

กำลังอัดและการชะของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์-เถ้าถ่านหิน
และคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสม

COMPRESSIVE STRENGTH AND HEAVY METAL LEACHING BEHAVIOR OF MORTARS
CONTAINING CEMENT-FLY ASH AND SPENT CATALYST

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์
Ubolluk Rattanasak
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
Chai Jaturapitakkul
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
King Mongkut's University of Technology Thonburi

ทิพวรรณ สุตประเสริฐ
Tippaban Sudaprasert
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ



บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คาตาลิสต์ที่ใช้แล้วจากโรงกลั่นน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต คาตาลิสต์จะนำมาใช้แทนทรายเพื่อทำเป็นมอร์ตาร์ นอกจากนี้ยังใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้คาตาลิสต์มาแทนที่ทรายเช่นกัน การวิจัยครั้งนี้ยังได้นำเม็ดคาตาลิสต์มาบดให้ละเอียดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เหมือนเถ้าถ่านหิน ทำการทดสอบกำลังอัดและการชะของโลหะหนักในมอร์ตาร์

ผลจากการวิจัยพบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีคาตาลิสต์แทนทรายจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณคาตาลิสต์ในส่วนผสมจะทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินร่วมกับคาตาลิสต์ด้วยกัน พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ชนิดนี้จะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับคาตาลิสต์ไม่มากนัก มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อคาตาลิสต์เท่ากับ 1:1.25 ให้กำลังอัดที่สูงเพียงพอสำหรับทำอิฐคอนกรีต ส่วนการใช้คาตาลิสต์ที่ใช้แล้วที่บดละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์จะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานประมาณร้อยละ 20 ดังนั้นคาตาลิสต์จึงไม่ใช่สารพิษอันตรายที่ดี ส่วนผลการวิเคราะห์การชะของโลหะหนักในคาตาลิสต์พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษาคือ ตะกั่ว และโครเมียม ต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามแคดเมียมและนิกเกิล ยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐาน การผสมคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วกับปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์-เถ้าถ่านหิน พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษาทุกชนิดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและยังมีค่าลดลงตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่สูงขึ้น ดังนั้นการชะของโลหะหนักจากคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วจึงไม่เป็นปัญหาในการนำเม็ดคาตาลิสต์มาใช้เป็นวัสดุผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

ABSTRACT

This investigation was set and aimed at to study the possibility of using spent catalyst as a construction constituent which the unground spent catalyst was used as sand in mortar mixture. Fly ash was also used as cementitious material with 20% of cement replacement. Besides the spent catalyst was used as sand, it was also ground to a very small particle size as small as cement and then used as cementitious material like fly ash. Compressive strengths and leaching characteristics of heavy metals in mortars containing spent catalyst were tested.

The results showed that the compressive strength of mortar containing unground spent catalyst increased with ages. Increase quantities of the unground spent catalyst, the compressive strength of mortar was decreased. When cement and fly ash were used with the unground spent catalyst, the compressive strengths of mortars were little lower than those of mortar containing only the cement and unground spent catalyst. The results also indicated that the compressive strength of mortar containing spent catalyst at the proportion of 1.25 times of cement by weight was strong enough to make a concrete brick. In case of the ground spent catalyst being used to replace cement, it made the compressive strength of mortar lower than the standard mortar about 20%. The leachate results of spent catalyst were found that lead and chromium concentrations were lower than the allowance, but cadmium and nickel were opposed. After the spent catalyst was fixed with cement or cement-fly ash, the leaching of heavy metals were not exceeded the industrial effluent standard. Therefore, the heavy metals mentioned earlier were not a problem in using spent catalyst as a concrete constituent.

1. บทนำ

คาลาสต์ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ คือสารที่ใช้เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี โดยปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณผิวคาลาสต์ เมื่อใช้คาลาสต์ไปเป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากมีการบอบสลายที่ผิว จึงต้องเผาไล่คาร์บอนที่ผิวคาลาสต์ก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนคาลาสต์ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่จะนำไปกำจัดทิ้งต่อไป

คาลาสต์ที่ใช้แล้วในโรงกลั่นน้ำมันอย่างเช่นของโรงกลั่นน้ำมันไทยออยล์ จะมีปริมาณปิละ 100-150 ตัน และทางโรงกลั่นน้ำมันต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดประมาณตันละ 6,000-7,000 บาท [1] ซึ่งเป็นรายจ่ายที่สูง โดยทั่วไปคาลาสต์จะมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย หากทำการกำจัดไม่ถูกวิธีจะก่อให้เกิดปัญหาการชะโลหะหนักในเมื่คาลาสต์ออกมาได้ หากปริมาณโลหะหนักที่ชะออกมาปริมาณสูงเกินค่ามาตรฐานจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบริเวณนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายของโลหะหนักจากการชะ จึงต้องหาวิธีการกำจัดหรือใช้ประโยชน์จากเมื่คาลาสต์ที่ใช้แล้วเหล่านี้ ซึ่งพบว่าหากโลหะหนักในคาลาสต์มีปริมาณมากเพียงพอ จะทำการสกัดเพื่อนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ แต่ถ้าโลหะหนักในคาลาสต์มีปริมาณเล็กน้อยไม่คุ้มแก่การสกัดโลหะหนักมาใช้ แต่ความสามารถในการถูกชะสูงและจำเป็นต้องกำจัด จะเลือกวิธีการทำให้โลหะหนักให้เสถียรด้วยปูนซีเมนต์ [2]

เด้าถ่านหิน เป็นกากจากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและแนะนำการใช้เด้าถ่านหินในงานคอนกรีตจำนวนมาก Jatupitakkul และคณะ [3] ได้ศึกษาการคัดเลือกเด้าถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีต พบว่าความละเอียดของเด้าถ่านหินเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเด้าถ่านหินที่ละเอียดสุดในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะสามารถทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดที่อายุก่อน 28 วันเท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน นอกจากนั้น Roy และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาระยะของโลหะหนักจากกากอุตสาหกรรมที่ทำให้เสถียรด้วยปูนซีเมนต์และเด้าถ่านหิน พบว่าปริมาณโลหะ Cr, Ni, Cd, และ Hg ในซีเมนต์มีเสถียรภาพสูงขึ้นและถูกชะน้อยลง

ในปัจจุบันการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมโดยการผสมกับปูนซีเมนต์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากวิธีนี้สามารถลดปริมาณโลหะหนักจากการชะ ลดค่ากำจัด อีกทั้งยังสามารถนำกากของเสียบางชนิดกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดคาลาสต์ที่ใช้แล้ว โดยนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และเด้าถ่านหิน เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง รวมทั้งทดสอบความสามารถในการชะของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 ศึกษาผลกระทบของคาลาสต์ที่ใช้แล้วต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้แทนทราย
- 2.2 ศึกษาการชะโลหะหนักในคาลาสต์ที่ใช้แล้วก่อนและหลังผสมปูนซีเมนต์-เด้าถ่านหิน
- 2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คาลาสต์ที่ใช้แล้วเป็นวัสดุในงานก่อสร้าง

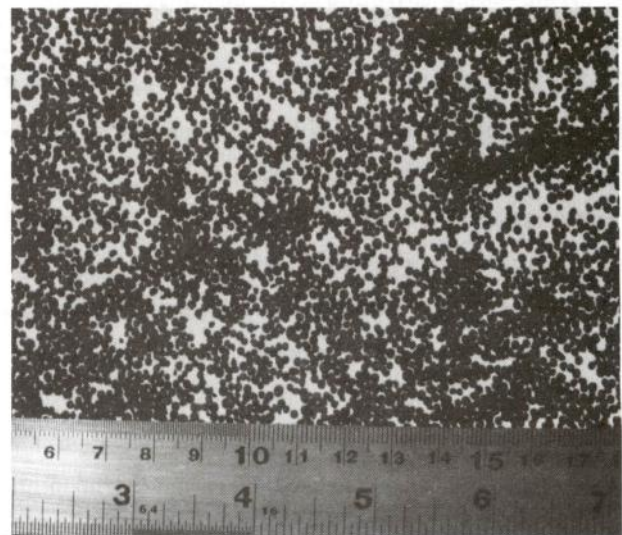
3. วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำเบอร์ 100 มิโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.76, เด้าถ่านหิน, และคาลาสต์ที่ใช้แล้ว

คาลาสต์ที่ใช้แล้วได้จากโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งเป็นเม็ดกลม สีดำ ขนาด 1-2 มม. และมีกลิ่นกำมะถันค่อนข้างแรง ความถ่วงจำเพาะ 2.46 เมื่คาลาสต์มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 33.1 และเมื่อนำไปแช่น้ำทำให้ได้สารละลายมี pH เท่ากับ 10.68 รูปที่ 1 เป็นเมื่คาลาสต์ที่นำมาใช้ในการศึกษา

เด้าถ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีลักษณะเป็นฝุ่นสีน้ำตาล และมีความถ่วงจำเพาะ 1.95 คุณสมบัติของเด้าถ่านหินและคาลาสต์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 เมื่คาลาสต์ที่ใช้แล้วก่อนบด

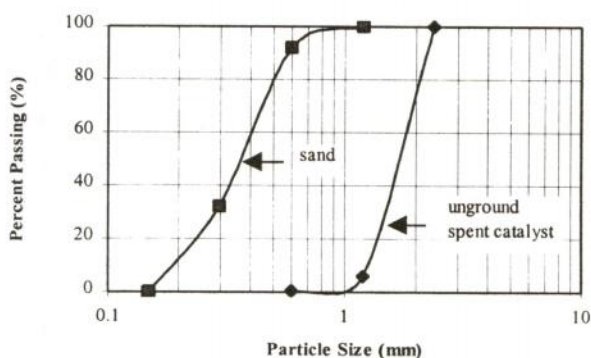
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินและคาตาลิสต์ที่ใช้แล้ว

คุณสมบัติ	เถ้าถ่านหิน	คาตาลิสต์ที่ใช้แล้ว
pH	N/A	10.68
ความถ่วงจำเพาะ	1.95	2.46
การดูดซึมน้ำ, %	N/A	33.1

3.2 การทดสอบวัสดุ

คาตาลิสต์ที่ใช้แล้วจะแบ่งการใช้เป็น 2 ประเภท คือคาตาลิสต์ที่บด ซึ่งจะบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดปูนซีเมนต์ (ค่าแรงบด 325 ประมาณร้อยละ 15) และคาตาลิสต์ที่ไม่บด โดยคาตาลิสต์ที่บดจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ส่วนคาตาลิสต์ที่ไม่บดจะใช้แทนทรายในส่วนผสมมอร์ตาร์ การกระจายตัวของคาตาลิสต์ที่ไม่บดและทรายแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะพบว่าคาตาลิสต์มีการกระจายตัวในช่วงแคบๆ และมีขนาดใหญ่กว่าทราย

คุณสมบัติทางเคมีที่ศึกษาคือ องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดคาตาลิสต์ที่บด, ปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน โดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างของเม็ดคาตาลิสต์ที่บด ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รวมทั้งศึกษาการชะของโลหะหนักในคาตาลิสต์ทั้ง 2 ประเภท ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของทรายและคาตาลิสต์ไม่บด

3.3 การเตรียมมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบจะทำการเตรียมเป็น 3 กรณี คือ

กรณี 1 มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์-เม็ดคาตาลิสต์ไม่บด โดยถือเสมือนว่าเม็ดคาตาลิสต์เป็นทราย และมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อคาตาลิสต์เท่ากับ 1:1.25, 1:2.0, 1:2.75, และ 1:3.5 โดยน้ำหนัก ปรับปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการ

ไหลที่ 65 ± 5 ซึ่งเป็นค่าการไหลที่มอร์ตาร์เหลวแบบได้ง่าย ไม่ข้นหรือเหลวจนเกินไป กรณีนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดคาตาลิสต์เป็นมวลรวมละเอียดหรือใช้แทนทรายในมอร์ตาร์

กรณี 2 มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์-เถ้าถ่านหิน-เม็ดคาตาลิสต์ไม่บด ส่วนผสมทั้งหมดจะผสมเพื่อให้ได้ค่าการไหลที่ 65 ± 5 ซึ่งเถ้าถ่านหินจะใช้ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้าถ่านหิน) กรณีนี้จะใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าถ่านหินเป็นสารปอซโซลานที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น และใช้เม็ดคาตาลิสต์เป็นมวลรวมละเอียดหรือทรายเช่นเดียวกับกรณี 1 โดยกรณี 1 และ 2 จะเปรียบเทียบค่ากำลังอัดกับมอร์ตาร์มาตรฐาน STD1 ที่มีค่าการไหลในช่วงเดียวกัน

กรณี 3 มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์-เม็ดคาตาลิสต์บดละเอียดและทราย โดยเม็ดคาตาลิสต์บดจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+คาตาลิสต์บด) กรณี 3 จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เม็ดคาตาลิสต์บดเป็นวัสดุประสาน เนื่องจากคาตาลิสต์ชนิดนี้มีอนุภาคนาโนและซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอาจสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ และทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์กรณี 3 กับมอร์ตาร์มาตรฐาน STD2 ที่มีค่าการไหล 110 ± 5 ตาม ASTM C-109 [5] โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2

เนื่องจากคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 33.1 ดังนั้นจึงแช่คาตาลิสต์ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปริมาณน้ำที่ใช้คำนวณมาจากอัตราส่วน $W/(C+F+G)$ แล้วจึงผสมกับปูนซีเมนต์จนเข้ากัน ตามมาตรฐาน ASTM C-305 [6] จากนั้นเทลงแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ถอดแบบออกที่อายุ 1 วัน และทำการทดสอบกำลังอัด ส่วนตัวอย่างที่เหลือจะนำไปบ่มในน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน ในแต่ละอายุการทดสอบกำลังอัดจะใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์จำนวน 5 ตัวอย่าง

3.4 การทดสอบการชะของโลหะหนักในคาตาลิสต์

คาตาลิสต์ที่ใช้แล้วทั้งที่ไม่บดและที่บดละเอียดจะนำมาทดสอบการชะโลหะหนักด้วยน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.5 N Acetic Acid ให้มี

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก

กรณี	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ (C)	เถ้าถ่านหิน (F)	คาตาลิสต์บด ละเอียด (G)	คาตาลิสต์ ไม่บด	ทราย	W (C + F + G)	ค่า การไหล
Standard	STD1	1	-	-	-	2.75	0.64	70
	STD2	1	-	-	-	2.75	0.69	105
I	CU1	1	-	-	1.25	-	0.61	65
	CU2	1	-	-	2.00	-	0.90	70
	CU3	1	-	-	2.75	-	0.96	70
	CU4	1	-	-	3.50	-	1.10	64
II	CFU1	0.8	0.2	-	1.25	-	0.53	65
	CFU2	0.8	0.2	-	2.00	-	0.74	68
	CFU3	0.8	0.2	-	2.75	-	0.96	70
	CFU4	0.8	0.2	-	3.50	-	1.03	69
III	CGS	0.8	-	0.2	-	2.75	0.77	105

pH เท่ากับ 5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำที่ได้จากการชะจะนำมาชั่งด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาหาการชะของโลหะหนักในเม็ดคาตาลิสต์ โดยใช้เครื่อง AAS โลหะหนักที่ศึกษาคือ โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), และ นิกเกิล (Ni) เนื่องจากโลหะดังกล่าวมีปริมาณมากในคาตาลิสต์ และการชะของโลหะหนักดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

3.5 การทดสอบการชะของมอร์ตาร์

ทำการทดสอบการชะโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเม็ดคาตาลิสต์ ในกรณี 1 และ 2 โดยวิธีเดียวกันกับการทดสอบการชะของโลหะหนักในคาตาลิสต์ โดยตรวจหาโลหะหนักในสารละลายที่ได้จากการชะของมอร์ตาร์ที่อายุ 1, 7, และ 14 วัน

4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

4.1 รูปร่างลักษณะของคาตาลิสต์บดละเอียดและเถ้าถ่านหิน

รูปที่ 3 เป็นเม็ดคาตาลิสต์บดละเอียด ที่กำลังขยาย 3000 เท่า โดยเม็ดคาตาลิสต์บดมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมแตกหัก เนื่องจากถูกบดจนละเอียด มีขนาดเล็กปนใหญ่ ส่วนเถ้าถ่านหิน (รูปที่ 4) มีรูปร่างเป็นทรงกลม ดัน โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-300 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับแหล่งชนิดถ่านหิน ตลอดจนอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหินนั้น [7]

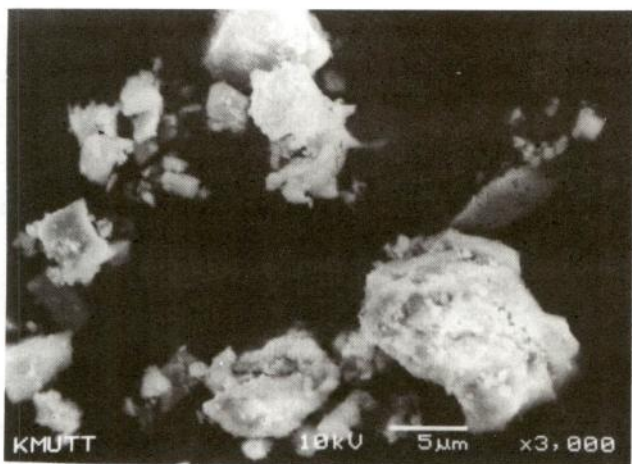
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของคาตาลิสต์ที่บดละเอียดและเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 3 เป็นองค์ประกอบทางเคมีของคาตาลิสต์ที่บดละเอียดและเถ้าถ่านหิน จะพบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของคาตาลิสต์คือ SiO_2 , Al_2O_3 , และ CaO โดยสารประกอบออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณรวมกันถึงร้อยละ 87.7 และใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหินที่มีค่า 82.8 ส่วน LOI (Loss On Ignition) ของคาตาลิสต์บดละเอียดมีค่าค่อนข้างสูง คือเท่ากับร้อยละ 12.63 เนื่องจากคาตาลิสต์ที่ใช้ทดสอบมีคาร์บอนติดอยู่ที่ผิวในปริมาณสูง เมื่อทดสอบ LOI คาร์บอนจะถูกเผาออกไปจนหมด ทำให้ LOI มีค่าค่อนข้างสูง

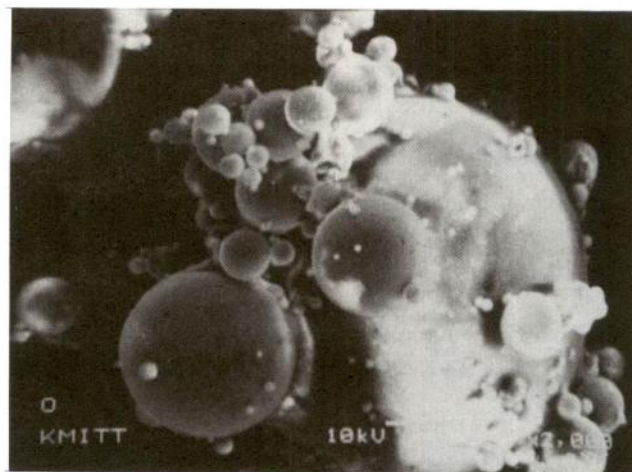
เถ้าถ่านหินในการวิจัยนี้มีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 87.12 ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตาม ASTM C-618 [8] ส่วน Fe_2O_3 มีค่าสูงประมาณร้อยละ 11.43 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินจะมี Fe_2O_3 อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 25 [7]

4.3 ค่าการไหลของมอร์ตาร์

ค่าการไหลจะบ่งชี้ถึงความสามารถไหลได้ของมอร์ตาร์ สภาพความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเป็นส่วนใหญ่ และเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของความสามารถในการใช้งานในคอนกรีตจากการผสมคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วกับปูนซีเมนต์ พบว่าค่าการไหลของมอร์ตาร์ควรมีค่าประมาณ 65 ± 5 เนื่องจากมอร์ตาร์ดังกล่าวสามารถเทลงแบบได้ง่าย ไม่ข้นหรือเหลวเกินไป ที่ค่าการไหลสูงมอร์ตาร์จะใช้น้ำมาก มีลักษณะเหลว ซึ่งการใช้ปริมาณน้ำที่สูงจะทำให้เกิดช่องว่างเมื่อ



รูปที่ 3 คาทาไลสต์บดละเอียด (x3000)



รูปที่ 4 เถ้าถ่านหิน (x2000)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และ คาทาไลสต์บดละเอียด

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหิน	คาทาลิสต์บดละเอียด
SiO ₂	21.16	46.96	53.07
Al ₂ O ₃	6.04	28.73	22.79
Fe ₂ O ₃	3.15	11.43	1.12
CaO	63.96	7.18	11.86
MgO	0.87	2.88	2.52
K ₂ O	0.54	2.77	0.19
Na ₂ O	0.05	0.04	0.76
SO ₃	2.88	0.11	0.33
Mn ₂ O ₃	0.06	0.04	0.05
Loss On Ignition (LOI)	1.39	0.23	12.63

มอร์ตาร์แข็งตัวแล้ว ทำให้กำลังอัดต่ำ ส่วนที่ค่าการไหลต่ำ มอร์ตาร์จะขึ้นเหนียวและเทลงแบบขาก

เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ พบว่าการใช้คาทาลิสต์ในส่วนผสมจะทำให้อัตราส่วน W/(C+F+G) สูงขึ้นดังตารางที่ 4 เนื่องจากคาทาลิสต์มีรูพรุนสูง จึงดูดน้ำเข้าไปมาก และส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ต่ำลง ขณะที่การใช้เถ้าถ่านหินผสมมอร์ตาร์ (มอร์ตาร์ CFU) จะทำให้ใช้ปริมาณน้ำผสมมอร์ตาร์น้อยลง เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคทรงกลม (ดูรูปที่ 4) ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีส่วนช่วยให้มอร์ตาร์ลื่นไหลและเทลงแบบได้ง่ายขึ้น

4.4 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์

• การใช้คาทาลิสต์ที่ไม่บดแทนทราย

ในกรณี 1 และ 2 จะใช้คาทาลิสต์แทนทราย ดังนั้นจึงเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้ง 2 กรณีกับมอร์ตาร์มาตรฐาน STD1 ซึ่งมีค่าการไหลเท่ากับ 65 ± 5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาทาลิสต์ที่ใช้แล้วในส่วนผสมมอร์ตาร์ จะทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง และต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้งกรณีที่ใช่และไม่ใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสม (CU และ CFU) จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและเริ่มมีแนวโน้มคงที่ที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป มอร์ตาร์ที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมจะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเล็กน้อย อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ CUI ที่

อายุ 60 วัน มีค่า 198 กก/ชม² หรือประมาณร้อยละ 76 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่อัตราส่วนผสมของคาลิสต์ 1.25 เท่าของปูนซีเมนต์ ให้ค่ากำลังอัดที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนในกรณีที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และผสมร่วมกับคาลิสต์ที่ใช้แล้วในอัตราส่วนเดียวกันกับ กรณี 1 ให้ผลคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ในกรณี 2 มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ในกรณี 1 ประมาณร้อยละ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนผสมของคาลิสต์ต่อปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 7

มอร์ตาร์ที่มีคาลิสต์เป็นส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน เนื่องมาจากขนาดและรูปร่างของคาลิสต์ เพราะคาลิสต์มีผิวเรียบและกลม ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกาะตัวระหว่างเม็ดคาลิสต์กับซีเมนต์ไม่ดี โดยคาลิสต์มีส่วนขนาดกลมไม่เหมาะสม คือมีขนาดใกล้เคียงกัน และผิวลื่นซึ่งเป็นผลจากน้ำมันและคาร์บอนที่เคลือบบริเวณผิว

• การใช้คาลิสต์บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์

ในเบื้องต้นคาลิสต์ที่บดละเอียดจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยใช้ทรายเป็นมวลรวมในการผสม (กรณี 3) ค่าการไหลของมอร์ตาร์มีค่า 110 ± 5 และเปรียบเทียบค่ากำลังอัดกับมอร์ตาร์มาตรฐาน STD2 ที่มีค่าการไหลเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 จากการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ CGS ที่อายุ 7, 14, และ 28 วันมีค่า 160, 187, และ 190 กก/ชม² ตามลำดับ ที่อายุ 60 วัน ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเป็น 200 กก/ชม² หรือร้อยละ 79 เมื่อเทียบกับกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานดังรูปที่ 8 คาลิสต์ที่

บดละเอียดยังเป็นสารปอซโซลานไม่คืนน้ำ เนื่องจากกำลังอัดของมอร์ตาร์ยังน้อยกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 60 วัน อย่างไรก็ตามการใช้คาลิสต์บดละเอียดในงานคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ควรจะศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาทางเพิ่มกำลังอัดให้สูงขึ้นต่อไป และสามารถใช้คาลิสต์ได้ในปริมาณมากขึ้นในส่วนผสมของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

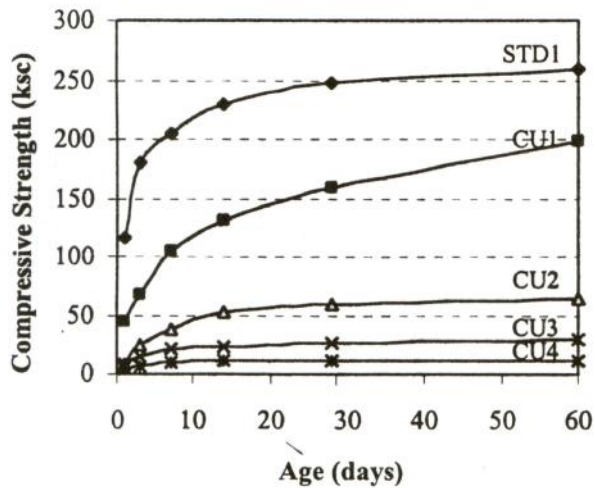
4.5 การชะของโลหะหนัก

ตารางที่ 5 เป็นความเข้มข้นของโลหะหนักในคาลิสต์ที่ใช้แล้วหลังการชะ และค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมรับมีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จากการศึกษาการชะโลหะหนักในคาลิสต์ที่ใช้แล้ว พบว่าความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน [9] ทั้งกรณีที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ แต่ปริมาณโลหะแคดเมียม (Cd) และนิกเกิล (Ni) ก่อนที่จะทำให้เสถียรด้วยปูนซีเมนต์ มีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม โดยปริมาณโลหะหนักในคาลิสต์ที่บดละเอียดและไม่บดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

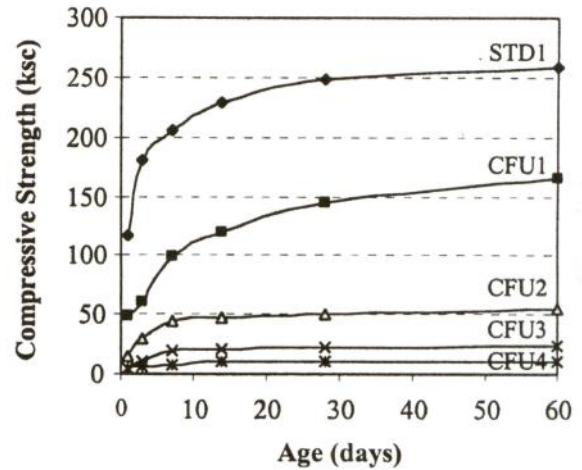
หลังจากทำให้คาลิสต์ที่ใช้แล้วเสถียรด้วยปูนซีเมนต์และเถ้านหิน จึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณโลหะหนักในคาลิสต์ที่ใช้แล้วในส่วนผสมมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณแคดเมียมจะลดต่ำกว่าค่ามาตรฐานเมื่อกำลังอัดมอร์ตาร์สูงกว่า 20 กก/ชม² ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนปริมาณนิกเกิลลดลงเช่นกัน และจะลดลงจนต่ำกว่าค่ามาตรฐานเมื่อกำลังอัดมอร์ตาร์สูงขึ้นประมาณ 50 กก/ชม² ดังรูปที่ 10 โดยที่มอร์ตาร์ที่มีคาลิสต์ที่ใช้แล้วในอัตราส่วน 1.25 และ 2.0 ของวัสดุประสาน (CU1, CU2 และ CFU1, CFU2) จะมีการชะที่ต่ำ

ตารางที่ 4 กำลังอัดและค่าการไหลของมอร์ตาร์

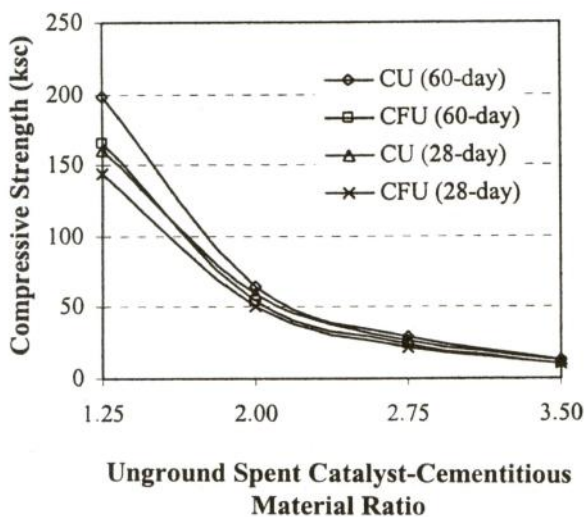
กรณี	สัญลักษณ์	กำลังอัด (กก/ชม ²)						W/(C+F+G)	ค่าการไหล
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน		
Standard	STD1	111	199	222	238	249	262	0.64	70
	STD2	114	180	206	229	243	253	0.69	105
I	CU1	45	62	105	132	160	198	0.61	65
	CU2	9	25	38	53	59	64	0.90	70
	CU3	8	14	21	24	26	29	0.96	70
	CU4	6	7	9	12	12	12	1.10	64
II	CFU1	48	61	99	120	144	166	0.53	65
	CFU2	15	30	44	47	50	54	0.74	68
	CFU3	5	11	19	21	22	24	0.96	70
	CFU4	4	6	8	10	10	10	1.03	69
III	CGS	61	122	160	187	190	200	0.77	105



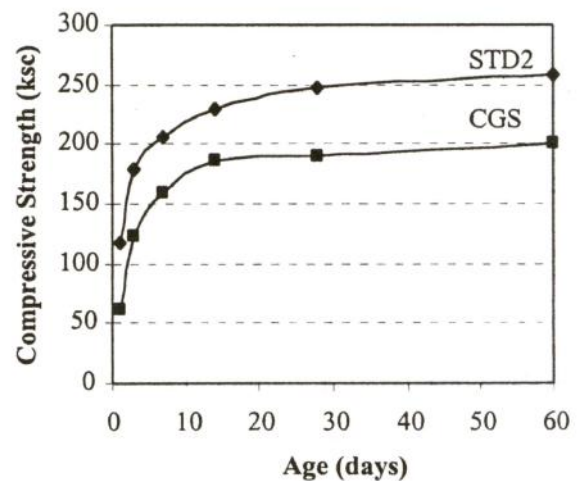
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ต้ากับอายุการบ่มของกรณี 1 เมื่อใช้คาตาลิสต์แทนทราย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ต้ากับอายุการบ่มของกรณี 2 เมื่อใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับคาตาลิสต์



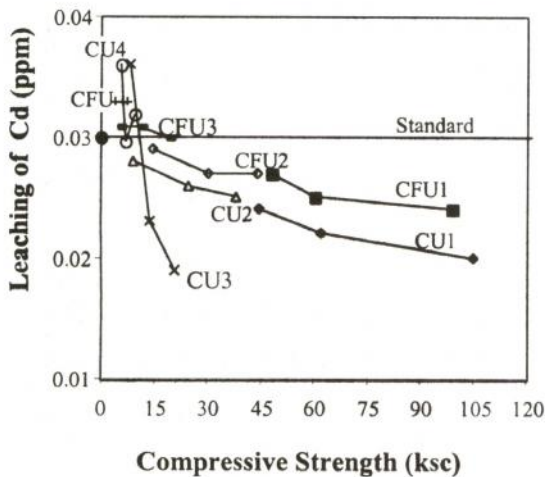
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ต้ากับอัตราส่วนคาตาลิสต์ต่อปูนซีเมนต์



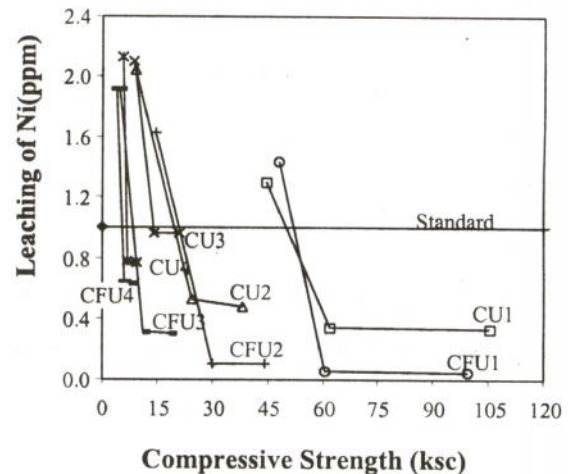
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ต้ากับอายุการบ่มของกรณี 3 เมื่อใช้คาตาลิสต์บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), และนิกเกิล (Ni) ในคาตาลิสต์ที่ใช้แล้ว

โลหะหนัก	การชะของโลหะหนักในคาตาลิสต์ (ppm)			มาตรฐานน้ำทิ้ง [9] (ppm)
	ไม่บด	บดละเอียด	เสถียรด้วยปูนซีเมนต์อายุ 14 วัน (CU4)	
Pb	0.009	0.008	0.003	0.20 max
Cr	0.485	0.498	0.019	0.75 max
Cd	0.062	0.094	0.019	0.03 max
Ni	2.369	2.392	0.775	1.00 max



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการชะของโลหะโครเมียมกับกำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการชะของโลหะนิกเกิลกับกำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 6 ค่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีต [10]

เกรด	กำลังอัดต่ำสุด (กก/ซม ²)		หมายเหตุ
	เฉลี่ย 5 ตัวอย่าง	ต่อหนึ่งตัวอย่าง	
A-1, A-2	245	210	Architectural veneer
B-1, B-2	175	140	Moderate strength
C-1, C-2	105	88	Interior masonry

4.6 การใช้ประโยชน์จากมอร์ตาร์ที่มีคาตาลิสต์เป็นส่วนผสม

จากการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสม พบว่ามอร์ตาร์มีกำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นอิฐคอนกรีตได้ ซึ่งตามมาตรฐานสำหรับอิฐคอนกรีตแบ่งได้ 2 ประเภท [10] คือ ประเภทที่ควบคุมความชื้น (ประเภท 1) และไม่ควบคุมความชื้น (ประเภท 2) โดยแต่ละประเภทยังจำแนกเป็น 3 เกรด ดังแสดงในตารางที่ 6

กรณีที่ใช้คาตาลิสต์แทนทรายพบว่า มอร์ตาร์ที่มีคาตาลิสต์ในอัตราส่วน 1.25 เท่าของวัสดุประสาน ทั้งกรณีที่ไม่ผสมและผสมเถ้าถ่านหิน ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 160 และ 144 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ากำลังอัดสำหรับอิฐคอนกรีต เกรด B และ C ส่วนที่อัตราการผสมอื่นๆ พบว่ากำลังอัดต่ำ เนื่องจากใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อย จึงทำให้มีคาตาลิสต์ยึดเกาะตัวกันไม่ดี แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนผสมอื่นแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำแต่สามารถทำให้คาตาลิสต์ยึดติดกันเป็นก้อนก่อนที่จะนำไปฝังกลบต่อไป โดยมีค่าการชะที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

กรณีที่ใช้คาตาลิสต์บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่า 190 กก/ซม² หรือประมาณร้อยละ 78 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งส่วนผสมนี้สามารถทำเป็นอิฐคอนกรีตเช่นเดียวกับกรณี 1 และ 2 ที่ใช้คาตาลิสต์ 1.25 เท่าของปูนซีเมนต์

5. สรุป

จากการศึกษาค่ากำลังอัดและการชะโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่มีคาตาลิสต์ที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คาตาลิสต์ที่ใช้แล้วสามารถใช้เป็นมวลรวมละเอียด แทนทรายในส่วนผสมมอร์ตาร์ได้ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนผสมที่มีคาตาลิสต์ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ต่ำลง
2. ผลการชะของตะกั่ว และ โครเมียม ในคาตาลิสต์ที่ใช้แล้ว มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อย่างไรก็ตามแคดเมียม และนิกเกิลยังคงสูง แต่เมื่อทำให้เสถียรด้วยปูนซีเมนต์-เถ้าถ่านหิน จะทำให้ปริมาณ

โลหะหนักทั้งชุดลดลงต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อกำลังอัดมอร์ตาร์สูงขึ้น ดังนั้นปูนซีเมนต์-เถ้าถ่านหินสามารถตรึงโลหะหนักแคดเมียมและนิกเกิลไม่ให้ถูกชะออกมาได้

3. ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีคาตาลิสต์เป็นส่วนผสม มีกำลังอัดสูงและปลอดภัยพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ แต่ต้องเลือกอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้
4. คาตาลิสต์ที่บดละเอียด สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ แต่เป็นสารพิษอันตรายที่ไม่ดีนัก ยังต้องมีการวิจัยเพื่อพัฒนาให้ดีขึ้นอีก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัทไทยอยล์ จำกัด ในการอนุเคราะห์คาตาลิสต์ที่ใช้แล้ว และขอขอบคุณ Mr. Jeroen Buren และ คุณวิชาญ พ่วงมหา สำหรับข้อมูลและคำแนะนำเรื่องคาตาลิสต์

เอกสารอ้างอิง

1. Genco, **Genco-the Environmental Science Provide**, Bangkok, Document from Genco Company, 1998, 10 pp.
2. Conner, J. R., **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990, 692 pp.
3. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., Woranisrakul, C., Keatkri, P., Nimityongskul, P., Cindaprasirt, Tangsathikulchai, C., Songpiriyakij, S., Ketranaborvorn, T., Classifying and Selecting of Mae Moh Fly Ash for Using as a Cement Based Material, **12th CEPST Pattaya Thailand Conference**, Vol. 4, Section 22, 1998, pp. 226-234.
4. Roy, A., Eaton, H.C., Cartledge, F.K., and Tittlbeam, M.E., Solidification/ Stabilization of Heavy Metal Sludge by a Portland Cement/Fly Ash Binding Mixture, **Hazardous Waste & Hazardous Materials**, Vol. 5, No. 2, 1998, pp. 125-141.
5. American Society for Testing and Materials, ASTM C 109-95: Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, 1995, pp. 188-190.
6. American Society for Testing and Materials, ASTM C 305-94: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, 1995, pp. 188-190.
7. ACI Committee 226, 1992, Use of Fly Ash in Concrete, ACI 226.3R-87, **ACI Manual of Concrete Practice**, American Concrete Institute, pp. 1-29.
8. American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-94a: Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, 1995, pp. 304-306.
9. Thai Industrial Standards Institute, **Industrial Effluent Standards**, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 1997, 12 pp.
10. Thai Industrial Standards Institute, **TIS 59-1973: Thai Industrial Standard for Concrete Building Brick**, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 1997, 8 pp.