วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

การศึกษากำลังรับแรงอัดของเถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์

Compressive Strength Determination of Bottom Ash mixed with Dust Stone and Portland cement

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์[1*]

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตา หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมุ่งที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกำลังให้มีค่าใกล้เคียงกับดินลูกรัง โดยใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุหลักทดแทนตัวอย่างดิน สำหรับหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มกำหนดที่ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักเถ้าก้นเตาสภาพแห้ง และพิจารณาที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า การใส่วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้การกระจายตัวดีขึ้น สำหรับปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่ร้อยละ 8 โดยปริมาณสัดส่วนของหินฝุ่นต่อปูนซีเมนต์เท่ากันเป็นปริมาณที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับดินลูกรังมากที่สุด โดยค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม ซึ่งกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้นเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเมื่ออายุการบ่มครบ 90 วัน การพัฒนากำลังของตัวอย่างที่สูงขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

Abstract

This research was to determine the appropriated mixing ratio of bottom ash and admixture (dust rock and Portland cement type 1) for improving the compressive strength. Bottom ash was used instead of soil and the quantities of admixture were 0, 2, 4, 6, 8 and 10% by dry weight of bottom ash. The specimens were cured for 7, 14, 28 and 90 days. Results of compressive strength test show that the admixture of 8% was the best mixing ratio. The increasing primary strength is developed from hydration reaction and the increasing secondary strength at 90 days is developed from pozzolanic reaction. Moreover, the compressive strength of this specimen is close to the compressive strength of laterite

คำสำคัญ : เถ้าก้นเตา หินฝุ่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังรับแรงอัด

Keywords : Bottom Ash, Dust Rock, Portland Cement, Compressive Strength

[*]*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ chusak.k@rmutr.ac.th โทร. 0 3261 8542*

RMUTP Research Journal Special Issue
The 5th Rajamangala University of Technology National Conference

1. บทนำ

กากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบการจัดเก็บและการกำจัดกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้เหล่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง กากเชื้อเพลิงที่เหลือเป็นเถ้าถ่านหินแยกเป็น 2 ส่วนคือ เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านที่เบาลอยฟุ้งกระจายในอากาศได้ กับ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นเถ้าถ่านที่หนักกว่าจะจมลงที่ก้นถังเก็บ เป็นวัสดุผลพลอยได้ โรงโม่หินที่เปิดดำเนินการจำนวน 439 ราย มีกำลังการผลิตรวม 334 ล้านตันต่อปี (รัฐพล สมนา และคณะ, 2549) ทำให้มีปริมาณหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากกระบวนการโม่บด และย่อยหินอยู่ในปริมาณที่สูงมาก หินฝุ่น เป็นเศษของหินปูนมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) มีฤทธิ์ไม่เป็นด่าง แต่ผลเสียของหินฝุ่นก็คือ มีลักษณะเบาทำให้ฟุ้งกระจาย ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีผู้ที่มีความสนใจรวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา (สมัชชา แสนสุวรรณคีรี และคณะ, 2549, มนตรี เดชาสกุลสม และคณะ, 2551, วิเศษ แจ้งจิตร และคณะ, 2552, จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม และคณะ, 2552) ได้ทำการศึกษาและพยายามนำวัสดุที่เป็นกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา ซึ่งปรากฏให้เห็นว่าการนำเถ้าก้นเตาและหินฝุ่นมาศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนหรือวัสดุทางเลือกสำหรับใช้ในงานวิศวกรรมโยธา เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุ และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บอีกทั้งเป็นการช่วยล□ □ □ □ หาทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

การศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุ 3 ชนิด ได้แก่

1. เถ้าก้นเตา (ใช้ตัวย่อ B) นำมาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด (BLCP) นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง
2. หินฝุ่น (ใช้ตัวย่อ D) นำมาจาก โรงโม่หิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ใช้ตัวย่อ C) ตราอินทรีเพชร (มอก.15-2547)

2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสม

เนื่องจากหินฝุ่นที่นำมาจากโรงโม่หินมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กปะปนกัน ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้พิจารณาอิทธิพลของขนาดหินฝุ่นด้วย ซึ่งได้ทำการคัดแยกขนาดของหินฝุ่นโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 จะใช้หินฝุ่นเบอร์ใหญ่ (ใช้ตัวย่อ LD) ซึ่งได้จากการนำหินฝุ่นไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน โดยใช้ขนาดของหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และค้างตะแกรงเบอร์ 60 และกลุ่มที่ 2 จะใช้หินฝุ่นเบอร์เล็ก (ใช้ตัวย่อ SD) ซึ่งได้จากการหินฝุ่นไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน โดยใช้ขนาดของหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 60 โดยเหตุผลที่ใช้ขนาดของหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เนื่องจากพิจารณาเห็นว่าหินฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 10 สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ (หินฝุ่นผสมปูนซีเมนต์) เป็นร้อยละของเถ้าก้นเตา □ □ □ □ □ □ □ □ □ สภาพแห้งเท่ากับ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างทดสอบด้วย ซึ่งอายุการบ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ 7, 14, 28 และ 90 วัน สำหรับอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าก้นเตาและวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแต่ละอัตราส่วนของแต่ละอายุการบ่มจะเตรียมตัวอย่าง ไว้ 2 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น จำนวน 216 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนวัสดุเพิ่มสำหรับใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละของเถ้าก้นเตา)	สัญลักษณ์	ความหมาย
-	L	ดินลูกรัง ไม่ผสมวัสดุผสมเพิ่ม (เป็นวัสดุเปรียบเทียบ)
0	B	เถ้าก้นเตา ไม่ผสมวัสดุผสมเพิ่ม
2, 4, 6, 8 และ 10	B_LD100	เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่อย่างเดียว ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10
	B_SD100	เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กอย่างเดียว ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ2, 4, 6, 8 และ 10
	B_LD50_C50	เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ และปูนซีเมนต์อย่างละครึ่งของปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10
	B_SD50_C50	เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็ก และปูนซีเมนต์อย่างละครึ่งของปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10
	B_C100	เถ้าก้นเตาผสมปูซีเมนต์อย่างเดียว ที่ปริมาณร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

2.3 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

ดำเนินการทดสอบหาค่าคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตา หินฝุ่น และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ภายใต้การทดสอบ ดังต่อไปนี้

2.3.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

นำเถ้าก้นเตาและหินฝุ่นมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 50 กรัม สำหรับตัวอย่างเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ต้องทำการบดให้ละเอียดก่อนแล้วจึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 50 กรัม หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D 854

2.3.2 การทดสอบหาคละโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

นำเถ้าก้นเตาและหินฝุ่นมาชั่งน้ำหนักให้ได้ปริมาณ 800 กรัม สำหรับเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มจะเตรียมตัวอย่างในปริมาณ 800 กรัม ตามสัญลักษณ์ ดังต่อไปนี้ B_LD50_C50 (ร้อยละ 2), B_SD50_C50 (ร้อยละ 2), B_LD50_C50 (ร้อยละ 10) และ B_SD50_C50 (ร้อยละ 10) หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D 422

2.3.3 การทดสอบหาขีดจำกัดเหลว

นำเถ้าก้นเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 แล้วมาผสมกับวัสดุผสมเพิ่ม (หินฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และปูนซีเมนต์) ในปริมาณร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้งของเถ้าก้นเตา หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D 423

2.3.4 การทดสอบการบดอัดดิน

นำเถ้าก้นเตามาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 3 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D 698

2.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

การศึกษาครั้งนี้จะใช้วิธีการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compression Test) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength, q_u) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

2.4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบจะนำเถ้าก้นเตามาทำการบดอัดด้วยวิธี Static Compaction (สมัชชา แสนสุวรรณคีรี และคณะ, 2549) เพื่อหาจำนวนครั้งของการบดอัดในแต่ละชั้น โดยใช้ขนาดของแบบเตรียมตัวอย่าง (Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 ซม. สูง 7.6 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการเทียบเท่าหน่วยน้ำหนัก และพลังงานในการบดอัดกับวิธีการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน โดยใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

(Optimum Moisture Content, OMC) ซึ่งหาได้จากการบดอัดแบบมาตรฐาน เหตุผลที่เลือกใช้วิธีเตรียมตัวอย่างโดยใช้ Static Compaction เนื่องจากเมื่อบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐานเสร็จแล้ว ไม่สามารถตัดแต่งตัวอย่างให้เป็นแท่งเพื่อใช้ทดสอบได้ เพราะว่าตัวอย่างดินบดอัดค่อนข้างแข็งและตัดแต่งยาก จึงไม่สามารถตัดแต่งให้เป็นรูปทรงที่ต้องการได้ หลังจากได้จำนวนครั้งของการบดอัดในแต่ละชั้นแล้ว ดำเนินการนำตัวอย่างดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มตามอัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้แล้วในตารางที่ 1 มาทำการบดอัด โดยแต่ละอัตราส่วนผสมจะเตรียมไว้ 2 ตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้มั่นใจว่าผลการทดสอบถูกต้องเชื่อถือได้

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.4.2 การบ่มตัวอย่างทดสอบ

หลังจากได้ตัวอย่างทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสมแล้ว จะนำตัวอย่างทดสอบมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกใส และทำการบ่มที่อายุ 7, 14, 28 และ 90วัน เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.4.3 การทดสอบ

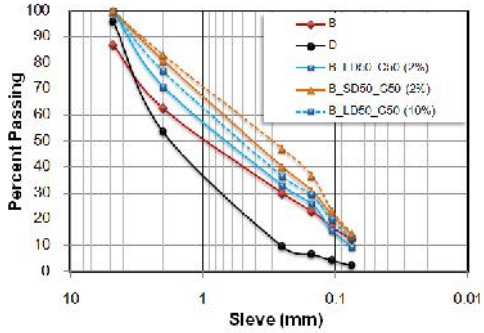
หลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบได้อายุแล้ว แกะพลาสติกใสที่ห่อหุ้มอยู่ออก แล้วนำตัวอย่างวางบนแท่นสำหรับทดสอบ ปรับแป้นกดของเครื่องให้สัมผัสกับผิวบนและล่างของตัวอย่างดินพอดี ปรับมาตรสำหรับวัดการหดตัว (Dial Gauge) และวัดแรงในวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ให้มีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์เริ่มการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการกดคงที่ตามความเหมาะสมในช่วงการอ่านต่างๆ ทำการบันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆ การหดตัว 0.005 นิ้ว ของตัวอย่าง เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วเริ่มลดลง แสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดินแล้วอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure Plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2 นำไปชั่งและเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้นต่อไป

รูปที่ 2 การทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ผลการทดสอบหาขนาดคละด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 3 จากแผนภูมิการกระจายตัวของเม็ดวัสดุ แสดงให้ เห็นว่า เถ้าก้นเตา หินฝุ่น และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม จัดเป็นวัสดุประเภททราย โดยเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีขนาดคละที่ไม่ดี (Cu>6, Cc<1) สำหรับหินฝุ่นมีขนาดคละกันดี (Cu>6, Cc อยู่ประมาณ 1-3) และพบว่าการใส่วัสดุผสมเพิ่มลงไปในเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้มีขนาดคละที่ดีขึ้น

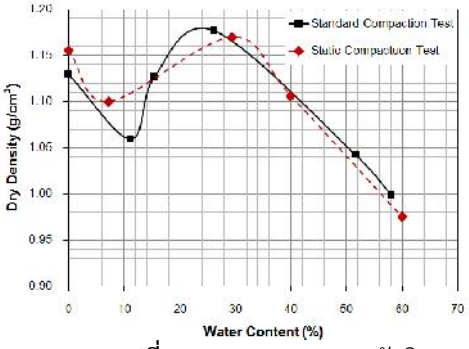


รูปที่ 3 การกระจายตัวของเม็ดวัสดุ

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา (B) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มปริมาณร้อยละ 2 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 10 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) และหินฝุ่น (D) พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.71, 1.51, 1.84 และ 2.67 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะของก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทั่วไป (2.65-2.68) เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ในขณะที่หินฝุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงของดินทั่วไป

ผลการทดสอบหาขีดจำกัดความข้นเหลวของเถ้าก้นเตา และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มปริมาณ ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่า ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) ไม่สามารถหาค่าได้ แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบไม่มีความเหนียว (Non-Plasticity, NP) ซึ่งผสมวัสดุผสมเพิ่มไม่ได้ช่วยให้มีความเหนียวขึ้น

ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเถ้าก้นเตาเท่ากับ 1.18 กรัม/ลบ.ซม. และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ และจากการใช้วิธี Static Compaction พบว่าจำนวนครั้งของการบดอัดที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดใกล้เคียงกัน คือ 7 ครั้งต่อชั้น ซึ่งนำไปใช้ในการตรียมตัวอย่างทดสอบทุกอัตราส่วน



รูปที่ 4 การทดสอบการบดอัดดิน

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถอภิปรายผลการทดสอบได้โดยพิจารณาตามอิทธิพลของปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และระยะเวลาการบ่ม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนวัสดุเพิ่มสำหรับใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง (กก./ตร.ซม.)			
		อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 14 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 90 วัน
-	L	3.74	4.40	5.21	10.71
0	B	0.54	0.64	0.57	1.10
2	B_LD100	0.50	0.53	0.56	1.07
	B_SD100	0.41	0.57	0.58	1.00
	B_LD50_C50	1.37	1.82	2.11	2.83
	B_SD50_C50	1.62	1.69	2.13	3.06
	B_C100	2.44	2.73	3.99	6.39
4	B_LD100	0.56	0.48	0.50	1.04
	B_SD100	0.45	0.42	0.55	0.98
	B_LD50_C50	1.73	2.81	3.92	6.93
	B_SD50_C50	2.80	3.17	4.24	6.00
	B_C100	4.42	5.55	8.31	15.76
6	B_LD100	0.54	0.50	0.40	1.04
	B_SD100	0.51	0.50	0.38	1.20
	B_LD50_C50	3.86	2.88	4.31	8.48
	B_SD50_C50	3.31	3.14	5.77	9.11
	B_C100	5.54	6.08	12.75	16.00
8	B_LD100	0.44	0.38	0.42	1.00
	B_SD100	0.54	0.37	0.42	1.00
	B_LD50_C50	4.40	5.53	6.33	13.93
	B_SD50_C50	4.11	4.99	7.22	13.62
	B_C100	4.65	9.00	19.82	28.08
10	B_LD100	0.46	0.46	0.59	0.99
	B_SD100	0.46	0.42	0.61	0.99
	B_LD50_C50	4.37	5.40	7.86	23.06
	B_SD50_C50	5.14	5.80	10.16	20.59
	B_C100	7.81	12.20	20.09	39.70

3.2.1 อิทธิพลของปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า B (เถ้าก้นเตา), B_LD100 (เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่) และ B_SD100 (เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็ก) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม ส่วน B_LD50_C50 (เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่และปูนซีเมนต์) และ B_SD50_C50 (เถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กและปูนซีเมนต์) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม โดยอัตราการเพิ่มกำลังของอัตราส่วนผสมเดียวกันเปรียบเทียบระหว่างการใช้หินฝุ่นเบอร์ใหญ่และหินฝุ่นเบอร์เล็กมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากหินฝุ่นที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดของเม็ดหินใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์แล้วอัตราการเพิ่มกำลังจึงไม่แตกต่างกัน (รัฐพล สมนา และคณะ, 2549) แต่สำหรับ B_C100 (เถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม และมีอัตราการเพิ่มกำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากปริมาณ

ปูนซีเมนต์มากที่สุดทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากตามไปด้วย เมื่อนำผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างทุกอัตราส่วนผสมมาเปรียบเทียบกับการเพิ่มกำลังของดินลูกรัง พบว่า B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 8 และ ร้อยละ 10 สามารถนำมาใช้งานแทนดินลูกรังได้ โดยปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 เพียงพอที่จะนำมาใช้แทนดินลูกรังเนื่องจากใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยกว่า

3.2.2 อิทธิพลของอายุการบ่ม

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง พิจารณาตามอายุการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ทุกอายุการบ่ม สำหรับตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสม B, B_LD100 และ B_SD100 พบว่าอายุการบ่มไม่มีผลต่อการพัฒนากำลัง ส่วน B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 อายุการบ่มเริ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างพัฒนาตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชั่นของอนุภาคปูนซีเมนต์กับน้ำในก้อนตัวอย่าง ทำให้เกิดการยึดเกาะของเม็ดดินเข้าด้วยกัน เป็นผลทำให้ก้อนตัวอย่างสามารถรับกำลังอัดได้ดีขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ สมัชชา แสนสุวรรณคีรี และคณะ (2549) โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาการบ่ม 90 วัน จะเห็นการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา ประกอบด้วยซิลิก้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซค์ ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม, 2552) หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นผลทำให้ที่อายุการบ่มเพิ่มขึ้น ก้อนตัวอย่างสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน พบว่าเมื่อนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมกับเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้ส่วนผสมมีขนาดคละที่ดีขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีค่าต่ำกว่า 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อยกว่าดินทั่วๆไป อาจนำไปใช้เป็นวัสดุมวลเบาได้ วัสดุผสมเพิ่มไม่มีส่วนช่วยให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

2. ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม เมื่อพิจารณาจากปริมาณวัสดุผสมเพิ่มและอายุการบ่มแล้วพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ได้แก่B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 และร้อยละ 10 ซึ่งสามารถนำมาใช้งานแทนดินลูกรังได้ แต่ถ้าพิจารณาถึงความประหยัด การใช้วัสดุผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 8 ก็เป็นการเพียงพอ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

รัฐพล สมนา และประชุม คำพุฒ. 2549. **การศึกษาการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ผสมหินฝุ่นแทนทราย**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, 20-22 เมษายน 2549, โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท ป่าตอง, จ.ภูเก็ต.

สมัชชา แสนสุวรรณคีรี, วัชรินทร์ กาสะลัก และชินวัฒน์ มุกตพันธ์. 2549. **การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขอนแก่นด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานพื้นทาง**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, 20-22 เมษายน 2549, โรงแรมเมอร์ลินบีช รีสอร์ท ป่าตอง, จ.ภูเก็ต, 2549.

มนตรี เดชาสกุลสม, จอมปวีร์ จันทร์หิรัญ และ หัสนัย ลิ้มเจริญ. 2551. **การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ Bottom Ash เพื่อใช้ในงานทาง**. การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี 2551, กรมทางหลวง.

วิเศษ แจ้งจิตร และประทีป ดวงเดือน. 2552. **การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม และประทีป ดวงเดือน. 2552. **การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. 2555. **คู่มือปฏิบัติการทดลองทางปฐพีกลศาสตร์**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล.