การใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลาน สำหรับการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียม ในรูปอิฐบล็อกประสานสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

The Utilization of Rice Hush Ash and Fly Ash as Pozzolanic Materials for Stabilization and Solidification of Chromium Sludge in the Form of Concrete Interlocking Block for Using as Construction Materials

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ*

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ถนนพหลโยธิน ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ถนนพหลโยธิน ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

Sompong Hirunmasuwan*

Department of Environmental Engineering, School of Engineering, Rangsit University,

Phaholyothin Road, Lak-Hok, Muang, Pathum Thani 12000

Supachai Isarangkul Na Ayuthaya

Department of Civil Engineering, School of Engineering, Rangsit University,

Phaholyothin Road, Lak-Hok, Muang, Pathum Thani 12000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลานสำหรับการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะให้อยู่ในรูปของอิฐบล็อกประสานที่มีค่ากำลังต้านแรงอัดสูงเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 สำหรับใช้ในการก่อสร้างกำแพงที่มีการฉาบปูน และอิฐบล็อกประสานที่ได้จะต้องมีปริมาณโครเมียมถูกชะละลายออกมาด้วยวิธีทดสอบ TCLP ไม่เกิน 5 มก./ล. อิฐบล็อกประสานผลิตขึ้นจากส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ วัสดุปอตโซลาน (เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย) และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 โดยน้ำหนัก ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักรวม การปรับ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** masuwan@hotmail.com

เสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมทำโดยนำกากตะกอนโครเมียมไปทดแทนหินฝุ่นโดยปริมาตรที่อัตราทดแทนต่าง ๆ แล้วอัดเป็นก้อนอิฐบล็อกประสานแล้วนำไปบ่มชื้น เมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดของอิฐบล็อกที่อัตราการทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 5 มก./ล. หลังจาการบ่มชื้น 28 วัน อิฐบล็อกประสานที่ผ่านเกณฑ์ค่ากำลังต้านแรงอัดที่กำหนด และมีอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมสูงสุด คืออิฐบล็อกผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 และอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 20 และเถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลานที่ดีกว่าเถ้าลอยในการการปรับเสถียรและหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสาน ที่อัตราส่วนผสมเท่ากันอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบมีกำลังต้านแรงอัดสูงกว่าอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอย และเถ้าแกลบสามารถลดการชะละลายของโครเมียมออกจากอิฐบล็อกประสานได้ดีกว่าเถ้าลอย

คำสำคัญ : เถ้าแกลบ; เถ้าลอย; กากตะกอนโครเมียม; การหล่อแข็ง; อิฐบล็อกประสาน

Abstract

The objective of this research was to compare the utilization of rice hush ash (RHA) and fly ash (FA) as pozzolanic materials for stabilization and solidification of chromium sludge from electroplating wastewater treatment plant in the form of concrete interlocking block for using as construction materials. The compressive strength of concrete interlocking block must comply with the Thai Industrial Product Standards (TIS) no. 60-2516 and chromium concentration in the leachate after extraction by TCLP method must be lower than 5 mg/L. The concrete interlocking blocks were made from the mixture of ordinary portland cement, pozzolanic material (RHA or FA) and fine aggregate in the ratio of 1:1:7 by weight and mixed with 15 percent of water by total weight. The fine aggregate was replaced with chromium sludge in different ratios by volume. After 28 days of wet curing, the RHA concrete block with highest replacement ratio of 30% had compressive strength higher than TIS no. 60-2516 and the FA concrete block with highest replacement ratio of 20% had compressive strength higher than TIS no. 60-2516. RHA was more effective than FA in term of compressive strengths of solidified concrete blocks and reduction of chromium leachability.

Keywords: rice husk ash; fly ash; chromium sludge; solidification; concrete interlocking block

1. บทนำ

ในประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการชุบผิวชิ้นงานด้วยโครเมียมทำให้มีไอออนของโครเมียมละลายอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Cr^{6+} จึงต้องบำบัดด้วยกระบวนการรีดักชันเปลี่ยนให้เป็น Cr^{3+} และตกตะกอนในรูปของ $Cr(OH)_3$ ทำให้ปริมาณโครเมียมในกากตะกอนน้ำเสียขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนโครเมียมที่มีในน้ำเสีย กากตะกอนโครเมียจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายเมื่อนำมาทดสอบการชะละลาย

ด้วยวิธี TCLP (toxicity characteristic leaching procedure) ตามวิธีของ USEPA Method 1311 และพบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าเกิน 5 มก./ล. [1] วิธีกำจัดกากตะกอนโครเมียมซึ่งจัดเป็นของเสียอันตรายประเภทโลหะหนักคือการปรับเสถียรด้วยวิธีการหล่อแข็ง โดยนำกากตะกอนโครเมียมไปผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน (เช่น เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย) ให้เป็นก้อนหล่อแข็ง [2] และก้อนหล่อแข็งนี้ต้องมีสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานของการนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย คือ สามารถรับกำลังอัดได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กก./ซม^2 ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตัน/ลบ.ม.และเมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP จะต้องมีความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดต่ำกว่า 5 มก./ล. [3,4] แทนที่จะนำก้อนหล่อแข็งซึ่งปรับเสถียรแล้วและจัดว่าไม่ใช่ของเสียอันตรายนี้ไปฝังกลบ อาจเป็นประโยชน์กว่าถ้าพัฒนาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมให้มีกำลังต้านแรงอัดสูงขึ้นสำหรับนำไปใช้ในการก่อสร้าง [5,6] เช่น การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปของอินเตอร์ล็อกกิ้งบล็อกหรืออิฐบล็อกประสาน ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างสำเร็จรูปที่มีเดือยบล็อกเพื่อให้ก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและมีรูสำหรับหยอดปูนเกร้าท์เพิ่มความแข็งแรง ใช้สำหรับก่อสร้างระบบผนังรับน้ำหนักหรือกำแพงที่มีการฉาบด้วยปูนซีเมนต์ ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับมนุษย์ต่ำ ก้อนอิฐบล็อกประสานผลิตได้จากส่วนผสมของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนท์ วัสดุปอตโซลาน (เช่น เถ้าแกลบหรือเถ้าลอย) และหินฝุ่นในอัตราส่วน 1:1:7 โดยน้ำหนักและผสมน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักทั้งหมด อัดเป็นอิฐบล็อกด้วยเครื่องอัดแห้งซิลวาแรม (Cinva Ram) โดยนำกากตะกอนโครเมียมไปทดแทนสัดส่วนของหินฝุ่นสำหรับอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสาน [7]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมให้อยู่ในรูปอิฐบล็อกประสานที่มีกำลังต้านแรงอัดสูงและสามารถนำไปใช้ก่อสร้างได้ และหาอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมสูงสุดในหินฝุ่นโดยปริมาตร โดยอิฐบล็อกประสานที่ได้ต้องมีกำลังต้านแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 [8] ซึ่งใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงเหนือระดับดินที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ และต้องมีปริมาณโครเมียมถูกชะละลายออกมาไม่เกิน 5 มก./ล. เมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ประเภท 1 ตราช้าง ผลิตโดย บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด กากตะกอนโครเมี่ยมได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า นำกากตะกอนไปตากแดดให้แห้ง บดให้ละเอียดแล้วนำไปวิเคราะห์หาความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และปริมาณโครเมียม เถ้าแกลบได้จากเตาเผาของโรงงานผลิตอิฐมอญจังหวัดอยุธยา นำมาเข้าเครื่องบดแบบหมุนและร่อนผ่านตะแกรง No. 325 เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าบางกรวย จังหวัดนนทบุรี หินฝุ่นได้จากโรงโม่หินแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี นำมาล้างด้วยการราดน้ำแล้วตากให้แห้ง และใช้งานโดยไม่คัดขนาด ผสมอัตราส่วนของปูนซิเมนต์ เถ้าแกลบ (หรือเถ้าลอย) และหินฝุ่นในอัตราส่วน 1:1:7 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมที่ความเร็วรอบต่ำประมาณ 140 รอบต่อนาที จนเข้ากันดีแล้วค่อย ๆ ผสมน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักทั้งหมด ปรับความเร็วเครื่องผสมเป็น 285 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำส่วนผสมอัดเป็นบล็อกประสานแบบตันด้วยเครื่องอัดแห้งซิลวาแรม ซึ่งผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท เค ไทย คอนวัลแตนท์ แอนด์ แมชชีนเนอรี

จำกัด ได้อิฐบล็อกประสานที่มีขนาด สูง 9 ซม. กว้าง 12.5 ซม. ยาว 12.5 ซม. นำอิฐบล็อกประสานไปผึ่งแดด 1 วัน หลังจากนั้นนำไปบ่มชื้น

2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราทดแทนหินฝุ่นด้วยกากตะกอนโครเมียมสูงสุดในอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย

นำกากตะกอนโครเมียมไปทดแทนหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร โดยคำนวณจากน้ำหนักจำเพาะเฉลี่ยของหินฝุ่นและกากตะกอนโครเมียม เพื่อทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์และวัสดุปอตโซลานในอิฐบล็อกประสานมีค่าคงที่ อัดส่วนผสมให้เป็นอิฐบล็อกประสานจำนวน 2 ชุด ชุดแรกใช้เถ้าแกลบและชุดที่สองใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลาน บ่มชื้นที่ระยะเวลา 3, 7, 14, และ 28 วัน หาค่าความหนาแน่นและนำไปทดสอบกำลังต้านแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 [9] ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Shimazu UH-100 ขนาด 100 ตัน จากนั้นนำไปทดสอบการชะละลายของโครเมียมด้วยวิธีทดสอบ TCLP โดยนำเศษอิฐบล็อกแตกมาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 9.5 มม. ชั่งให้ได้น้ำหนัก 100 กรัมใส่ลงในขวดแก้วที่บรรจุสารละลายกรดอะเซติกเจือจาง (pH 2.88) 2000 มล. นำเข้าเครื่องหมุนด้วยอัตรา 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชม. และนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาด 0.45 ไมโครเมตร [10] นำน้ำที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาโครเมียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer

2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาการชะละลายของโครเมียมจากบล็อกประสานด้วยตะกอนโครเมียมสังเคราะห์

เนื่องจากกากตะกอนโครเมียมที่ใช้การทดลองที่ 1 สำหรับผสมด้วยเถ้าแกลบและผสมด้วยเถ้าลอยเป็นกากตะกอนที่ได้มาจากโรงงานในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และพบว่าปริมาณโครเมียมที่มีในกากตะกอนทั้งสองชุดไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบการหล่อแข็งด้วยกากตะกอนที่มีปริมาณโครเมียมเท่ากัน จึงเตรียมกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ด้วยการรีดิวซ์ Cr(VI) ในสารละลาย K_2CrO_7 ด้วย $FeSO_4.7H_2O$ (ที่อัตราส่วน 1 มก. Cr ต่อ 16.03 มก. $FeSO_4.7H_2O$) ให้เป็น Cr(III) ที่ pH 2 เป็นเวลา 30 นาที แล้วปรับค่า pH ให้เท่ากับ 9.5 เพื่อตกตะกอนโครเมียมในรูปของ $Cr(OH)_3$ [11] แล้วอบให้แห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นำตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ไปทดแทนหินฝุ่นในอัตราส่วนสูงสุดโดยปริมาตรที่ได้จากการทดลองที่ 1 ผสมทำอิฐบล็อกประสานและใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลาน เพื่อศึกษาการชะละลายของโครเมียออกจากอิฐบล็อกประสานเมื่อมีปริมาณโครเมียมในกากตะกอนที่เท่ากัน

2.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาการชะละลายของโครเมียมออกจากอิฐบล็อกประสานในสภาวะการใช้งานจริง

เพื่อศึกษาการชะละลายของโครเมียมออกจากก้อนอิฐบล็อกประสานที่ได้จากการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมจริงในสภาวะการนำไปใช้งานจริง นำอิฐบล็อกประสานที่อัตราทดแทนสูงสุดของกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรจากการทดลองที่ 1 ทั้งก้อน ใส่ลงในภาชนะที่บรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 3 ลิตร ให้น้ำสัมผัสกับก้อนบล็อกประสานทั้ง 6 ด้าน แช่อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 90 วัน โดยเปลี่ยนน้ำกลั่นใหม่ทุกช่วงเวลา 1.5 ชม., 6 ชม., 24 ชม., 4 วัน, 16 วัน, 50 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ และเก็บตัวอย่างสารละลายที่ได้จากแต่ละช่วงเวลาไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม เพื่อหาปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในระยะยาวเมื่อนำไปใช้ก่อสร้างจริง [12]

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

กากตะกอนโครเมียมที่ใช้ในหล่อแข็งด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยได้มาจากโรงงานในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และพบว่าปริมาณโครเมียมที่มีในกากตะกอนไม่เท่ากัน ซึ่งปริมาณโครเมียมที่มีในกากตะกอนน้ำเสียจะขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนโครเมียมในน้ำเสียในช่วงที่บำบัดน้ำเสีย กากตะกอนโครเมียมที่ใช้ทำอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบมีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 58 และมีปริมาณโครเมียมเฉลี่ย 6.1 มก./ก. มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 2.23 เมื่อนำไปทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.7 มก./ล. ส่วนกากตะกอนโครเมียมที่ใช้ทำอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยมีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 58.6 และมีปริมาณโครเมียมเฉลี่ย 71 มก./ก. มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 2.24 เมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.9 มก./ล.ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.74 ความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2059, 1973, 1878, 1868 และ 1818 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2070, 1962, 1918 และ 1806 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลงเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของกากตะกอนโครเมียมมีค่าต่ำกว่าหินฝุ่น

3.1 กำลังต้านแรงอัด

เกณฑ์กำหนดค่ากำลังต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 คือ ต้องมีค่าเฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อกจำนวน 5 ก้อน ไม่น้อยกว่า 85 กก./ซม. 2 และค่าต่ำสุดของแต่ละก้อนต้องไม่น้อยกว่า 70 กก./ซม.^{2} (เป็นมาตรฐานอิฐบล็อกสำเร็จรูปที่นำไปใช้ได้ทันทีไม่กำหนดระยะเวลาบ่ม และสำหรับชั้นคุณภาพ ค-2 ไม่ระบุเกณฑ์กำหนดการดูดกลืนน้ำ) ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงเหนือระดับดินที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ [8] ตารางที่ 1 แสดงผลของค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยอย่างละ 5 ก้อน ที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร และผ่านการบ่มชื้นที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดของบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตร ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ตามระยะเวลาบ่มชื้น 3, 7, 14 และ 28 วัน

ระยะเวลาบ่มชื้น (วัน)	ค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดอิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน (กก./ซม.^{2})								
	อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรและใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลาน (ร้อยละ)					อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรและใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลาน (ร้อยละ)			
	0	10	20	30	40	0	10	20	30
3	84.7	78	45	41	20	103	88.5	55.6	42
7	132.5	106	55.8	61	29.3	106	94.7	77.4	67
14	152.4	124.8	87.7	71	61.4	117	110.9	80.5	75
28	167.8	155.6	91.8	110.2	54	125	123.8	95.6	78.9

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ สารไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ในผงปูนทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] C-S-H เป็นเจลมีสมบัติเป็นตัวประสาน เหนียวและก่อตัวแข็งยึดติดกับวัสดุผสม $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกต่อเนื่องกับ SiO_2 และ $A_{l2}O_3$ ที่มีอยู่ในวัสดุปอตโซลานได้ C-S-H และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรท (C_4AH_{19}) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสานและเพิ่มกำลังต้านแรงอัดให้กับคอนกรีต ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้กำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มชื้น ปกติเถ้าแกลบมีปริมาณ SiO_2 มากกว่าเถ้าลอย ตัวอย่างเช่น เถ้าแกลบมี SiO_2 93.2 %, Al_2O_3 0.4 %, Fe_2O_3 0.1 % และ CaO 1.1 % ส่วนเถ้าลอยเถ้าลอยมี SiO_2 41.1 %, Al_2O_3 21.6 %, Fe_2O_3 11.3 % และ CaO 14.4 % [13] ในช่วง 3 วันแรกของการบ่มชื้น ค่ากำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นช้ากว่าอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอย เนื่องจากในเถ้าแกลบมีปริมาณ SiO_2 สูงกว่าในการทำปฏิกิริยาปอตโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ ได้เป็น C-S-H รุ่นที่สองและมีลักษณะเป็นเจลที่แข็งตัวอย่างช้า ๆ แต่หลังจากการบ่มชื้น 7 วันขึ้นไป อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบพัฒนากำลังต้านแรงอัดที่สูงกว่าอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอย

เมื่อนำกากตะกอนโครเมียมไปผสมในอิฐบล็อกประสานทดแทนสัดส่วนของหินฝุ่น พบว่ากากตะกอนโครเมียมมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานลดลง เนื่องจากกากตะกอนโครเมียมไปเคลือบผิวของสารเชื่อมประสานและมีผลในการชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชัน [14] นอกจากนี้ตะกอนโครเมียมมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงขึ้นในการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ทำให้มีปริมาณซีเมนต์ที่ไปเชื่อมประสานกับหินฝุ่นเหลือน้อยลง [15] และ $Cr(OH)_3$ ที่มีอยู่ในกากตะกอนมีผลในการชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคซีเมนต์และชะลอการแพร่กระจายของน้ำ [16] และเมื่ออัตราส่วนการทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นเพิ่มขึ้นปริมาณหินฝุ่นที่เป็นโครงสร้างหลักลดลง จึงทำให้ค่ากำลังต้านแรงอัดลดลงแม้ว่าในทุกก้อนบล็อกประสานมีปูนซิเมนต์และวัสดุปอตโซลานเท่ากัน หลังจากบ่มชื้น 28 วัน อิฐบล็อกประสานที่ผ่านเกณฑ์กำหนดค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัด 85 กก./ซม.^{2} และมีอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียสูงสุดคืออิฐบล็อกผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 มีค่ากำลังต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 110.2 กก./ซม.^{2} และอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 20 มีค่ากำลังต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 95.6 กก./ซม.^{2}

3.2 ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัด

อิฐบล็อกที่ไม่ผสมกากตะกอนโครเมียมทั้งหมดเมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่า 0.05 มก./ล. ดังแสดงในตารางที่ 2 และความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดของอิฐบล็อกที่ผสมกากตะกอนโครเมียมในทุกอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นและทุกระยะเวลาบ่มชื้นทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 5 มก./ล. ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาจากก้อนอิฐบล็อกเหล่านี้มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดที่ได้จากการทดสอบกากตะกอนโครเมียมจากโรงงานด้วยวิธี TCLP เนื่องจากโครเมียมถูกรวมเข้าไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ C-S-H มากกว่าถูกกักไว้ในโครงสร้างของคอนกรีตในรูปของ $Cr(OH)_3$ [16,17] จึงถูกชะละลายออกมาน้อย ซึ่งแสดงว่าวิธีหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสานด้วยเถ้าแกลบและด้วยเถ้าลอย สามารถลด

การชะละลายของโครเมียมออกจากกากตะกอนได้ดี และหลังจากบ่มชื้น 28 วัน อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมร้อยละ 30 มีความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 0.32 มก./ล. และอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมร้อยละ 20 มีความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 0.62 มก./ล.

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดด้วยวิธี TCLP ของอิฐบล็อกประสานที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมและระยะเวลาบ่มชื้นต่าง ๆ

ระยะเวลาบ่มชื้น (วัน)	ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดด้วยวิธี TCLP (มก./ล.)								
	อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรและใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลาน (ร้อยละ)					อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นโดยปริมาตรและใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอตโซลาน (ร้อยละ)			
	0	10	20	30	40	0	10	20	30
3	<0.05	0.14	0.17	0.17	0.19	<0.05	0.32	0.2	0.65
7	<0.05	0.16	0.19	0.19	0.21	<0.05	0.23	0.52	0.58
14	<0.05	0.19	0.22	0.24	0.25	<0.05	0.19	0.69	0.73
28	<0.05	0.21	0.29	0.32	0.35	<0.05	0.17	0.62	1.06

3.4 การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์

เนื่องจากในการทดลองที่ 1 กากตะกอนโครเมียมที่ใช้ในการทดลองอัดก้อนอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยมีปริมาณโครเมียมไม่เท่ากัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการใช้วัสดุปอตโซลานทั้งสองชนิด จึงทำการอัดอิฐบล็อกประสานด้วยการผสมกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์แทนกากตะกอนโครเมียมจริง โดยอัดอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยด้วยอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นโดยปริมาตรในอัตราสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ 1 กากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมีปริมาณโครเมียมเฉลี่ย 58.5 มก./ก. ผลทดสอบอิฐบล็อกหลังจากการบ่มชื้น 28 วันแสดงในตารางที่ 3 อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นร้อยละ 30 มีค่ากำลังต้านแรงอัด 136.6 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นร้อยละ 20 ที่มีค่ากำลังต้านแรงอัดเท่ากับ 96 กก./ซม.^{2}

เมื่อทดสอบการชะละลายของโครเมียมด้วยวิธี TCLP พบว่าปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกจากของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบและอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.93 มก./ล. และ 4.73 มก./ล. หรือคิดเป็นร้อยละ 1.3 และ 2.79 ตามลำดับ แสดงว่าเถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลานที่ดีกว่าเถ้าลอยในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยสามารถรองรับปริมาณกากตะกอนโครเมียมได้สูงกว่า ให้ค่ากำลังต้านแรงอัดสูงกว่า และสามารถลดการชะละลายของโครเมียมออกจากอิฐบล็อกประสานได้ดีกว่า เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลานที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 ที่สูงกว่าเถ้าลอยทำให้สามารถลดการชะละลายของโลหะหนักได้ดีกว่าเถ้าลอย [18]

ตารางที่ 3 ผลทดสอบอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตรและอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นร้อยละ 20 โดยปริมาตรหลังการบ่มชื้น 28 วัน

ตัวแปร	วัสดุปอตโซลาน	
	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย
อัตราทดแทนตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ในหินฝุ่นโดยปริมาตร (ร้อยละ)	30	20
ปริมาณโครเมียม (ก./กก. อิฐบล็อกประสาน)	4.47	3.39
ปริมาณโครเมียม (ก./กก. ปูนซิเมนต์และวัสดุปอตโซลาน)	19.23	15.36
กำลังต้านแรงอัด (กก./ซม^2)	136.6	96
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1810	1912
pH น้ำสกัด	8.3	10.3
Cr ในน้ำสกัด (มก./ล.)	2.93	4.73
ร้อยละของ Cr ที่ถูกชะละลาย [(ปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดทั้งหมด 2 ล./ปริมาณโครเมียมในตัวอย่างอิฐบล็อกที่นำไปทดสอบ 100 ก.) x 100]	1.3	2.79

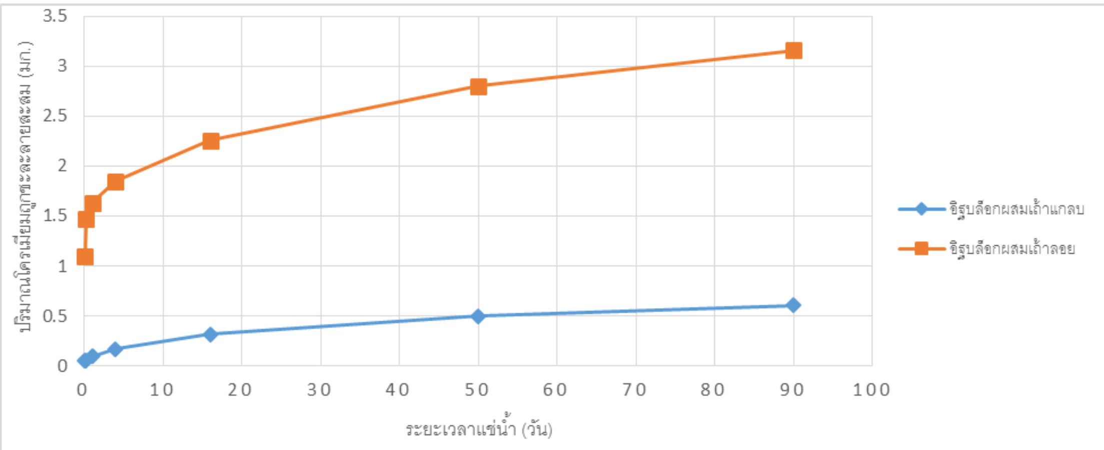
3.5 การทดสอบการชะละลายในระยะยาวในสภาวะการใช้งานจริง

นำอิฐบล็อกประสานที่อัตราทดแทนสูงสุดของกากตะกอนโครเมียมจริงในหินฝุ่นและผ่านการบ่มชื้น 28 วันจากการทดลองที่ 1 มาทดสอบการชะละลายของโครเมียมในระยะยาวตามสภาพการใช้งานจริง ซึ่งการชะละลายของโครเมียมจะเกิดจากน้ำฝนที่ไหลผ่านผิวของอิฐบล็อกประสานเท่านั้น จึงทดสอบด้วยการแช่ก้อนอิฐบล็อกทั้งก้อนลงในน้ำกลั่นและให้สัมผัสน้ำทั้ง 6 ด้าน ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำกลั่นที่แช่อิฐบล็อกผสมเถ้าลอยเริ่มต้นที่ 0.15 ชม. มีค่าเท่ากับ 0.34 มก./ล. หลังจากเปลี่ยนน้ำกลั่นความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำกลั่นมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 มก./ล. และมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาแช่น้ำเพิ่มขึ้น สำหรับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำกลั่นที่แช่อิฐบล็อกผสมเถ้าแกลบมีค่าต่ำกว่า 0.1 มก./ล. และมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนน้ำกลั่นและระยะเวลาการแช่น้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาจากอิฐบล็อกประสานสะสมจนถึงวันที่ 90 สำหรับอิฐบล็อกผสมเถ้าแกลบและอิฐบล็อกผสมเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 0.6 มก.และ 3.2 มก. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงว่าก้อนอิฐบล็อกที่ได้จากการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมสามารถนำไปใช้งานได้จริงและมีปริมาณโครเมียมถูกชะละลายออกมาในปริมาณน้อย

4. สรุป

การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสานด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยสามารถลดการชะละลายของโครเมียมทั้งจากกากตะกอนโครเมียมจริงจากโรงงานและกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์ได้ดี เมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดของอิฐบล็อกทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 5 มก./ล. หลังจากการบ่มชื้น 28 วัน อิฐบล็อกประสานที่ผ่านเกณฑ์กำหนดค่า

กำลังต้านแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับแรงอัด มอก. 60-2516 ชั้นคุณภาพ ค-2 และมีอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมสูงสุด คือ อิฐบล็อกผสมเถ้าแกลบที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 30 มีค่ากำลังต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 110.2 กก./ซม.^{2} และอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยที่อัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นร้อยละ 20 มีค่ากำลังต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 95.6 กก./ซม.^{2} และเมื่อนำอิฐบล็อกประสานด้วยกากตะกอนโครเมียมจริงมาทดสอบการชะละลายของโครเมียมในสภาวะการใช้งานจริงในระยะยาว 90 วัน พบว่าปริมาณโครเมียมที่ถูกชะละลายสะสมจากอิฐบล็อกประสานด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 0.6 และ 3.2 มก. ตามลำดับ และพบว่าเถ้าแกลบเป็นวัสดุปอตโซลานที่ดีกว่าเถ้าลอยในการการปรับเสถียรและหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสาน ด้วยอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์และวัสดุปอตโซลานที่เท่ากันอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงสูงกว่าอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอย อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าแกลบสามารถรองรับอัตราทดแทนกากตะกอนโครเมียมในหินฝุ่นได้สูงกว่า และเมื่อทดสอบด้วยกากตะกอนโครเมียมสังเคราะห์แทนกากตะกอนโครเมียมจริงพบว่าเถ้าแกลบสามารถลดการชะละลายของโครเมียมออกจากอิฐบล็อกประสานได้ดีกว่าเถ้าลอย



รูปที่ 1 ปริมาณโครเมียมสะสมที่ถูกชะละลายออกมาจากอิฐบล็อกในช่วงเวลาแช่น้ำ

5. รายการอ้างอิง

[1] U.S. EPA, Introduction to Hazardous Waste Identification (40 CRF Parts 261), EPA 530-K-05-012, U.S. EPA, Washington, DC, September 2005, 30 p.

[2] Spence, R.D. and Shi, C., 2004, Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes, CRC press, Boca Raton, FL, 378 p.

[3] U.S. EPA, Guide to Disposal of Chemically Stabilized and Solidified Wastes, EPA SW-872, U.S. EPA, Washington, DC, September 1982, 127 p.

[4] หลักเกณฑ์หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfilling) สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้

แล้วที่เป็นของเสียอันตราย (Industrial Hazardous Waste) ซึ่งผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรและทำก้อนแข็งมาแล้ว จัดทำโดยสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 11 น.

[5] Ganjidoust, H., Hassani, A. and Ashkiki A.R., 2009, Cement-Based solidification/stabilization of heavy metal contaminated soils with the objective of achieving high compressive strength for the final matrix, Scientia Iranica 16: 107-115.

[6] Hodul, J., Dohnaikova, B and Drochytka, R., Solidification of hazardous waste with the aim of material utilization of solidification products, 2015, 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD 2015), Procedia Engineering 108: 639-646.

[7] สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ และธวัช พัฒโนภาษ, 2549, การทำเสถียรตะกอนโครเมียมให้เป็นก้อนหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์, ว.วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 20(3): 39-46.

[8] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 60-2516, คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 17 น.

[9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 109-2517, วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 12 น.

[10] U.S. EPA, Method 1311 Toxicity Characteristic Leaching Procedure, EPA SW-846, U.S. EPA, Washington, DC, July 1992, 35 p.

[11] Eckenfelder, W.W., Ford, D.L. and Englande, A.J., 2009, Industrial Water Quality, 4th Ed., McGraw-Hill.

[12] Hiller, S.R., Sangha, C.M., Plunkett, B.A. and Walden, P.J., 1999, Long-term leaching of toxic metals from Portland cement concrete, Cement Concrete Res. 29: 515-521.

[13] Chindapresirt, P. and Rukzon, S., Strength, 2008, Porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, Constr. Build. Mater. 22: 1601-1606.

[14] Asavapisit, S., Naksrichum, S. and Harnwajanawong, N., 2005, Strength, leachability and microstructure characterristics of cement-based solidified plating sludge, Cement Concrete Res. 35: 1042-1049.

[15] Zain, M.F.M, Islam, M.N., Radin, S.S. and Yap, S.G., 2004, Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag, Cement Concrete Comp. 26: 845-851.

[16] Asavapisit, S., Boonjam, M. and Polprasert, C., 2000, Effect of lead and chromium hydroxides on cement-based solidified waste properties, Thammasat Int. J. Sci. Technol. 5(3): 1-9.

[17] Conner, J.R., 1990, Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, NY and Chapman and Hall, London, 692 p.

[18] Park, C., 2000, Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials, Cement Concrete Res. 30: 429-435.

[19] Chindaprasit, P., Sinsiri, T., Napia, C. and Jaturapitakkul, C., 2013, Solidification of heavy metal sludge using cement, fly ash and silica fume, Ind. J. Eng. Mater. Sci. 20: 405-414.