

วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากของเหลืออุตสาหกรรมแต่งแร่ดินขาว

อรุณเดช บุญสูง*

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 27 พฤษภาคม 2562

แก้ไข : 23 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 24 เมษายน 2563

คำสำคัญ :

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ / ดินขาว /

เถ้าลอย / วัสดุถมกลับ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติด้านกำลังของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ใช้กากดินขาวมาทดแทนมวลรวมโดยใช้เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) ที่ปริมาณ 1%, 3%, 5%, 7%, 9% และ 11% โดยน้ำหนักของกากดินขาว ทั้งนี้ ศึกษาสมบัติดังกล่าวด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมได้จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบการไหลแผ่ และการยุบตัว ผลการศึกษา พบว่า สมบัติในสภาวะเหลวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากดินขาวขึ้นกับปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสม การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณความต้องการน้ำลดลงประมาณ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นเมื่อน้ำในส่วนผสม น้ำจึงเคลือบบริเวณพื้นผิวทำให้เถ้าลอยมีสมบัติเป็นวัสดุหล่อลื่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเชื่อมประสาน (เพิ่มอัตราส่วน OPC : FA) ในช่วง 1% – 11% ไม่ส่งผลต่อปริมาณความต้องการน้ำเพื่อให้เกิดการยุบตัวที่ค่าๆ หนึ่ง การใช้เถ้าลอยร่วมในสารเชื่อมประสานที่ทุกปริมาณทำให้ลดระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวยังแสดงให้เห็นว่า ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณสารเชื่อมประสานในปริมาณมาก แม้จะมีอายุการบ่มน้อย จะแสดงพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง ในทางกลับกันหากก้อนตัวอย่างมีปริมาณสารเชื่อมประสานน้อย แม้อายุการบ่มมาก จะแสดงพฤติกรรมแบบยืดเหนียว โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากดินขาวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยสามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามข้อกำหนดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R (ACI, 1999)

Controlled Low-Strength Material (CLSM) from Industrial Waste Product of Kaolin

Aroondet Boonsung*

Uttaradit Rajabhat University, Tha It, Muang, Uttaradit 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

Assistant Professor, Department of Construction Engineering Management, Faculty of Industrial Technology.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: May 27, 2019

Revised: March 23, 2020

Accepted: April 24, 2020

Keywords:

Controlled Low-Strength
Material / Kaolin / Fly Ash /
Back Fill Material

This research was conducted to study the strength properties of controlled low-strength material, with aggregate replaced by the industrial waste kaolin (IWK) at 1%, 3%, 5%, 7%, 9% and 11% of fly ash (FA); ordinary portland cement (OPC) was used as the binder. The strength properties were evaluated via the unconfined compression test at curing ages of 3, 7, 14, 28 and 60 days. The amount of water used in the mixture was selected by considering the results of the flow test and slump test to obtain the desired consistencies. The results showed that liquid condition of the controlled low-strength material from kaolin was affected by the amount of fly ash used. The use of fly ash with cement helped reduce the water requirement by 8% when compared with the use of only cement as the binder. The more fly ash added, the more water could be reduced. This is because the fly ash particle shape was spherical. As a result, when the water was added to the mixture, the surface was coated with such particles; fly ash then became a lubricant. An increase in the binder (increasing OPC: FA) in the range of 1% to 11% did not affect the amount of water required to cause collapse at a certain value. The use of fly ash in the ordinary cement at every volume resulted in the time reduction of the slump value. In addition, the results of the unconfined compression test showed that fracture of the samples that contained more cement, even at a shorter curing time, exhibited stress hardening behaviour. On the other hand, if the sample contained less cement, even at a longer curing time, it would show the stress softening behaviour. The controlled low-strength material from industrial waste of kaolin mixed with cement and fly ash could develop adequate strength to meet the demand of work based on the requirements of the ACI 229R (ACI, 1999) standard.

1. บทนำ

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต สามารถไหลเข้าในที่แคบและอัดตัวแน่นได้ดี เป็นจุดเด่นที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินถมแบบเดิม CLSM อาจมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาคเช่น Unshrink Fill, Controlled Density Fill, K-Kret, Flowable Mortar, Soil-Cement Slurry [1-2] CLSM ประกอบขึ้นมาจาก สารเชื่อมประสาน สารผสมเพิ่ม มวลรวม และน้ำเป็นหลัก ซึ่งการเลือกใช้วัสดุในส่วนผสมสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม โดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งาน ต้นทุนการผลิตและความสามารถในการทำงานได้เป็นสำคัญ

การใช้กากอุตสาหกรรมอย่างเช่น เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติดินสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเป็นวิธีการหนึ่งที่มีนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง Wu และคณะ [3] ศึกษาการใช้เถ้าลอยปรับปรุงสมบัติดินโดยการผสมลึก (Deep Mixing) พบว่าสามารถเพิ่มกำลังแบกทานของดินเหนียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังทำให้ดินมีสมบัติในการระบายน้ำได้ดีขึ้นทำให้เสาเข็มดินปูนซีเมนต์มีสมบัติเป็นทางระบายน้ำในแนวตั้ง ส่งผลให้ระยะเวลาการอัดตัวระบายน้ำลดลง Cokca [4] ศึกษาการใช้เถ้าลอย ปูนขาว และปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงสมบัติดินกระจายตัว (Expansive Soil) พบว่า การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ และปูนขาวสามารถลดการกระจายตัวของดินได้ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มมวลละเอียดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย Thongchai [5] และ Klammeng และ Thongchai [6] ได้รายงานว่าการใช้เถ้าลอยแม่เมาะจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยสามารถปรับปรุงให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินบดอัดโดยวิธีการทดสอบแบบซีบีอาร์ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thongchai และ Boonsung [7]

นอกจากนั้นยังพบว่ามีความพยายามที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยและนากากอุตสาหกรรมจากแหล่งต่างๆ เพื่อผลิต CLSM โดย Funston และคณะ [8] ได้เริ่ม

ศึกษาการนำเถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมพื้นที่ที่ยื่นไปในน้ำ โดยเถ้าลอยเหลวมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 5% และน้ำ 35-45% โดยน้ำหนัก และควบคุมค่า การยุบตัว (Slump) ไว้ที่ประมาณ 6.5 นิ้วและเทลงบนพื้นที่ลาดเอียง 1:2 เมื่อทิ้งเวลาผ่านไป 6 เดือนได้ชุดเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วมาตรวจสอบพบว่า หลุมชุดที่มีความลึกกว่า 4 เมตร สามารถคงรูปอยู่ได้โดยไม่ต้องพึ่งทาลายจึงเกิดเป็นแนวคิดใหม่สำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในกรณีอื่นๆ เช่น วัสดุถมน้ำหนักเบาบนดินอ่อนหรือวัสดุถมหลังโครงสร้างกันดิน ต่อมา Janardhanam และคณะ [9] ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยเหลวเพื่อใช้เป็นวัสดุถมหลังท่อฝังดินโดยใช้เถ้าลอย Class F ร่วมกับปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินถมบดอัดแน่นภายใต้แรงกระทำแบบสถิตและแบบแรงจลน์ตามลำดับ พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับท่อในกรณีที่ใช้เถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมกลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ดินถมบดอัดแน่น Butalia และคณะ [10] ได้ศึกษาการใช้ข้อป้อนซัลเฟอร์ (Flue Gas Desulfurization, FGD) เป็นส่วนผสมในวัสดุถมแบบเหลวแทนที่เถ้าลอยที่อันตรายส่วนต่างๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยการเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้ความสามารถในการไหลตัวของวัสดุมีค่าเพิ่ม Trejo และคณะ [11] ได้รายงานการใช้ CLSM จากกากอุตสาหกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมกับเถ้าลอย Class C และ F พบว่านิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเทพาระดับ อุดช่องว่างใต้ถนน เทช่วงรอยต่อคอสพานและวัสดุถมกลับ Katz และ Kovler [12] รายงานว่า CLSM ที่ใช้กากอุตสาหกรรม 5 ชนิดได้แก่ Cement Kiln Dust, (CKD), Dust from Asphalt Plants (AD), Coal Fly Ash (FA), Coal Bottom Ash (BA) and Quarry, (QW) ร่วมกับ Ordinary Portland Cement (OPC) พบว่าสมบัติด้านกำลังของ CLSM ที่ผสมด้วย CKD FA และ BA ให้ค่าที่ค่อนข้างสูงมาก

ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมในรูปแบบ CLSM ด้วยวัสดุที่หลายชนิดเพื่อทดแทนดินถมแบบเดิม ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด บทความนี้เป็นการรายงานผลการศึกษสมบัติด้านกำลัง (Strength Property) และความสามารถในการทำงานได้ (Workability) จากการทดลองในห้องปฏิบัติการของ CLSM ที่มีกากของเหลือจากอุตสาหกรรมกรรมแต่งแร่ดินขาวทดแทนวัสดุมวลรวม

2. วัสดุ

วัสดุที่เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิต CLSM ประกอบไปด้วย กากดินขาว (Industrial Wastes of Kaolin, IWK), ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) และ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) โดยรูปที่ 1, 2 และ ตารางที่ 1 แสดงลักษณะการกระจายตัว สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตามลำดับ

2.1 กากดินขาว

IWK ถูกใช้เป็นมวลรวมทดแทนวัสดุแบบเดิมได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแยกกากทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยจะทำการทดสอบสมบัติพื้นฐานได้แก่ การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Sized Distribution) ซีดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limit) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) และการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ตามมาตรฐาน ASTM D422, D4318, D854 และ D2487 [13-16] โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 2 การกระจายตัวของกากดินขาวอยู่ในช่วง 4.75-0.075mm โดยมีค่าความเหนียวเล็กน้อยแม้กากดินขาวจะผ่านกระบวนการคัดแยกแร่ดินขาวออกไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากอิทธิพลของแร่ดินเหนียวตกค้างที่ติดอยู่บนพื้นผิวของส่วนเม็ดหยาบ มีคุณลักษณะเป็น Clayey Sand with Uniform Graded (SC) เมื่อจำแนกประเภทด้วยระบบ USCS ความถ่วงจำเพาะมีค่า

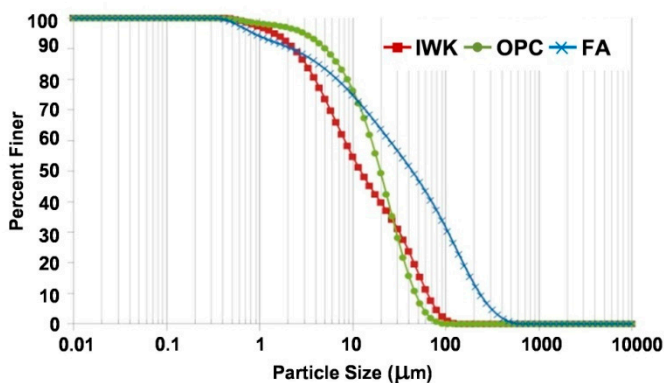
เท่ากับ 2.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะของแร่เฟลด์สปาร์ กลุ่มอัลคาไลด์ (*K-feldspars* or *Alkali Felspars*) [17] หรือหินฟืนม้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิค

2.2 ปูนซีเมนต์

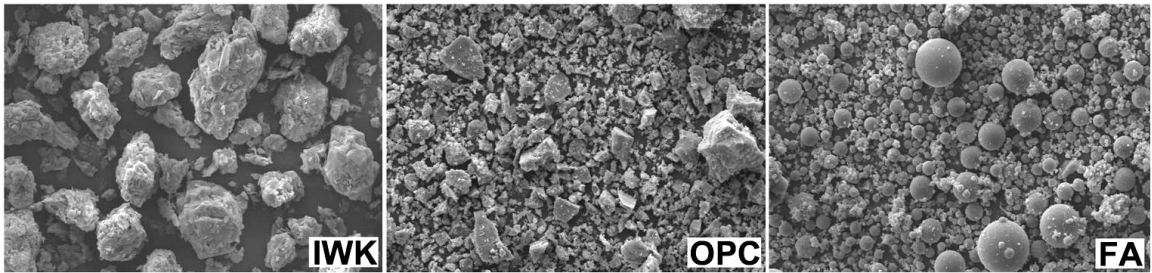
OPC เป็นสารเชื่อมประสานหลักที่มีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 15-2555 [18] การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีพบว่าผลรวมของ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับ 93.17% สอดคล้องกับสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [19] OPC มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.4-104 μm โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26 μm

2.3 เถ้าลอย

FA ถูกใช้เป็นสารเชื่อมประสานรองเพื่อทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับ 67.69% ซึ่งค่าอยู่ในช่วง 50-70% และ SO_3 มีค่าเท่ากับ 4.8% ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5% เมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618 จัดได้ว่าเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ใน Class C หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง [20] โดยมีปริมาณ CaO เท่ากับ 21.34% FA มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-549 μm โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 138 μm



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค IWK, OPC และ FA



รูปที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพของ IWK, OPC และ FA (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ IWK, OPC และ FA

องค์ประกอบ	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
IWK (%)	17.24	75.46	0.00	3.48	0.37	0.30	0.00	1.82	1.34
OPC (%)	3.58	17.64	4.37	0.47	68.34	0.30	0.00	3.61	1.69
FA (%)	16.39	33.84	4.80	2.65	21.34	0.62	0.18	17.46	2.72

ตารางที่ 2 สมบัติทางธรณีเทคนิคของกากดินขาว

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Grain Size Distribution	
Passing No 4 [#] , %	97.0
Passing No 200 [#] , %	3.0
D ₁₀ , D ₃₀ and D ₆₀ , mm	0.09, 0.14 and 0.46
C _u and C _c	0.09 and 0.14
Atterberg Limits	
Liquid Limit, %	26.3
Plastic Limit, %	20.0
Shrinkage Limit, %	4.5
Plastic Index	6.3
Specific Gravity	2.50
Soil Classification System (USCS)	Clayey Sand or Sand-Clay Mixture, SC

3. วิธีการศึกษา

3.1 ออกแบบส่วนผสม

ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 3 ปริมาณสารเชื่อมประสานเท่ากับ 1%, 3%, 5%, 7%, 9% และ 11% โดยน้ำหนักแห้งของ IWK ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมต้องเพียงพอต่อความต้องการในการทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้เกิดสารเชื่อมประสานและมีความสามารถในการทำงานได้ในระดับปกติ โดยมาตรฐาน ACI 229 กำหนดให้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 150-200mm ซึ่งหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 และ ASTM C143 [21-22] ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 33%

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ส่วนผสมจะถูกผสมด้วย Pan Concrete Mixer และเทลงในแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ความสูง 4 นิ้ว และปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้วัสดุก่อตัว จากนั้นจึงปาดผิวให้เรียบเพื่อระหว่างการทดสอบก่อนตัวอย่างจะสามารถถ่ายแรงกดได้เต็มพื้นที่หน้าตัด หลังจากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยเพื่อให้แข็งตัว จากนั้นจึงถอดก้อน

ตัวอย่างออกและหุ้มด้วยฟิล์มถนอมอาหารเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการระเหยก่อนนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

3.3 วิธีการทดสอบ

CLSM ในสถานะเหลวถูกทดสอบค่าการไหลตัวด้วย Slump Flow, L-Box และ V-Funnel ตามมาตรฐาน ASTM C1611 และ EFNARC [23-24] เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานได้ ก่อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ จะถูกทดสอบสมบัติด้านกำลังด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [25] โดยการให้แรงกดก่อนตัวอย่างจะใช้อัตราเคลื่อนที่ทางแนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที จากนั้นบันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆ การหดตัว 0.005 นิ้วของก้อนตัวอย่าง ซึ่งในกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงที่สูงอาจใช้ 0.002 นิ้ว เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับพฤติกรรมของวัสดุ ในกรณีที่ไม่มีรอยเดือนปรากฏชัดให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงก้อนตัวอย่าง โดยการรายงานค่าที่ได้จากการทดสอบจะใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบก่อนตัวอย่างจำนวน 5 ก้อน

ตารางที่ 3 การออกแบบวัสดุผสม CLSM

Binder	1%	3%	5%	7%	9%	11%	Water Content
OPC	1	3	5	7	9	11	33%
OPC:FA	0.5 : 0.5	1.5 : 1.5	2.5 : 2.5	3.5 : 3.5	4.5 : 4.5	5.5 : 5.5	

หมายเหตุ : OPC 1 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน 1%

OPC:FA 1 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน 0.5% ร่วมกับเถ้าลอย 0.5%

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

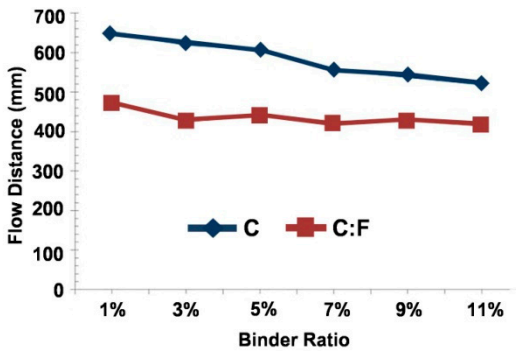
4.1 ความสามารถในการทำงานได้

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ด้วยการไหลแผ่ และการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวตั้งด้วยอุปกรณ์ L-Box และ V-Funnel พบว่าการทดสอบทั้ง 3 วิธีให้ผลที่สอดคล้องกันคือการใช้ OPC ล้วนจะส่งผลให้ความ

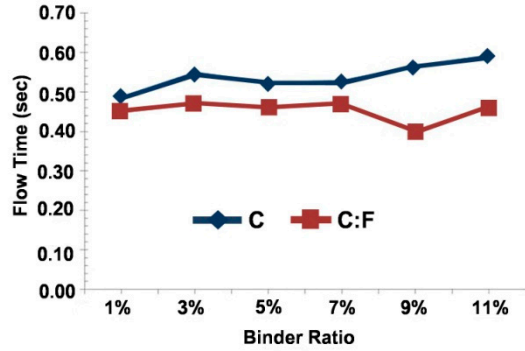
สามารถในการทำงานได้ลดลงเมื่อร้อยละของปริมาณสารเชื่อมประสานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ CLSM ที่ผสมด้วย OPC:FA แสดงแนวโน้มว่า FA สามารถปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้เป็นอย่างดี [26] ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติในสถานะเหลวนี้นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผสมที่ใช้ซึ่งมีรูปทรงและลักษณะพื้นผิวเป็นปัจจัยควบคุม [27] โดยอนุภาคของ FA มีรูปทรงกลม

ต้นทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลได้จากการลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในของวัสดุ [28-29] ทั้งนี้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมต้องการปริมาณน้ำที่สูงเพื่อให้เกิดความชื้นเหลวปกติ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานจึงทำให้ร้อยละของปริมาณน้ำที่เหลือจากการดูดซึมของวัสดุผงเพื่อให้

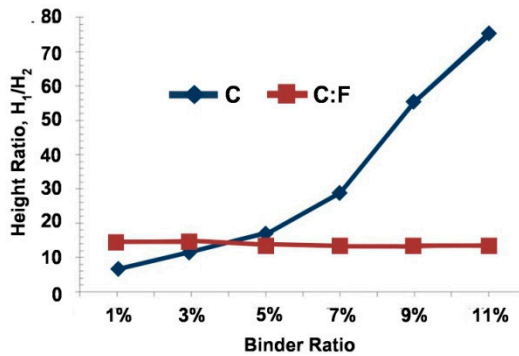
เกิดการลื่นไหลลดลง และส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของวัสดุโดยตรง แต่ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ การบดแก้วล่อยให้มือนุภาคที่เล็กลงกว่าปกติก็จะสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างสารเชื่อมประสานกับมวลรวมในวัสดุได้เป็นอย่างดี [20, 30-31]



Flow at 50 cm



V-Funnel



L-Box

รูปที่ 3 ผลการทดสอบการไหล

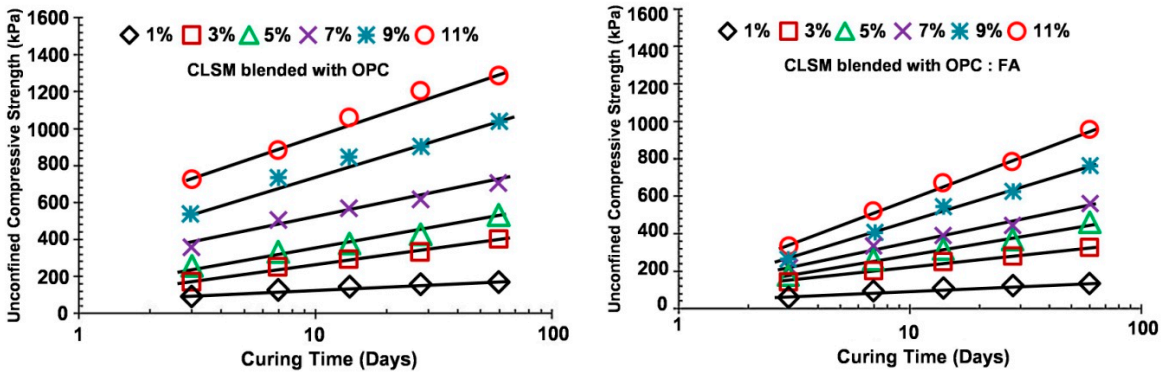
4.2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่างที่มีร้อยละของสารเชื่อมประสานในปริมาณที่มาก แม้มีอายุการบ่มน้อยจะแสดงพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเปราะ (Brittle Material) โดยระนาบการวิบัติจะเกิดเป็นแบบแตกหักทำมุมเอียงประมาณ 45 องศากับแนวราบ และแสดงค่ากำลัง

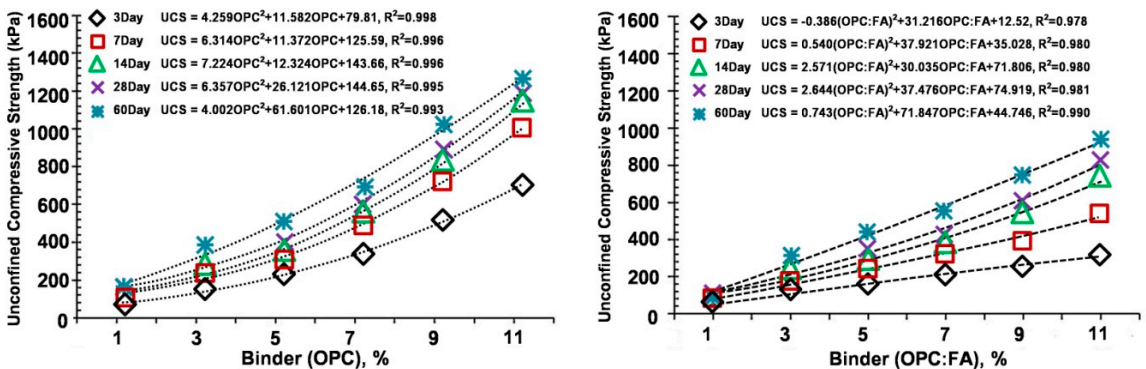
รับแรงสูงสุดได้อย่างชัดเจน แต่ในทางกลับกันหากก้อนตัวอย่างมีปริมาณสารเชื่อมประสานน้อยแม้อายุการบ่มมากจะแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductile Material) โดยก้อนตัวอย่างจะเกิดการหลุดร่อนจากผิวด้านนอกและถูกบีบอัดให้ยุบตัวในแนวตั้งอย่างช้าๆ [32] รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม ผลการ

ทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังรับน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Ca(OH)_2 ซึ่งจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} ทำปฏิกิริยากับ CSH และ CAH โดย Ettringite เกิดการขยายตัวเข้าสู่โพรงในรูปของปูนซีเมนต์เจล โดยจะมีสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป เกิดการหดและรวมตัวยึดเกาะกันแน่นบริเวณพื้นผิวสัมผัส เมื่อแข็งตัวจึงเกิดพันธะเชื่อมประสานในระดับที่สูง โดยเชื่อกันว่ากำลังของปูนซีเมนต์เจลนั้นเกิดขึ้นจาก Vander Wall's Forces ที่อยู่ใกล้กันและพันธะทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งแรงชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงกว่าแรงดูตมาก จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วย [33-35]

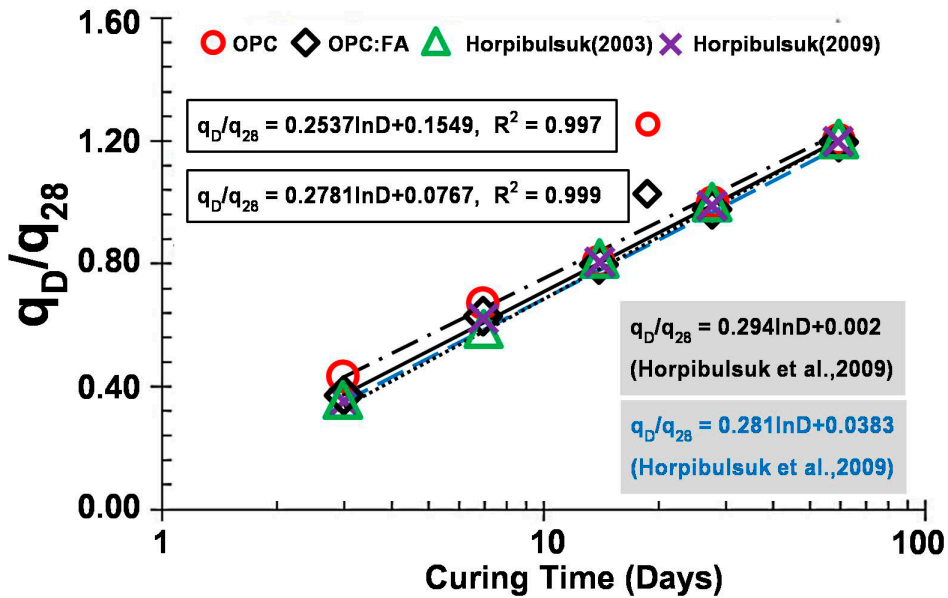
Rachan [36] ได้ศึกษาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่าการใช้ OPC ในปริมาณที่สูงแสดงให้เห็นการยึดเกาะของอนุภาคที่แน่นและทึบมากทำให้เกิดพันธะเชื่อมแน่นและลดปริมาตรโพรงดิน รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณสารเชื่อมประสานพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว (OPC) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย (OPC:FA) และมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการพหุนาม (Polynomial Equation) ที่ทุกปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม



รูปที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังรับน้ำหนักกับปริมาณสารเชื่อมประสาน



รูปที่ 6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ CLSM ผสม OPC และ OPC:FA เทียบกับอายุการบ่ม

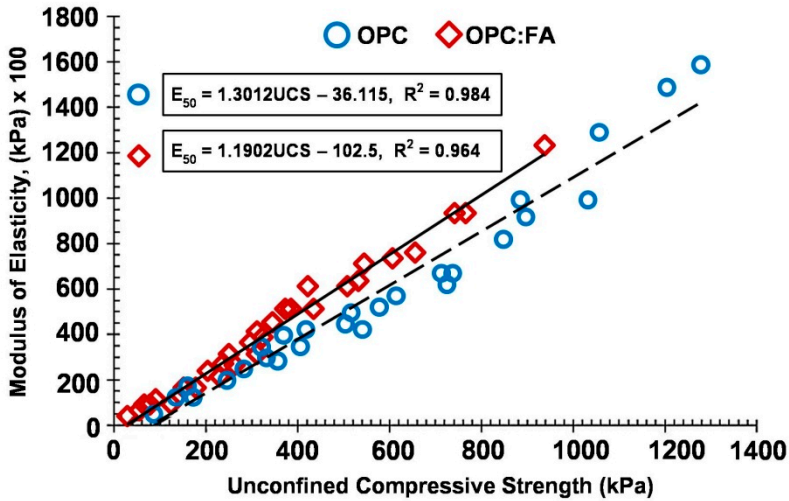
ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติดินโดยการนำ FA ผสมร่วมกับ OPC เพื่อให้ส่งเสริมการพัฒนา กำลังรับน้ำหนักจากการเพิ่มขึ้นของ Silica ให้กับดินซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาลำดับที่สอง (Secondary Reaction) ในรูปของปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ [37-38] แต่จากการศึกษาสภาพขยายของดินปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 และ 60 วันพบว่า ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์จะเชื่อมต่อกับอนุภาคเม็ดดินและเถ้าลอยเข้าด้วยกัน ซึ่งแม้ว่าพื้นผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลผลิตจากปฏิกิริยาดังกล่าว แต่พื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยยังคงเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก [39] และจากการศึกษาของ Horpibulsuk และคณะ [40] พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมประสาน CSH และ CAH ซึ่งเกิดตามปริมาณ $Ca(OH)_2$ อันเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ โดยเถ้าลอยจะทำให้ปูนซีเมนต์ที่จับตัวกันเป็นก้อนเกิดการแตกตัวออกจากกันทำให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับน้ำจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่ม ส่งผลให้ปริมาณ $Ca(OH)_2$

สูงขึ้นตาม รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาค่ากำลัง (q_D/q_{28}) และ อายุการบ่ม (day) เมื่อ q_D คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม D และ q_{28} คือกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน เห็นได้ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำสูงและดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ [41-43] ตามลำดับ ความสัมพันธ์เช่นนี้เป็นการสนับสนุนผลการศึกษาโครงสร้างระดับอนุภาคที่ว่า “ค่ากำลังรับแรงอัดของดินปูนซีเมนต์และดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบจะไม่มีบทบาทเลย”

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับโมดูลัสยืดหยุ่น

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) พบว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (Coefficient of Determination, R^2) เท่ากับ 0.984 และ 0.964 ตามลำดับ นอกจากนั้นค่าโมดูลัส

ยึดหยุ่นยังสามารถแสดงความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรง
 ฉีกแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) (Binder with OPC)
 ได้ในรูปแบบตัวประกอบ (Factor, K) ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง $E_{50} = (1.09 \text{ to } 2.48) \cdot S_u$ (kpa)
 1.09-2.48 และ 1.55-2.85 ทั้งในกรณีที่ใช้ OPC และ OPC:FA (Binder with OPC : FA)
 เป็นสารเชื่อมประสาน ตามลำดับ $E_{50} = (1.55 \text{ to } 2.85) \cdot S_u$ (kpa)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยึดหยุ่นกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

4.4 แนวทางการใช้ประโยชน์

CLSM เป็นวัสดุที่สามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับทางเลือกใหม่ในงานก่อสร้างได้เช่น ใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายถมด้านหลังโครงสร้างซึ่งช่วยลดแรงงาน และต้นทุนการบดอัด หรือการใช้เป็นวัสดุทดแทนดินถมหลังการวางท่อในระบบสาธารณสุขโลก สถาบันคอนกรีตอเมริกา (ACI) ได้ให้คำนิยามของวัสดุชนิดนี้ว่าเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.3Mpa ที่อายุการบ่ม 28 วัน การใช้งานทั่วไปนิยามกำหนดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.1Mpa เพื่อให้ในอนาคตสามารถขุดออกได้หากมีความจำเป็น แม้ว่าการใช้ OPC ร่วมกับ FA จะให้ค่า UCS ที่ต่ำ แต่ก็สามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามมาตรฐาน CLSM ACI 229R (ACI,

1999) โดยพบว่าการใช้ OPC 1%, OPC:FA 1% และ OPC:FA 3% จะให้ค่า UCS ต่ำกว่า 0.3Mpa เพื่อให้สามารถขุดออกได้ โดยการใช้เครื่องทุ่นแรงขนาดเล็กเช่น จอบ เสียม ส่วนการใช้ OPC 3%, 5%, 7% และ OPC:FA 5%, 7%, 9% จะให้ค่า UCS ต่ำกว่า 0.7Mpa โดยค่ากำลังในช่วงนี้จะเป็นการยากต่อการขุดเคลื่อนย้ายและจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรกลร่วมในการทำงาน โดยส่วนผสม OPC 9%, 11% และ OPC:FA 11% จะให้ค่ากำลังที่ค่อนข้างสูงมากเหมาะสมกับงานประเภทที่ไม่ต้องการขุดวัสดุออกในภายหลัง โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4 อีกทั้งยังแสดงความเชื่อมโยงผลการทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับคุณลักษณะการรับน้ำหนักของดินในสภาพธรรมชาติ เพื่อการใช้ประโยชน์ในลักษณะของงานวิศวกรรมฐานรากอีกด้วย

ตารางที่ 4 แนวทางการใช้งานตามมาตรฐาน ACI 229R

สารเชื่อม ประสาน	คุณสมบัติเทียบเคียง	UCS _{28Day} (Mpa)	ความสามารถในการขุด
1%	OPC	ดินเหนียวอัดตัวแน่น	เครื่องมือเบา
	OPC:FA	ดินเหนียวอัดตัวแน่นปานกลาง	เครื่องมือเบา
3%	OPC	ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
	OPC:FA	ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
5%	OPC	ดินเหนียวแข็ง	เครื่องจักรกล
	OPC:FA	ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
7%	OPC	ดินเหนียวแข็ง	เครื่องจักรกล
	OPC:FA	ดินเหนียวแข็ง	
9%	OPC	ดินเหนียวแข็ง	เครื่องจักรกล
	OPC:FA	ดินเหนียวแข็ง	
11%	OPC	ดินเหนียวแข็ง	เครื่องจักรกล
	OPC:FA	ดินเหนียวแข็ง	

4.5 จุดเด่นและผลกระทบเชิงบวกของ CLSM จากกากดินขาว

CLSM มีส่วนประกอบหลักคือ มวลรวม สารเชื่อมประสาน และน้ำ เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นในการออกแบบสูง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ การใช้ CLSM ทดแทนวัสดุถมกลับจะช่วยลดแรงกระทำต่อโครงสร้างได้เป็นอย่างดี Chuangching [44] ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังของท่อฝังใต้ดินและกำแพงเข็มพืดด้วยวิธีวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ กรณีใช้วัสดุถมกลับแบบเหลวจากเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมและอายุการบ่มที่แตกต่างกันทดแทนดินทราย ซึ่งเป็นวัสดุถมกลับแบบเดิมพบว่า การใช้เถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมกลับสามารถลดแรงกระทำต่อท่อลงได้มากถึงร้อยละ 22 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Janardhanam และคณะ [9] และสามารถลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับกำแพงเข็มพืดได้ระหว่างร้อยละ 14-64

อุตสาหกรรมดินขาวพบกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศไทยโดยอยู่ในรูปของอุตสาหกรรมแต่งแร่ดินขาว กระบวนการผลิตจะคัดแยกเฉพาะส่วนที่เป็นอนุภาคแร่ดินขาว ซึ่งจะมีปริมาณไม่มากนัก ดังนั้นผลที่ตามมาคือของเหลือที่เกิดจากกระบวนการคัดแยก ซึ่งเรียกว่า กากดินขาวที่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 70 โดยสถานประกอบการจะกองเก็บไว้ในที่โล่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเกิดเป็นมลพิษทางอากาศต่อพื้นที่ข้างเคียง

การนำกากดินขาวมาประยุกต์ใช้ในส่วนผสม CLSM ทดแทนมวลรวมจึงเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์และยังสามารถช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการพัฒนาวัสดุในงานวิศวกรรมที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศ

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษา CLSM จากภาคดินขาวโดยใช้ OPC และ OPC:FA เป็นสารเชื่อมประสาน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานวัสดุนี้ในโครงการก่อสร้าง โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็นประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ภาคดินขาวมีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วง 4.75-0.075mm มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ (GS) 2.50 โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคพบว่า มีรูปทรงหลายเหลี่ยมซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคแบบแผ่นมีลักษณะคล้ายเกล็ดทับซ้อน

2. วัสดุ CLSM จากภาคดินขาวในสถานะเหลวแม่ลักษณะทางกายภาพจะมีความชื้น หนืดคล้ายโคลน การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้ความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุประเภทคอนกรีต

3. CLSM จากภาคดินขาวสามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามข้อกำหนดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R (ACI, 1999) โดยพบว่าการใช้ OPC 1%, OPC:FA 1% และ 3% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต่ำกว่า 0.3Mpa เพื่อให้สามารถขุดออกได้ในอนาคตด้วยเครื่องมือเบา การใช้ OPC 3%, 5%, 7% และ OPC:FA 5%, 7%, 9% จะให้ค่าที่ต่ำกว่า 0.7Mpa ซึ่งเป็นช่วงของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่นิยมใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เกิดจากความมุ่งมั่นที่จะนำภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ภายใต้เทคโนโลยีพื้นฐาน โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงแยกแร่ดินขาวที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยและภาคดินขาวสำหรับการศึกษาดูตัวอย่างโครงการ

7. เอกสารอ้างอิง

1. Javed, A., Lovencin, W. and Najafi, F.T., 2002, "Current Status of Accelerated Flowable Fill in the Pavement," *Proceeding CSCE 20th Annual Conference*,

Montreal, Quebec, Canada, pp. 1-9

2. American Concrete Institute, 1999, "ACI 229R-9 Controlled Low-Strength Material (Reapproved 2005)," ACI Committee 229, Marmington, USA.

3. Wu, D.Q., Broms, B.B. and Choa, V., 1993, "Soil Improvement with Fly Ash Columns," *Proceedings Southeast Asian Geotechnical 11th Conference*, Singapore, pp. 435-438

4. Cokca, E., 2001, "Use of Class C Fly Ash for the Stabilization of an Expansive Soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), pp. 566-573.

5. Thongchai, A., 1997, "Fine Grain Soil Improvement with Fly Ash from Mae Moh Power Plant in Construction," *Proceeding of the 3th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Songkhla, Thailand. pp. 1-8. (In Thai)

6. Klammeng, A. and Thongchai, A., 2005, "Compressive Strength Behavior of Cement Fly Ash Stabilized Granitic Soil," *Proceeding of the 10th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Chonburi, Thailand. pp. 1-6. (In Thai)

7. Thongchai, A. and Boonsung, A., 2009, "Strength Properties of Soil – Cement Fly Ash for Deep Mixing Stabilization in Chiang Mai Subsoil," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, 2 (2), pp. 20-29. (In Thai)

8. Funston, J.J. Krell, W.C. and Zimmer, F.V., 1984, "Flowable Fly-Ash : New Cement Stabilization Backfill," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 54 (3), pp. 48-51.

9. Janardhanm, R., Burns, F. and Peindl, R.D., 1992, "Mix Design for Flow Fly-Ash Backfill Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4 (3), pp. 252-263.

10. Butalia, T.S., Wolfe, W.E. and Lee, J.W., 2001, "Evaluation of a Dry FGD Material as a Flowable Fill," *FUEL*, 80(6), pp. 845-850.

11. Trejo, D., Folliard, K.J. and DU, L., 2004, "Sustainable Development Using Controlled Low-Strength Material," *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, pp. 234-248.
12. Katz, A. and Kovler, K., 2004, "Utilization of Industrial By-Products for the Production of Controlled Low Strength Materials (CLSM)," *Waste Management*, 24 (5), pp. 501-512.
13. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D422 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
14. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
15. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
16. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
17. Braja, M.Das., 2002, *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed., Pacific Grove, California, USA.
18. TIS. 15-2555, 2013, *Quality Standards for Industrial Products Portland Cement*, Thai Industrial Standard, pp. 1-12. (In Thai)
19. Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2006, *Cement Pozzolan and Concrete*, 3th ed, Khonkaen University, Thailand. (In Thai)
20. Chindaprasirt, P., 2006, *Fly Ash in Concrete*, 3th ed, Khonkaen University, Thailand. (In Thai)
21. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, USA.
22. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
23. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C1611 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
24. EFNARC., 2002, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Surrey, UK, pp. 1-32.
25. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
26. Boonsung, A., 2016, "Flowability of Controlled-Low Strength Material from Industrial Waste of Kaolin," *Proceeding of the 13th Kasetsart University Kampaeng Saen Conference*, Nakhonpathom, Thailand. pp. 372-383. (In Thai)
27. Sua-lam, G. and Makul, N., 2013, "Use of Ternary Blends Cementitious Material to Enhance Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 127-147. (In Thai)
28. Makarat, N. Jaturapitakkul, C. Namarak, C. and Sata, V., 2001, "Effects of Binder and CaCl₂ Contents on the Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Concrete," *Cement and Concrete Composites*, 33 (3), pp. 436-443.
29. American Concrete Institute, 2000, "ACI 232.2R-96 Use of Fly Ash in Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice : Part 2*, Michigan, USA.

30. Chatveera, B. and Homsriprasert, W., 2011, "Behavior of Cement Plaste Blended Pozzolanic Material in the Application of Microwave Energy," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (3), pp. 299-315. (In Thai)
31. Sata, V., Jaturapitukkul, C. and Kiattikomol, K., 2007, "Influence of Pozzolan from Various By-Product Material on Mechanical Properties of High-Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1589-1598.
32. Boonsung, A., 2013, "Unconfined Compressive Strength of Flowable fill Material from Industrial waste of Kaolin," *Proceeding of the 10th Kasetsart University Kampaeng Saen Conference*, Nakhonpathom, Thailand. pp. 1460-1468. (In Thai)
33. Lambe, T.W. Michells, A.S. and Moh, Z.C., 1959, Improvement of Soil-Cement with Alkali Metal Compounds, Highway Research Board Bulletin 241. Washington, USA.
34. Sukontasukkul, P., 2013, Concrete, Pathumthani, Thailand. (In Thai)
35. Kumpala, A., Katkan, W. and Horpibulsuk, S., 2007, "Unconfined Compressive Strength of Silty Clay Stabilized by Cement and Rice Husk Ash," *Proceeding of the 12th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Phitsanulok, Thailand. pp. 176-182. (In Thai)
36. Rachan, R., 2009, Strength Development and Microstructure Characteristics of Soft Bangkok Clay Admixed with Cement and Biomass Ash, Doctor of Philosophy Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Thammasat University, 207 p. (In Thai)
37. Rachan, R. and Vichan, S., 2013, "Unconfined Compressive Strength Development and Microstructure of Calcium Carbide Residue and Biomass Ash Admixed in Compacted Soft Bangkok Clay," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 51-71. (In Thai)
38. Srijaroen, C., Rachan, R. and Horpibulsuk, S., 2014, "Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly Ash-Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 151-164. (In Thai)
39. Chindaprasit, P., Jaturapitakul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), pp. 225-258.
40. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Raksachon, Y., 2009, "Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay," *Soil and Foundations*, 49 (1), pp. 85-98.
41. Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S., 2003, "Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clay with Abrams's Law as a Basis," *Geotechnique*, 53 (4), pp. 439-444.
42. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Suddeepong, A., 2001, "Assessment of Strength Development in Blended Cement Admixed Bangkok Clay," *Construction and Building Materials*, 25 (4), pp. 1521-1531.
43. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C. and Chinkulkijniwat, A., 2012, "Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash," *Journal of Material in Civil Engineering*, 24 (2), pp. 184-193.
44. Chuangching, N., 2005, Properties and Feasibility of Flowable Fly Ash as Back Fill Material, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 126 p. (In Thai)