0.00019	185.3	412.5	0.0	0.0	21.0	316.5

หมายเหตุ ตะกอน Cr สังเคราะห์ มี Total Cr 58.53 mg/g dry sludge ค่าความถ่วงจำเพาะหินฝุ่น 2.84

ตะกอน Cr มี Total Cr 6.11 mg/g dry sludge ค่าความถ่วงจำเพาะตะกอนโครเมียม 2.23

ความชื้นตะกอนโครเมียม 58.57 % ค่าความถ่วงจำเพาะตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ 1.00

ความชื้นตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ 11.35 %

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

ตัวอย่างที่	อัตราทดแทนตะกอน Cr ด้วยตะกอน Cr สังเคราะห์ โดยปริมาตร	ปริมาตร (cu.cm.)	พื้นที่ผิว (cm^2)	น้ำหนัก (g)	แรงอัดสูงสุด (ton)	กำลังรับแรงอัด (ksc.)	ความหนาแน่น (kg/cu.m.)
1	0	1155.952	68.64	2199.5	7.955	115.9	1902.76
2	0	1175.96	69.42	2195.5	8.234	118.6	1866.99
3	20	1125.713	67.86	2187.5	9.490	139.8	1943.21
4	20	1223.540	68.40	2189.0	9.351	136.7	1789.07
5	40	1179.800	68.40	2179.5	9.752	142.6	1847.35
6	40	1175.960	70.20	2183.5	9.995	142.4	1856.78
7	60	1190.600	69.42	2175.5	9.887	142.4	1827.23
8	60	1186.820	68.80	2167.0	9.978	145.0	1825.89
9	80	1179.800	69.42	2165.5	9.258	133.4	1835.48
10	80	1197.676	69.60	2157.5	9.796	140.7	1801.41
11	100	1186.820	69.42	2154.5	9.684	139.5	1815.36
12	100	1190.600	68.40	2149.5	9.148	133.7	1805.39

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงผลการสกัดก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

ตัวอย่างที่	อัตราทดแทนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตร	pH น้ำสกัดก่อนสกัด	pH น้ำสกัดหลังสกัด	ปริมาณโครเมียม (mg/l)
1	0	2.89	8.83	0.314
2	0	2.90	8.86	0.316
1	20	2.88	8.19	0.408
2	20	2.87	8.21	0.402
1	40	2.87	7.79	0.938
2	40	2.89	7.76	0.952
1	60	2.89	7.73	1.660
2	60	2.88	7.75	1.620
1	80	2.89	8.24	2.480
2	80	2.87	8.26	2.280
1	100	2.90	8.36	2.820
2	100	2.88	8.38	3.040

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

ปูน (g)	เส้นเกลว (g)	หินฝุ่น (g)	ปริมาณน้ำที่กันน้ำใน ตะกอน ทั้งหมด (g)	อัตราทดแทน ปริมาตร ตะกอน Cr ด้วย ตะกอน Cr สังเคราะห์	น้ำหนัก ตะกอน Cr สังเคราะห์ (g)	น้ำหนัก ตะกอน Cr (g)	น้ำหนัก ตะกอน Cr สังเคราะห์ แห้ง (g)	น้ำหนัก ตะกอน Cr แห้ง (g)	ปริมาณ Cr ใน ตะกอน Cr สังเคราะห์ แห้ง (mg)	ปริมาณ Cr ใน ตะกอน Cr แห้ง (mg)	ปริมาณ Cr ใน ตะกอน Cr ทั้งหมด (mg)	น้ำหนัก เฉลี่ยก้อน หล่อแข็ง (g)	ปริมาณ Cr ในก้อน หล่อแข็ง (mg/g)
250	250	1225	95.9	0	0.0	412.5	0.000	170.916	0.0	1043.9	1043.9	2197.50	0.475
250	250	1225	140.0	20	37.1	330.0	32.855	136.732	1923.1	835.1	2758.2	2188.25	1.260
250	250	1225	184.1	40	74.1	247.5	65.710	102.549	3846.1	626.3	4472.4	2181.50	2.050
250	250	1225	228.2	60	111.2	165.0	98.566	68.366	5769.2	417.5	6186.7	2171.25	2.849
250	250	1225	272.4	80	148.2	82.5	131.421	34.183	7692.2	208.8	7901.0	2161.50	3.655
250	250	1225	316.5	100	185.3	0.0	164.276	0.000	9615.3	0.0	9615.3	2152.00	4.468

หมายเหตุ ตะกอน Cr สังเคราะห์ มี Total Cr 58.531 mg/g dry sludge ค่าความต่างจำเพาะหินฝุ่น 2.84

ตะกอน Cr มี Total Cr 6.11 mg/g dry sludge ค่าความต่างจำเพาะตะกอนโครเมียม 2.23

ความชื้นตะกอนโครเมียม 58.57 % ค่าความต่างจำเพาะตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ 1.00

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงปริมาณโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบ (CRHA) ในก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียมที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

ปูน (g)	เถ้าแกลบ (g)	อัตราทดแทนปริมาตรตะกอน Cr ด้วยโครเมียมสังเคราะห์ (%)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr ทั้งหมด (mg)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กรัม (mgCr/gCRHA)	ปริมาณ Cr ต่อ CHRA 1 กิโลกรัม (gCr/kgCRHA)	กำลังรับแรงอัด mean(ksc)	ปริมาณ Cr ในตะกอน Cr และ Cr สังเคราะห์ (mg)	น้ำหนักเฉลี่ยของก้อนหล่อแข็ง ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน (g)	ปริมาณ Cr ต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง (mg Cr/g ก้อนหล่อแข็ง)
250.0	250.0	0	1043.87	2.088	2.088	117.3	1043.871	2197.5	0.475
250.0	250.0	20	2758.15	5.516	5.516	138.3	2758.152	2188.3	1.260
250.0	250.0	40	4472.43	8.945	8.945	142.5	4472.434	2181.5	2.050
250.0	250.0	60	6186.72	12.373	12.373	143.7	6186.715	2171.3	2.849
250.0	250.0	80	7901.00	15.802	15.802	137.1	7900.996	2161.5	3.655
250.0	250.0	100	9615.28	19.231	19.231	136.6	9615.278	2152.0	4.468

Copyright by Mahidol University

ตารางแสดงความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งตะกอนโครเมียม ที่มีการทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่น ร้อยละ 30 โดยปริมาตร โดยมีการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์ในอัตราร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยปริมาตร ที่ระยะการบ่มชื้น 28 วัน

อัตราการทดแทนตะกอนโครเมียมด้วยโครเมียมสังเคราะห์โดยปริมาตร (%)	ปริมาณ Cr ทั้งหมดในก้อนหล่อแข็ง (mgCr/gก้อนหล่อแข็ง)	ปริมาณโครเมียมในก้อนหล่อแข็ง 100 กรัม (g)	ปริมาณโครเมี่ยมในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg/l)	ปริมาณน้ำสกัด (l)	ปริมาณโครเมี่ยมในน้ำสกัดหลังการสกัด (mg)	ความสามารถในการชะละลาย (mgCr/gCr)	ร้อยละในการชะละลาย
0	0.475	0.0480	0.315	2.000	0.630	13.125	1.313
20	1.260	0.126	0.405	2.000	0.810	6.429	0.643
40	2.050	0.205	0.945	2.000	1.890	9.220	0.922
60	2.849	0.285	1.640	2.000	3.280	11.509	1.151
80	3.655	0.366	2.380	2.000	4.760	13.005	1.301
100	4.468	0.447	2.930	2.000	5.860	13.110	1.311

Copyright by Mahidol University

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายสุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา
วัน เดือน ปีเกิด	5 สิงหาคม 2508
จังหวัด และประเทศที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, พ.ศ. 2526-2530 วิทยาศาสตรบัณฑิต (ภูมิศาสตร์) มหาวิทยาลัยมหิดล, พ.ศ. 2541-2545 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาชุมชนและชนบท)
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	พ.ศ. 2532 – ปัจจุบัน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ตำแหน่ง : ครูปฏิบัติการ

Copyright by Mahidol University

Executive summary

1. Introduction

Hazardous wastes cause significant environmental problems. One of treatment method normally used to stabilize hazardous wastes is cement based solidification prior to disposed in secure landfills, However, this method is costly. It is possible to apply the cement based solidification technique to stabilize hazardous wastes in the form of concrete block for using as construction materials

2. Objection

The objective of this study was to apply cement based solidification technique to stabilize hazardous wastes in form of concrete block for using as construction material. In the experiments, replacement ratios by volume of fine aggregate by chromium waste were conducted to find the highset ratio for making concrete block. Chromium content in ordinary Portland cement and rice husk ash was also considered. The concrete block, which include chromium waste, must meet compressive strength according to Thai Industrial Product Standard no. 60-2516 and leaching chromium according to Notification of The Ministry of Industry no.6 (B.E. 2540)

3. Instrument

1. Atomic Absorption Spectrometer (AAS) Brand "Varian" Model "Spectr AA 220"
2. Cinva ram block molding machine Manufacturing by K. Thai Consultant and Machinery co.ltd.
3. Universal Testing Machine capacity 100 Tons Brand "Shimadzu" Model UH-100A
4. Rotary Extractor made by Environment Engineering Department, Rangsit University

4. Method

The normal concrete block made from cement, rice husk ash and fine aggregate in the ratio 1:1:7 and mixed with 15 percent of water by weight. In the experiment, the fine aggregate was replaced by chromium waste in the ratio of 0, 10, 20, 30 and 40 percent by volume. At humidity curing interval of 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days, the concrete block density, compressive strength (ASTM C109) and leaching characteristic test (TCLP) had been conducted. The selected ratio was the highest replacement ratio of waste which satisfies the compressive strength standard and leaching characteristic. This ratio was used for the next experiment.

Due to the low chromium content waste, synthetic chromium was prepared and used to replace chromium waste 0, 20, 40, 60, 80 and 100 percent by volume to

Copyright by Mahidol University

increase the chromium content of the waste to study the highest holding capacity of chromium in concrete block.

5. Results

1. The highest replacement ratio of fine aggregate with chromium waste is 30 percent by volume. At 28-humidity curing days, the compressive strength was 110.3 kg/cm^2 (Thai Industrial Product Standard no. 60-2516, not less than 85 kg/cm^2), leaching chromium was 0.321 mg/l (Notification of the Ministry of Industry no.6 (B.E. 2540), less than 5 mg/l) and specific gravity was 1940.3 kg/m^3.

2. The highest holding capacity of chromium in concrete block with 30 percent replacement ratio in volume of fine aggregate by chromium waste was 19.231 gram chromium in 1 kilogram cement and rice husk ash. The compressive strength was 136.6 kg/cm^2 (Thai Industrial Product Standard no. 60-2516, not less than 85 kg/cm^2), Leaching chromium was 2.930 mg/l (Notification of the Ministry of Industry no.6 (B.E. 2540), less than 5 mg/l), and specific gravity was 1810.4 kg/m^3.

3. It was found that the leachability of chromium from concrete block was depending on its porosity which relied on the percentage of fine aggregate.

6. Reference

1. Pojasek RB. Using Solidification as a Waste Detoxication Process. In Exner JH. Detoxication of Hazardous Waste. Michigan: Ann Arbor Scince; 1982.

2. Robert AC. Standard Handbook of Environmental Engineering. 2nd ed. New York: Mcgraw-Hill; 1998.

3. Loo YC , Numityongskul P and Karasudhi P. Economical Rice Husk Ash Concrete. Building Research and Practice: Asian Institute of Technology : p. 233-238

4. Neville AM. Properties of Concrete, Pitman Pubblishing Latd. 3th ed. London: Longman Scientific & Technical; 1981.

5. Bishop PL. Leaching of inorganic hazardous constituents from stabilized/solidified hazardous wastes. Hazardous Waste & Hazardous Materials 1988; 5(2):129-143.

Copyright by Mahidol University