



เถ้าลอย - วัสดุกระจายตัวในดินซีเมนต์

FLYASH – A DISPERSING MATERIAL IN CEMENT STABILIZED CLAY

ยุทธนา รักษาชนม์ (YUTTHANA RAKSACHON)¹

สุกสันต์ หอพิบูลสุข (SUKSUN HORPIBULSUK)²

¹นายช่างโยธาชำนาญงาน สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี rak_yuttana@hotmail.com

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suksun@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างจุลภาคของดินด้วย อันได้แก่ Scanning Electron Microscope (SEM), Mercury Intrusion Porosimeter Test (MIP) และ Thermal Gravimetry Analysis (TGA) ผลการศึกษาพบว่าเถ้าลอยในดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่จะทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัว ทำให้อนุภาคเม็ดดินซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น บทความนี้กล่าวโดยสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแปรผันตามอิทธิพลร่วม (ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ และอิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนแทนที่) และความละเอียดของเถ้าลอย

ABSTRACT : This paper presents the role of fly ash on strength development in cement stabilized silty clay. The microstructure of cement stabilized clay is investigated by a scanning electron microscope (SEM), mercury intrusion porosimetry (MIP), and thermal gravity (TG) analysis. It is found that the reactivity of fly ash (pozzolanic reaction) is minimal. The role of fly ash in cement stabilization is to disperse the large clay-cement clusters into smaller clusters. Consequently, the reactive surfaces to be interacted with water increase, and hence the cementitious products (inter-cluster cementation bond). To conclude, the strength development in the blended cement stabilized clay is controlled by cementitious products due to combined effect: hydration and dispersion. Cementitious products due to hydration are governed by cement content while cementitious products due to dispersion by fly ash content and fineness.

KEYWORDS : Cement stabilized clay, Scanning Electron Microscope, Mercury Intrusion Porosimeter Test , Thermal Gravimetry Analysis

1. บทนำ

การเพิ่มกำลังอัดของดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์ได้ทำกันมานานแล้ว และภายหลัง ได้มีการนำปูนขาวและวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นมาผสมกับดินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างทั่วไปโดยเฉพาะในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าลอยที่เหลือจากขบวนการผลิต

กระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์มีอย่างแพร่หลาย [1 และ 2] แต่การนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในงานปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินยังมีไม่มากนัก

การศึกษาดินซีเมนต์ส่วนใหญ่สนใจความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์กับสัดส่วนของซีเมนต์ ความชื้น และ

พลังงานการบดอัด แต่ไม่มีค่าอธิบายว่า ซีเมนต์และพลังงานการบดอัดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินอย่างไร

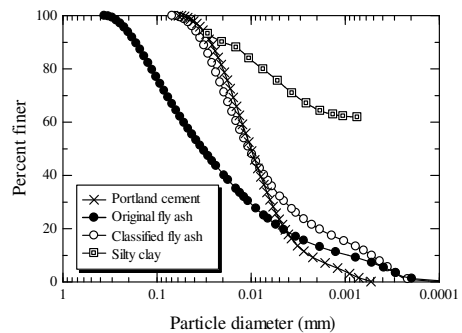
Horpibulsuk, et al. [3] กล่าวว่าโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ประกอบด้วย สารเชื่อมประสาน (Cementation bond) และลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มเม็ดดิน (Fabric) ซึ่งเป็นตัวควบคุมกำลังอัด ความเข้าใจในโครงสร้างจุลภาคจะช่วยให้สามารถสร้างงานวิจัยได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น วิธีการทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรม (การอัดตัวคายน้ำและกำลังอัด) ของดินซีเมนต์ที่เสนอโดย Horpibulsuk, et al. [4] และ Horpibulsuket, et al. [5] เป็นต้น

Nontanandh et al. [6] ได้ทำการศึกษาของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่อายุบ่มต่างๆ โดยอาศัยภาพถ่ายจุลภาคของดินซีเมนต์ และพบว่าผลึกพันธะของซีเมนต์ทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง และกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น สุขสันต์ และคณะ [7] ทำการศึกษากำลังอัดสัมพันธ์กับขนาดของช่องว่างของดินซีเมนต์แฉะ โดยทำการทดสอบการกระจายขนาดช่องว่างด้วยปรอท (Mercury Intrusion Porosimeter Test) และการส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะแปรผันตามขนาดของช่องว่างของดินซีเมนต์แฉะ โดยที่ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉะแปรผันตามขนาดของช่องว่างของดินซีเมนต์แฉะ เพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทของแฉะที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดชัดเจนมากยิ่งขึ้น บทความนี้จะศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ผสมแฉะ โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ Scanning Electron Microscope, Mercury Intrusion Porosimeter Test และ Thermal Gravimetry Analysis

2. ตัวอย่างดินและวิธีการทดสอบ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 3.00 - 4.00 เมตร ดินตัวอย่างประกอบด้วยทรายดินตะกอน และดินเหนียว ในปริมาณ 2, 45 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 74 และ 27 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอัตราการบวมตัวอิสระ (free swell ratio) เท่ากับ 1.0 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (USCS)

วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการทดสอบคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ตราช้าง) แฉะลอยที่ใช้ในนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งจะเรียกว่า แฉะลอยหยาบ (Original fly ash, OFA) และเมื่อร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จะเรียกว่า แฉะลอยละเอียด (Classified fly ash, CFA) องค์ประกอบทางเคมีผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน OFA และ CFA มีปริมาณเท่ากับ 81.54 และ 79.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แฉะลอยทั้งสองจัดเป็นแฉะลอยชั้น F (Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ดินตัวอย่างถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ขนาดละเอียดของดินปูนซีเมนต์ และแฉะลอยที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis แสดงในภาพที่ 1 ตัวอย่างดินซีเมนต์ถูกบดอัดในแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งเป็นจุดที่ให้กำลังอัดสูงสุด [8] จุดเหมาะสมของการบดอัดนี้มีค่าดังนี้ ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) เท่ากับ 17.4 เปอร์เซ็นต์ และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) เท่ากับ 18.8 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง และอัตราส่วนแฉะลอยแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ บ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแฉะลอยที่ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน เมื่อครบอายุบ่มที่กำหนดทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



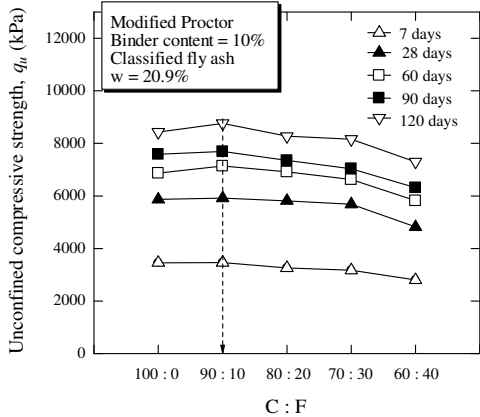
ภาพที่ 1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และแฉะลอย

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ดินซีเมนต์จะถูกย่อยเป็นก้อนขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจะถูกทำให้แห้งด้วยด้วยความดัน 0.5 ปาสกาล ที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เมื่อตัวอย่าง

ดินซีเมนต์แห้งสนิท นำไปวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างจุลภาค ซึ่งขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างจุลภาค ดูรายละเอียดได้จาก ยุทธนา [9]

3. ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด ที่อายุบ่มต่างๆ ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดสูงที่สุดตั้งแต่อายุบ่มเริ่มแรก ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ (อัตราส่วนแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์) ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนแทนที่ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดต่ำกว่าดินซีเมนต์ พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยในช่วงอายุบ่มเริ่มแรก แต่จะให้กำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงอายุบ่มที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อายุบ่มสูงๆ (โดยทั่วไปเกินกว่า 60 วัน) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของคอนกรีตเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ปราศจากเถ้าลอยเมื่ออายุบ่มเกินกว่า 60 วัน

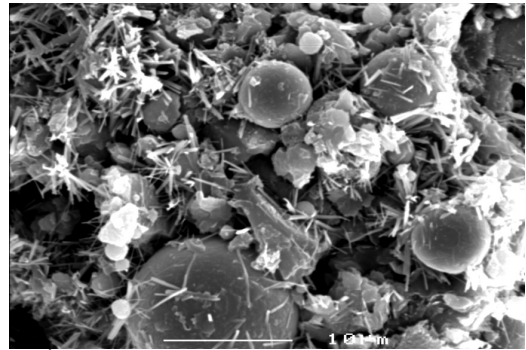


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ที่อายุบ่มต่างๆ

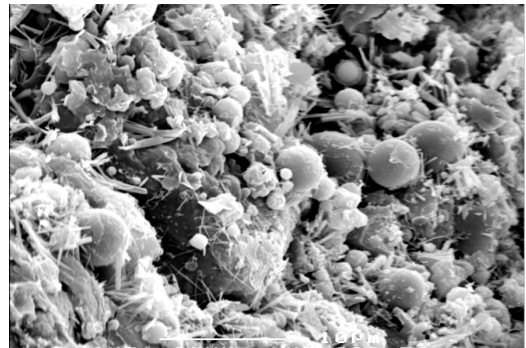
4. ผลทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 3 และ 4 แสดงภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่บดอัดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่ม 60 วัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ 30

เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของเถ้าลอยปรากฏให้เป็นอย่างดีชัดเจนระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและซีเมนต์ ผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์พัฒนาขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์เชื่อมต่อกันอนุภาคของเม็ดดินปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเข้าด้วยกัน อนุภาคของเถ้าลอยละเอียดจะสามารถแทรกเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในมวลดินได้มากกว่าเถ้าลอยหยาบ นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ แต่ผิวของเถ้าลอยที่อายุบ่มต่างๆ ยังคงเรียบ ผลการวิจัยนี้แตกต่างจากผลการศึกษากทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่งอิทธิพลของปฏิกิริยาปอซลานเห็นได้อย่างชัดเจนจากรอยกัดคามผิวของเถ้าลอย [10] ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิต $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพื่อใช้ในปฏิกิริยาปอซลาน จากผลการสังเกตนี้ เราสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซลานแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ อายุบ่ม 60 วัน อัตราส่วนแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์

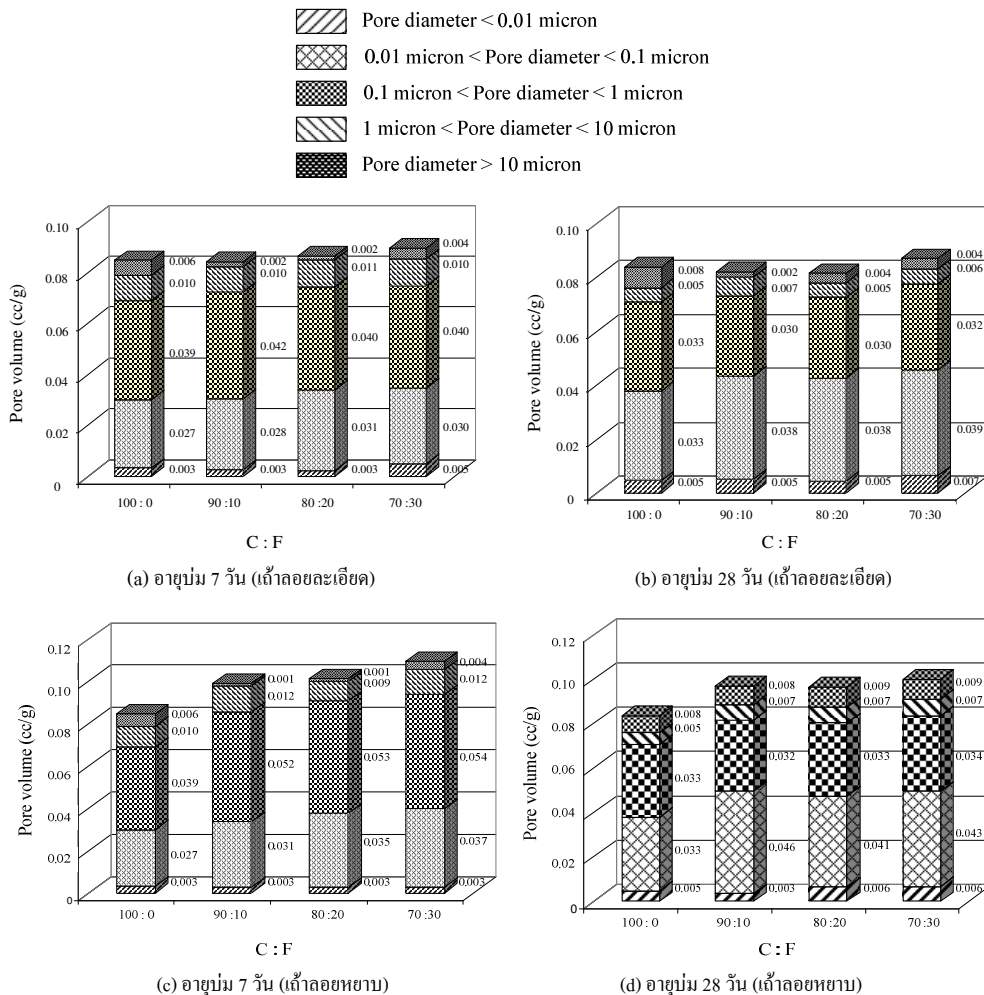


ภาพที่ 4 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด อายุบ่ม 60 วันอัตราส่วนแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 5 แสดงการกระจายตัวของขนาดโพรงและปริมาตรโพรงทั้งหมด ดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่อายุบ่มและ

อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อายุบ่มหนึ่ง ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีปริมาณโพรงทั้งหมด (Total pore volume) ต่ำกว่าดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ ปรากฏการณ์นี้ สอดคล้องกับภาพถ่ายขยาย สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ ปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยหยาบมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินและ

ปูนซีเมนต์ ดังนั้น การเพิ่มเถ้าลอยหยาบจึงเป็นการเพิ่มมวล หยาบส่งผลให้โพรงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 5(c) และ (d) แต่สำหรับ ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด การกระจายขนาดโพรงมีลักษณะ เกือบเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย เพราะ การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยละเอียดมี ลักษณะคล้ายกัน อีกทั้ง D_{50} ยังมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 5 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มต่างๆ

แม้ว่าการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จะเห็นว่าโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์ทั้งเถ้าลอยหยาบและเถ้าลอยละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณมากกว่า

ของดินซีเมนต์ไม่ผสมเถ้าลอย แต่กำลังอัดดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การกระจายขนาดโพรงเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ

ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์โพรงในมวลดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการศึกษา TGA

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ จากผลการศึกษา จะเห็นว่า Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดจะสูงกว่า เถ้าลอยหยาบสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มหนึ่ง Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ เถ้าลอยหยาบและละเอียดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 10 เปอร์เซ็นต์ แต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของ เถ้าลอยในคอนกรีต โดย Ca(OH)_2 มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มขึ้นปริมาณและความละเอียดของเถ้าลอย [10]

ตารางที่ 1 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH)_2 (%)		
			TGA Analysis	Hydration	Induced
7	100:0	-	6.67	6.67	0.00
	90:10	CFA	6.97	6.00	0.97
	80:20	CFA	6.79	5.34	1.45
	70:30	CFA	6.39	4.67	1.72
	90:10	OFA	6.77	6.00	0.77
	80:20	OFA	6.66	5.34	1.32
	70:30	OFA	6.12	4.67	1.45
	60	100:0	-	6.82	6.82
90:10		CFA	7.16	6.14	1.02
80:20		CFA	6.92	5.46	1.46
70:30		CFA	6.68	4.77	1.91
90:10		OFA	6.89	6.14	0.75
80:20		OFA	6.81	5.46	1.35
70:30		OFA	6.53	4.77	1.76
120		100:0	-	7.08	7.08
	90:10	CFA	7.29	6.37	0.92
	80:20	CFA	6.96	5.66	1.30
	70:30	CFA	6.70	4.96	1.74
	90:10	OFA	7.09	6.37	0.72
	80:20	OFA	6.85	5.66	1.19
	70:30	OFA	6.68	4.96	1.72

จากภาพถ่ายขยายและผลการกระจายขนาดโพรง เราสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้เอง ผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ดังแสดงในตารางที่ 1

ปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่เกิดจากอิทธิพลร่วม (อิทธิพลจากไฮดรอกไซด์และการกระจายตัว) และจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมหาได้โดยตรงจากผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์เถ้าลอย ในทำนองเดียวกัน Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์สามารถหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับของดินซีเมนต์เถ้าลอย เพื่อความง่าย Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ใดๆ สามารถประมาณได้จาก Ca(OH)_2 ที่ทราบค่าของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง โดยการสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ [11] ดังนั้น Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ (H) ที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งสามารถประมาณได้จาก

$$H = T \times \left(1 - \frac{F}{100}\right) \quad (1)$$

เมื่อ T คือ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ (อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง และ F คืออัตราส่วนการแทนที่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

Sinsiri et al. [12] ได้แสดงให้เห็นว่า Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ (H) เสมอ เนื่องจากการใช้ Ca(OH)_2 ในปฏิกิริยาปอสลาน แต่ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าลอย Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าลอยและอัตราส่วนการแทนที่ สำหรับทุกอายุบ่ม

5. วิเคราะห์ผล

ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และดินต่างเป็นวัสดุอนุภาค (Particulate material) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยต่างๆ ที่อิสระต่อกัน วัสดุอนุภาคอาจจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ สำหรับการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และดินเหนียวจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เถ้าลอย ดินตะกอน และทราย จัดเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เนื่องจากมี Specific surface ต่ำ และไม่มีประจุที่ผิว ซีเมนต์พิเศษจะทำหน้าที่เชื่อมต่อโครงสร้างดินซีเมนต์เถ้าลอยเข้าด้วยกัน โดยวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะถูกฝังอยู่ในโครงสร้าง (Embedded state)

เนื่องจากปูนซีเมนต์และดินเหนียวเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อดินเหนียวถูกผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ อนุภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดินและซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น

6. บทสรุป

เถ้าลอยในดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเกิดจากอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก เถ้าลอยจะทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง จึงทำให้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีผิวสัมผัสที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนแทนที่)

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นอย่างสูงสำหรับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือการสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อเฟื้อด้านอุปกรณ์ทดสอบและทุนสนับสนุน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย, 109
- [2] Owens, P.L. (1979). Fly ash and its usage in concrete. *Concrete, Journal of concrete Society*, 13, 21-26.
- [3] Horpibulsuk, S., Miura, N. and Bergado, D.T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE., 130(10), 1096-1105.
- [4] 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), 439-444.
- [5] Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004). Compressibility of cement admixed clays at high water content. *Geotechnique*, 54(2), 151-154.
- [6] Nontananandh, S., Yoobanpot, T., and Boonyong, S. (2005). Scanning electron microscopic investigations of cement stabilized soil. *Proc. 10th National Convention on Civil Engineering: GTE23-GTE26*.
- [7] สุขสันต์ หอพิบูลสุข รุ่งลาวัลย์ ราชัน ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ .2549 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอย. วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.
- [8] Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. *Soils and Foundations*, 49(1), 85-98.
- [9] ยุทธนา รักษชนม์. 2551. กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [10] Chindaprasirt, 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, 225-258.
- [11] เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และ วิศวะ จักรไพศาล, 2542. ผลกระทบของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง. การประชุมสัมมนาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 90-97.
- [12] Sinsiri, T., Jaturapitakul, C., and Chindaprasirt, P. (2006). Influence of fly ash fineness on calcium hydroxide in blended cement paste. *Proceedings of Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006)*, Khon Kaen University, Thailand.