

คุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นเถ้าลอยแคลเซียมสูงและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าด้วยอัลคาไลน์ STRENGTH PROPERTIES OF CONTROL LOW STRENGTH MATERIAL FROM ALKALINE ACTIVATION BY FLY ASH AND ELECTRIC ARC FURNACE SLAG

ชุตติภา ตีต้อ¹, อนุพงศ์ คำปลอด², ธนภฤต เทพอุโมงค์^{3,*} และ ธนกร ชมภูรัตน์⁴

¹ นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

² ผู้ช่วยสอนและอดีตนิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

³ อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁴ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: thanakit.th@up.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพกันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานด้วยการลดปัญหาหรือสร้างข้อได้เปรียบของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นการนำของเหลือใช้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ หรือพัฒนาวัสดุทางเลือกโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เพื่อช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้ากระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ วัสดุที่ใช้ประกอบไปด้วย เถ้าลอยและเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย โดยมีอัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วนเถ้าหนักต่อวัสดุประสาน 1.5 อัตราส่วนตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าต่อวัสดุประสาน 0 10 20 และ 30 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อวัสดุประสาน 0.015 ในการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำอ้างอิงแนวทางตามเอกสาร ACI229R-99 และเกณฑ์มาตรฐานงานก่อสร้างชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงประเทศไทย โดยการทดสอบประกอบไปด้วย การทดสอบการไหล และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวแกนเดียว สุดท้ายในวิจัยนี้จะนำเสนอค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุควบคุมกำลังต่ำสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางต่อไป

คำสำคัญ: วัสดุควบคุมกำลังต่ำ, เถ้าลอยและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, วัสดุผิวทาง

Abstract

The study of construction development and improvement have never been stopped in order to reduce the problems reduction or improve the advantage, including the use of manufacturing waste from industrial processes as raw materials without use cement to save the environmental. This paper aims to study the control low strength materials (CLSM) mixtures produced from fly ash (FA) and bottom ash (BA) collected from the Mae Moh power plant, and electric arc furnace slag (EAFs) acquired from the steel industry. An alkaline activator chosen is sodium hydroxide (NaOH). The mixture sodium hydroxide solution of 10 molar, the ratio of BA to the binder of 1.5 and the ratio of EAFs to the binder of 0, 10, 20 and 30 and the ratio of sodium hydroxide solution to binder 0.015 in determining the properties of control low strength materials refer to document ACI229R-99 and construction structure subbase of the Department of Highways of Thailand. Experimental outcomes on fresh and hardened properties composed of slump flow and unconfined compressive strength (UCS). Finally, in this research, the optimal wages of control low strength materials are presented for use as pavement materials.

Keywords: Controlled low-strength materials, Fly ash and steel slag, Compressive Strength, Pavement material

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างงานถนนได้รับการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของวัสดุกันอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้งานด้วยการสร้างข้อได้เปรียบของวัสดุ ทั้งการนำของเหลือใช้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุ เพื่อลดการใช้

ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น หิน ทราย และช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลจากอุตสาหกรรมที่มีการขออนุญาตใช้โรงงานอุตสาหกรรม เพื่อนำออกนอกบริเวณโรงงาน ในปี พ.ศ.2561 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2561) พบว่าในแต่ละเดือนมีของเสียที่นำไปกำจัดเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงมี

การส่งเสริมให้นำของเสียกลับมาใช้ใหม่ในหลัก 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ในงานให้เกิดประโยชน์ในงานทางวิศวกรรม โดยพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุเหลือใช้ให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Control Low Strength Material, CLSM)

วัสดุควบคุมกำลังต่ำเป็นวัสดุที่ใช้แทนวัสดุเดิมทั่วไปในงานก่อสร้างชั้นรองพื้นทางของถนน ซึ่งวัสดุควบคุมกำลังต่ำนี้มีความสมบัติคล้ายกับคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีความสามารถในการไหล ซึ่ง CLSM เป็นวัสดุที่มีกำลังต่ำ ตามมาตรฐาน ACI 229R-99 (American Concrete Institute, 1999) ระบุค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS) เท่ากับ 8.3 MPa หรือน้อยกว่าที่ระยะเวลาบ่มตัว 28 วัน โดย CLSM ต้องมีความสามารถในการทำงานได้ดี (workability) มีความหนาแน่นต่ำ มีกำลังต่ำ และสามารถแข็งตัวได้เอง (Ling et al., 2016) โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำจะประกอบด้วยสารเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ โดยวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ (cement) ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมีหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ผลกระทบด้านอากาศเนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) การปนเปื้อนในอากาศจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ส่งผลให้ค่าฝุ่นละอองภายในโรงงานสูงเกินระดับมาตรฐาน เนื่องจากการระเบิดหิน การวิ่งของรถบรรทุก ผลกระทบทางน้ำคือ น้ำที่มาจากน้ำหล่อเย็นที่ปล่อยจากโรงงาน สำนักงาน บ้านพักพนักงาน อาจมีน้ำมันและไขมันซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมคือ การทิ้งขยะมาจากเศษวัสดุที่อาจตกหล่นระหว่างการขนถ่ายในรถหรือถาดหิน ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำ (สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการแม่น้ำโขง, 2544) และมีราคาสูงกว่าวัสดุประสานตัวอื่น จึงได้มีการนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ จึงได้มีการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม คือ ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า (slag) ที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก เถ้าลอย (fly ash) และเถ้าหนัก (bottom ash) ที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งเถ้าลอยเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีซิลิกาและอะลูมินาปริมาณสูง เมื่อผสมกับตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสสูงทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากผิววัสดุประสาน เมื่อตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าถูกชะละลายด้วยสารละลาย NaOH ได้แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) จนเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เซชันกับน้ำ ส่งผลให้เกิดขึ้นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) คล้ายกับ

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และลดการใช้ทรัพยากรชาติโดยใช้เถ้าหนักแทนที่ จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีการนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำมาเป็นส่วนผสมในงานวิจัยนี้ จึงกลายเป็นวัสดุควบคุมกำลังต่ำแบบที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ (ธนภุต และคณะ, 2563)

ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีทดสอบคุณสมบัติของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ โดยทำการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) เพื่อศึกษาค่ากำลังรับอัดแกนเดียวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างชั้นรองพื้นทางของถนน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุควบคุมกำลังต่ำได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศที่มีอัตราค่าจ้างแรงงานสูง หรือสำหรับงานที่ไม่ต้องการใช้เครื่องจักรในการบดอัด จึงมีการนำวัสดุควบคุมกำลังต่ำมาใช้ในงานเหล่านี้

2.1. การใช้ CLSM ในต่างประเทศกับงานวิศวกรรม

ประเทศสหรัฐอเมริกา (United States of America) ได้เริ่มมีการใช้ CLSM ครั้งแรก ได้นำ CLSM มาเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้างงานถม เช่น การขุดตอม่อ กำแพงกันดิน การกลบท่อ และห้องใต้ดิน อุโมงค์ และท่อระบาย ซึ่งในปัจจุบัน CLSM ถูกใช้มากกว่า 20 รัฐของประเทศอเมริกา

ประเทศอังกฤษ (United Kingdom) ได้มีการใช้ CLSM ที่ได้จากไททานออปซิม (titanogypsum) เป็นวัสดุเหลือใช้จากการผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์ (titaniumdioxide, TiO₂) และตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า (basic oxygen slag, BOS) โดยในงานวิจัยได้นำไททานออปซิมผสมกับตะกรัน เพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน มีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งทำการทดสอบการไหลแม่ที่ 545 mm ทนต่อการแยกตัว มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น 1.5 ชั่วโมง และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย 7 ชั่วโมง และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเฉลี่ย 1 วัน 7 วัน และ 28 วัน เท่ากับ 0.15 MPa 0.7 MPa และ 1.8 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน พบว่าวัสดุ CLSM สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมได้

ประเทศเกาหลี (Korea) ได้มีการศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เถ้าลอย เถ้าหนัก ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า และฝุ่นจากเตาเผาซีเมนต์ ที่มีประสิทธิภาพในการมาใช้เป็นวัสดุ CLSM ซึ่งวัสดุ CLSM เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณแคลเซียมสูง โดยงานวิจัยของ Lee et al. (2013) ได้ศึกษาลักษณะของ CLSM ที่มีการใช้ประโยชน์จาก โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เป็นตัวชะละลายเถ้าลอยและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า และใช้เถ้าหนักเป็นมวลละเอียด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า NaOH ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการไหล ในขณะที่ปริมาณของเถ้าลอยส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง

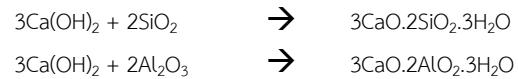
ส่วนตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าและ NaOH ช่วยให้ง่ายรับแรงอัด แกนเดี่ยวแกนเดี่ยวของ CLSM เพิ่มขึ้น ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า ที่นำมาใช้เป็นตัวกำหนดกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวในช่วงสุดท้ายของ CLSM

2.2. วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ ที่รู้จักกันในชื่อ วัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตที่กระตุ้นด้วยอัลคาไล (alkaline) เกิดจากการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง ออกไซด์ของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) กลายเป็นวัสดุที่สามารถก่อตัวได้ แข็งตัว มีความสามารถในการรับกำลังแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งมี ซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งได้แก่ วัสดุดินขาว ดินขาวเผา (Metakaolin) และวัสดุของเหลือจากพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ และตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า เป็นต้น (โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก., 2015) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic process) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ในขั้นแรกคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต (Amorphous) ขั้นตอนที่ 2 คือการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงข่ายแบบเจลของจีโอโพลิเมอร์จากอะลูมิเนียมและซิลิเกตในดินขาวเผากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และขั้นตอนนี้สุดท้ายคือการคงรูป (Stabilization) เกิดขึ้นหลังจากบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในอุณหภูมิคงที่ ทำให้โครงข่ายของจีโอโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเจลขนาดเล็กเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ จากการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น (Yip et al., 2005) (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2563)

2.3. วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzoland) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ตามมาตรฐาน ASTM จากงานวิจัยของขวัญจิตต์ และคณะ (2561) ได้กล่าวว่าวัสดุปอซโซลานโดยทั่วไปว่า วัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดและปริมาณความชื้นมาก แต่วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่อุณหภูมิห้องได้ โดย Ca(OH)₂ มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน



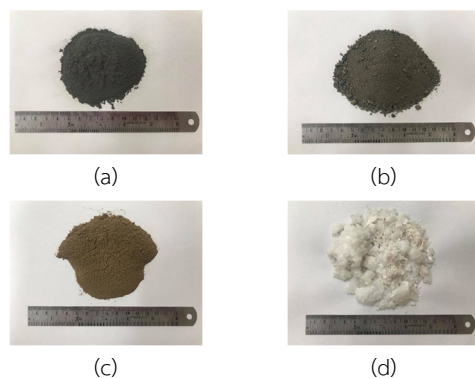
วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการนำมาใช้งาน ดังนี้

1. วัสดุ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolands) คือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดไฟ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และ หินพูน (Pumicite) เป็นต้น
2. วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolands) คือ วัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวหินดินดาน (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากภาคเกษตรกรรม

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า (electric arc furnace slag) เถ้าหนัก (bottom ash) และเถ้าลอย (fly ash) โดยตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้านำมาใช้งานวิจัยนี้คือ ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าจากบริษัท สยามสตีล มิลล์เซอร์วิส จำกัด จังหวัดชลบุรี ดังรูปที่ 1(a) ส่วนเถ้าหนักและเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังรูปที่ 1(b) และ 1(c) โดยที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าเพื่อเป็นวัสดุประสาน และเถ้าหนักนำมาใช้เพื่อทดแทนมวลรวม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังรูปที่ 1(d) เป็นตัวชะละลายแคลเซียมในตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า



รูปที่ 1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ (a) ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า (b) เถ้าหนัก (c) เถ้าลอย (d) โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2. การเตรียมวัสดุสำหรับการผสม

เริ่มทำการคำนวณน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (AA) ที่มีความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ (M) จากนั้นเทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณไว้โดยให้อยู่ต่ำกว่าปริมาตรที่ต้องการเล็กน้อยแล้วใช้แท่งแก้วคนโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ดังกล่าวให้ถึงปริมาตรที่ต้องการ ต่อมาใช้พลาสติกใสคลุมปากบีกเกอร์ และเจาะรูสำหรับระบายความร้อนถึงจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามความเข้มข้นที่ต้องการ (ธนกฤต และคณะ, 2563) โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (1)

$$g = \left(\frac{CMV}{1000} \right) \quad 1$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)
g คือ น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ลักษณะเป็นเกล็ดผลึก (g)
M คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 40 (g/mol)
V คือ ปริมาตรที่ต้องการ (ml)

โดยมีอัตราส่วนร้อยละตะกอนเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าต่อวัสดุประสานร้อยละ 0 10 20 และ 30 และอัตราส่วนเถ้าหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5 สำหรับเถ้าลอย (FA) เถ้าหนัก (BA) และตะกอนเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า (S) แสดงดังตารางที่ 1 เริ่มการเตรียมตัวอย่างโดยนำวัสดุดังกล่าวเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาพักเป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิห้อง และไม่เกิดการดูดซึมน้ำเกินกว่าปกติ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของ CLSM ต่อ 1 m³

Mix	Symbol	NaOH (L/m ³)	Bulk proportion (kg/m ³)			Water (L/m ³)	W/B
			S	BA	FA		
1	AA10/S00 /B1.5	20	0	802	535	444	0.83
2	AA10/S10/ B1.5	20	53	802	481	444	0.83
3	AA10/S20 /B1.5	20	107	802	428	444	0.83
4	AA10/S30/ B1.5	20	160	802	374	444	0.83

3.3. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน CLSM

3.3.1. การทดสอบค่าการยุบตัว

การทดสอบค่าการยุบตัว (slump test) พบว่าค่าการยุบตัวของ CLSM หลังผสมเสร็จทันทีที่มีค่าการยุบตัวใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 27-28 cm. จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวลดลงลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) ทำให้ปริมาณน้ำใน CLSM ลดลงส่งผลให้มีค่าการยุบตัวลดลง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการยุบตัว

Mix	Slump (cm)				
	0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	27	26	25	24	23
2	28	27	24	23	22
3	27	26	25	23	22
4	28	26	25	25	23

3.3.2. การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

การทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (slump flow test) พบว่าค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM หลังผสมเสร็จทันทีที่มีค่าดังตารางที่ 3 มีค่าประมาณ 69-72 cm. ใกล้เคียงกัน ตามมาตรฐาน EFNARC (2002) กล่าวคือค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ของ CLSM หลังผสมเสร็จต้องมีค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่มากกว่า 65 cm. ผลการทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ทุกอย่างผ่านมาตรฐาน และมีค่าลดลงตามระยะเวลา

ตารางที่ 3 ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่

Mix	Slump flow (cm)				
	0.0 hr.	0.3 hr.	1.0 hr.	1.3 hr.	2.0 hr.
1	70	63	50	45	32
2	72	65	53	48	42
3	71	64	54	47	43
4	69	63	52	43	42

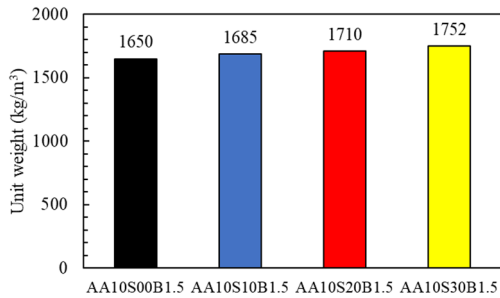
3.3.3. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (unit weight) พบว่าผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของ CLSM มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1,650-1,752 kg/m³ การเพิ่มขึ้นของร้อยละตะกอนเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าส่งผลทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2

3.3.4. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

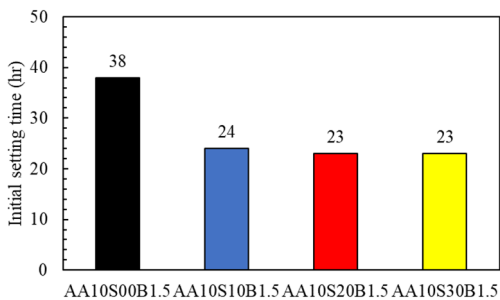
การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (setting time) ดังแสดงในรูปที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 AA10/S00/B1.5 มีค่าเท่ากับ 38

ชั่วโมง ตัวอย่างที่ 2 AA10/S10/B1.5 มีค่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง
ตัวอย่างที่ 3 AA10/S20/B1.5 มีค่าเท่ากับ 23 ชั่วโมง และตัวอย่าง
ที่ 4 AA10/S30/B1.5 มีค่าเท่ากับ 23 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการ



รูปที่ 2 หน่วยน้ำหนักของ CLSM

เพิ่มขึ้นของร้อยละตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าส่งผลให้ระยะเวลา
การก่อตัวลดลง เนื่องจากปริมาณตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าที่
เพิ่มขึ้นทำให้สารละลาย NaOH สามารถละลายแคลเซียม (Ca)
ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ได้มากขึ้น (Yip, 2014) ส่งผลต่อ
การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เซชันกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิ
เกตไฮเดรต (CSH) มากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง
(Jimenez et al., 2001) (ชนกฤต และคณะ, 2563)



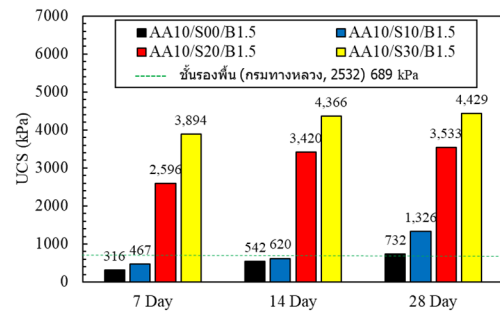
รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

3.4. การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง

3.4.1 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวแกนเดี่ยว

ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของ CLSM แสดงในรูปที่
4 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของ CLSM มีค่าเพิ่มมากขึ้น
ตามปริมาณร้อยละตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า และระยะเวลาการ
บ่มโดยที่กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของตัวอย่างที่ 1 2 3 และ 4 ซึ่งใช้
ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันร้อยละ 0
10 20 และ 30 ที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 316 467 2,596 และ 3,894
kPa ตามลำดับ ที่ 14 วัน มีค่าเท่ากับ 542 620 3,420 4,366 kPa
ตามลำดับ และที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 732 1,326 3,533 และ 4,429
โดยกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของ CLSM มีการพัฒนาขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง เนื่องจากปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในตะกรัน
เหล็กเตาหลอมไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของ
CLSM ให้มีปริมาณ CSH มากขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรง และ
กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวมีค่ามากขึ้นตาม (Kumar et. Al, 2009)
โดยมาตรฐานชั้นรองพื้นทางได้ระบุกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวมีค่าไม่
น้อยกว่า 689 kPa (กรมทางหลวง, 2532) ที่อายุการบ่ม 7 วัน จาก
ผลพบว่าตัวอย่างที่ 3 (AA10/S20/B1.5) และตัวอย่างที่ 4
(AA10/S30/B1.5) มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ผ่านมาตรฐาน



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวแกนเดี่ยว

3.5. พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CLSM

CLSM มีข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่ง คือการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้
กลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นการช่วยลด
กระบวนการผลิตที่อาจก่อให้เกิดพลังงานที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม
และต่อสุขภาพของมนุษย์เอง ดังนั้นบทความจึงได้นำเสนอการ
คำนวณปริมาณพลังงานสะสมรวม (embodied energy value,
EEV) ของ CLSM ซึ่งตัวอย่างที่ 3 AA10/S20/B1.5 เป็นตัวอย่างที่มี
อัตราส่วนผสมเหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต CLSM

Embodied energy value of CLSM (FA+Slag)			
Material	Weight (kg/m ³)	EEV _p (MJ/kg)	EEV (MJ/m ³)
Fly ash	428	0	0
Bottom ash	802	0	0
Sodium hydroxide	8	20.5	164.0
Slag	107	0	0
SUM			164.0

โดยพิจารณาจากปริมาณการใช้พลังงานที่ใช้ในระหว่าง
กระบวนการผลิต (embodied energy value spent during

production, EEV_p) คู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิต CLSM จะสังเกตว่า
ถ้าวลอย ถ้าวหนัก และตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้ามีค่า EEV_p
เท่ากับ 0 เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้จึงไม่ทำการคำนวณพลังงานที่ใช้
ในระหว่างกระบวนการผลิต ค่า EEV_p จึงมีค่าแค่สารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าเท่ากับ 20.5 MJ/kg (tempest et al.,
2009) ทำให้ CLSM มีค่า EEV เท่ากับ 164 MJ/m³

4. บทสรุป

ในงานวิจัยได้นำเสนอผลการทดสอบของวัสดุควบคุมกำลังต่ำ
(CLSM) ที่มีการใช้ถ้าวลอยและตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าเป็นวัสดุ
ประสานแทนปูนซีเมนต์ และถ้าวหนักใช้แทนมวลรวมโดยมีการใช้
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวชะละลาย สรุปได้
ดังนี้

1. เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัว และค่าการ
ยุบตัวแบบไหลแผ่ลดลงตามมาตรฐาน EFNARC (2002)
ซึ่งค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ในแต่ละอัตราส่วนผสมผ่าน
มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลี
เมอร์ไรเซชัน
2. การเพิ่มขึ้นของปริมาณร้อยละตะกรันเหล็กเตาหลอม
ไฟฟ้า ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น และทำให้ระยะเวลา
การก่อตัวลดลง เนื่องจากสารละลาย NaOH สามารถชะ
ละลาย แคลเซียม (Ca) ที่มีในตะกรันเหล็กเตาหลอม
ไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน
ซึ่งอัตราส่วนผสมที่มีหน่วยน้ำหนักมากที่สุด และ
ระยะเวลาการก่อตัวน้อยที่สุด คือ AA10/S30/B1.5
3. การเพิ่มขึ้นของปริมาณร้อยละตะกรันเหล็กเตาหลอม
ไฟฟ้า และระยะเวลาการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับ
แรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของแคลเซียม
ไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้า ส่งผลต่อ
ความแข็งแรงของ CLSM ซึ่งอัตราส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับ
แรงอัดแกนเดียวที่ผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์
ของกรมทางหลวงที่ ระยะการบ่มตัว 7 วัน คือ
AA10/S20/B1.5 และ AA10/S30/B1.5 โดยอัตรา
ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ AA10/S20/B1.5
เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวผ่านมาตรฐานกรม
ทางหลวง และเป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้ปริมาณร้อยละ
ตะกรันเหล็กเตาหลอมไฟฟ้าน้อยกว่าอัตราส่วนผสม
AA10/S30/B1.5
4. จากอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ AA10/S20/B1.5
มีการใช้ปริมาณพลังงานสะสมรวม (EEV) เพียง 164
MJ/m³ ที่มาจากสารละลาย NaOH เท่านั้น ส่วนวัสดุตัว
อื่นไม่มีการใช้พลังงาน เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา

6. การอ้างอิง

- [1] ACI Committee 229 (1999). Controlled low strength
materials (ACI 229R), American Concrete Institute.
Farmington Hill. Michigan. USA.
- [2] ASTM Designation C 1611 (2014). Standard test
method for slump flow of self-consolidating
concrete. Farmington Hill. Michigan. USA.
- [3] ASTM Designation C 403 (2016). Standard test
method for time of setting of concrete mixtures by
penetration resistance. Philadelphia. USA. DOI:
10.1520/C0403_CO403M-16.
- [4] ASTM International. ASTM Designation D 2166 (2016).
Standard test method for unconfined compressive
strength of cohesive soil. Philadelphia. USA.
DOI:10.1520/D2166_D2166M_16.
- [5] ASTM Designation C138 (2017). Standard test method
for unconfined compressive strength of cohesive soil.
Philadelphia. USA.
- [6] Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric
systems, In Davidovits, J. Davidovits, R. James, C. (Ed.),
Geopolymer'99 international conference. France
- [7] EFNARC. (2002). Specification and guidelines for self-
compacting concrete. Surrey. UK.
- [8] Kumar S, Kumar R, Mehrotra SP. In influence of
granulated blast furnace slag on the reaction
structure and properties of fly ash based geopolymer.
J Mater Sci 45(3): 607-615. 2009
- [9] Lee, N.K., Kim, H.K., Park, I., Lee, H. and Materials, B.
(2013). Alkali-activated, cementless, controlled low-
strength materials (CLSM) utilizing industrial by-
products. 49, 738-746.
- [10] Ling, L.C., Kaliyavaradhan, S.K., and Poon, C. (2018).
Global perspective on application of controlled low
strength material (CLSM) for trench backfilling
An overview. Construction and building material. 158.
535-548. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.050.
- [11] Tempest, B., Sanusi, O., Gergely, J., Ogunro, V., and
Weggel, D. (2009). Compressive strength and
embodied energy optimization of fly ash based

- geopolymer concrete. Word of coal ash (WOCA) conference. Lexington. USA.
- [12] กรมทางหลวง ทล.-ม. 206.. (2532). มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase). กองวิเคราะห์และวิจัย. กรมทางหลวง.
- [13] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). 3Rs กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- [14] ขวัญจิตต์ เหมะวิบูลย์ และคณะ. (2561). การศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [15] ธนกฤต เทพอุโมงค์ และคณะ. (2563). การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง. มหาวิทยาลัยพะเยา
- [16] นพนนท์ พรรณขาม และคณะ. (2556). สมบัติด้านพลวัตของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2563). สืบค้นจาก.
<http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6133/268>
- [18] สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการแม่ข่ายฯ แผนงานการฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. (2544). (15.1-15.9). สืบค้นจาก
http://archive.iwlearn.net/mrcmekong.org/envir_training_kit/Tha/Case%20Studies/WordDoc/CS15%20-%20Kaeng%20Khoi%20Siam%20Cement%20Plant.doc
- [19] โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. (2015). สืบค้นจาก
<https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=21510>