ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ

Portland Cement Containing Fly Ash, Microsilica and Superplasticizer

ปริญญา จินดาประเสริฐ*
สันติสุข เชื่อมชัยตระกูล**

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ขี้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะ ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ Sulphonate Naphthalene Formaldehyde Condensate ได้ทำการศึกษาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม ความข้นเหลวปกติและเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมเท่ากับ 3% การผสมขี้เถ้าลอยจะทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการผสมไมโครซิลิกาจะทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดที่สูงขึ้น การผสมทั้งขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัด การผสมขี้เถ้าลอยจะทำให้กำลังรับแรงอัดระยะต้นลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้ช้า ส่วนการผสมไมโครซิลิกาจะทำให้กำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลายดีขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกามีความละเอียดสูงมากทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้รวดเร็วขึ้น

Abstract

The properties of Portland cement, which contains fly ash, microsilica and superplasticizer were studied. Portland cement Type I, lignite fly ash from Mae Moh thermal power plant, microsilica and sulphonate napthalene formaldehyde condensate superplasticizer were used. Properties studied were optimum superplasticizer content ; normal consistency and setting time of cement paste; and compressive strength of mortar. It was found that the optimum superplasticizer content was 3%. The addition of fly ash resulted in a small increase in water requirement. The addition of microsilica greatly increased water requirement because of increased finenesses. The addition of both fly ash and microsilica increased the initial and final setting time. Regarding compressive strength, the addition of fly ash caused a decrease in early strength because the pozzolanic reaction from the fly ash was slow. The addition of microsilica, however, resulted in an increase in strength both at an early and at a later stage. This was due to the very high fineness of microsilica which resulted in an early pozzolanic reaction.

*รองศาสตราจารย์

**นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

1. บทนำ

ขี้เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย ขี้เถ้าลอยจำนวนมากมาจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้มาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าประมาณ 32,000 ตันต่อวัน ซึ่งจะได้ขี้เถ้าลอยประมาณ 6,400 ตันต่อวัน (ก.ฟ.ผ., 2536) ในสมัยแรกขี้เถ้าลอยที่ได้มีปริมาณคัลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur Trioxide, SO_3) ผสมอยู่ในปริมาณสูง ขี้เถ้าลอยนี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุซีเมนต์ในตัวเองสามารถนำมาทำมอร์ตาร์และคอนกรีต แต่กำลังรับแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ และมีการขยายตัวสูง ขี้เถ้าลอยนี้สามารถใช้เป็นสารปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตที่ไม่รับแรงสูงมากได้ (ปริญญา และ อินทรชัย, 2528) ขี้เถ้าลอยที่ได้ในปัจจุบันมีคุณสมบัติดีขึ้น มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินาสูงขึ้น อีกทั้งยังมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำลงและอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 (วราภรณ์, 2536)

ไมโครซิลิกา (Microsilica) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ซิลิกาฟูม (Silica Fume) เป็นวัสดุพลอยได้ (By-products) ที่ได้จากการผลิตโลหะเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ไมโครซิลิกามีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 ซึ่งมีประมาณ 90-96% มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 80-100 เท่า ไมโครซิลิกาสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานได้เช่นเดียวกัน

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงอายุมากขึ้น (Chindaprasirt; et. al., 1985) เมื่อผสมไมโครซิลิกากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลายสูงขึ้น (ปริญญา และ บวรธรรม, 2536) นอกจากนี้การผสมไมโครซิลิกาจะทำให้ส่วนผสมมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นแนวทางแก้ปัญหาทางหนึ่งคือการใช้สารลดน้ำพิเศษผสมในคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาเพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ลง เนื่องจากการที่อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ลดลงจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดีขึ้น

2. การทดสอบ

2.1 แผนการทดสอบ

ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ

2.1.1 การหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 และ 7 วัน มอร์ตาร์ทำจากสารซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา โดยน้ำหนักเท่ากับ 70: 20:10 และใส่สารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมคือ ปริมาณที่ให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูง

2.1.2 การทดสอบความข้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ โดยใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่

เหมาะสมซึ่งได้จากผลการทดสอบในข้อ 2.1.1

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- ขี้เถ้าลอย ได้มาจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง วัดความละเอียดได้ 3,100 ซม^2/กรัม เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และมี ถ.พ.เท่ากับ 2.40
- ไมโครซิลิกา มี ถ.พ.เท่ากับ 2.20
- สารลดน้ำพิเศษ ใช้สาร Sulphonate Napthalene Formaldehyde Condensate
- ทราย ใช้ทรายพุทไธสง ร่อนผ่านแร่งเบอร์ 16 ค้างแร่งเบอร์ 30 ร้อยละ 75 และร่อนผ่านแร่งเบอร์ 40 ค้างแร่งเบอร์ 50 ร้อยละ 25
- น้ำ ใช้น้ำประปา

2.3 วิธีการทดสอบ

หาปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM C187 หาระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบไวแคต (Vicat) ตามมาตรฐาน ASTM C191 และทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 50 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C109

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 และ 7 วันของลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 70% ขี้เถ้าลอย 20% ไมโครซิลิกา 10% และสารลดน้ำพิเศษ 0-4% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ที่ค่าการไหลแผ่คงที่ 110 + 5% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 และ 7 วันจะมีค่าสูงสุดเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสูงกว่านี้ กำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมจะลดลง การผสมสารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากเกินจะทำให้ส่วนผสมมีปริมาณน้ำอิสระมากเกินไป และเกิดการแยกตัวได้ง่ายเป็นผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Stuart; et. al., 1980) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์สำหรับการทดสอบ

3.2 ความข้นเหลวปกติ

ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าขี้เถ้าลอยทำให้ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะถึงแม้ขี้เถ้าลอยจะมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย แต่ขี้เถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลมจะช่วยทำให้เพสต์มีความลื่นไหลดีขึ้น ลดความเสียดทานระหว่างมวลรวม (Chindaprasirt; et. al., 1985) เป็นผลให้ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ไมโครซิลิกาทำให้ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกามีความละเอียดสูง และมีความต้องการน้ำมาก (ปริญญา และ บวรธรรม, 2535) และจะเห็นได้ว่าการผสมขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้งขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาทำให้ปริมาตรของวัสดุซีเมนต์ (Cementitious Material) เพิ่ม โดยไมโครซิลิกาทำให้ความข้นเหลวปกติเพิ่มขึ้นมากกว่าขี้เถ้าลอย เพราะไมโครซิลิกามีความละเอียดสูงกว่าและต้องการน้ำมากกว่า

3.3 ระยะเวลาก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา

และสารลดน้ำพิเศษได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารลดน้ำพิเศษ 3% มีเวลาก่อตัวไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งเวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาก่อตัวระยะปลาย เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ยังคงเหมือนเดิม เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษจึงไม่ทำให้ระยะเวลาก่อตัวเปลี่ยนไป (เอกสิทธิ์, 2533) การผสมขี้เถ้าลอย 10, 20 และ 30% หรือผสมไมโครซิลิกา 5, 10 และ 15% หรือผสมทั้งขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น การผสมขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองสาเหตุนี้เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเพิ่มขึ้น (ปริญญา และ อินทรชัย, 2528)

3.4 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และรูปที่ 3ก-3ง จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าการผสมสารลดน้ำพิเศษ 3% จะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนดีขึ้นมาก จากการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมจากอัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.484 เป็น 0.362 ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ 28 วันเพิ่มขึ้นจาก 277กก/ซม^2 เป็น 333 กก/ซม^2 และจากตารางที่ 2 และรูปที่ 3ก จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีขี้เถ้าลอยผสมอยู่ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณไมโครซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกาเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมากจึงทำให้ว่องไวในการที่จะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างมวลต่าง ๆ จึงส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมไมโครซิลิกามีการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลาย (ปริญญา และ บวรธรรม, 2535) กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นจาก 333 กก/ซม^2 เป็น 365, 400 และ 450 กก/ซม^2 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไมโครซิลิการ้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณคงที่เท่ากับ 10% และสารลดน้ำพิเศษ 3% จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3ข จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 90:10:0 จะมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28 และ 90 วันใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดที่อายุเดียวกันของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และเมื่อปริมาณไมโครซิลิกาเพิ่มมากขึ้นโดยส่วนผสมมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 85:10:5, 80:10:10 และ 75:10:15 มอร์ตาร์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นทุกช่วงอายุ โดยกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครซิลิกา เนื่องจากไมโครซิลิกาจะช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลาย อีกทั้งขี้เถ้าลอยก็ยังมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะปลายอีกด้วย โดยที่ส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอย 10% จะมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 และ 90 วัน สูงกว่าส่วนผสมที่ไม่มีขี้เถ้าลอยอีกเล็กน้อย

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 20% และสารลดน้ำพิเศษ 3% จากตารางที่ 2 และรูปที่ 3ค จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 80:20:0 จะมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุเดียวกันของมอร์ตาร์ที่ทำ

จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจะทำให้กำลังรับแรงอัดช่วงต้นของส่วนผสมลดลง แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน กำลังรับแรงอัดที่ได้จะสูงกว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุเดียวกันของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของขี้เถ้าลอยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหลือบางส่วนด้วยไมโครซิลิกา ทำให้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 75:20:5, 70:20:10 และ 65:20:15 พบว่ามอร์ตาร์จะมีกำลังรับแรงอัดดีขึ้นตามปริมาณไมโครซิลิกาที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของแรงกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการเพิ่มปริมาณไมโครซิลิกาจะน้อยกว่าส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอย 0 และ 10% (รูปที่ 3ก และ 3ข) ทั้งนี้เพราะ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหลืออยู่จากการแทนที่ด้วยขี้เถ้าลอย และไมโครซิลิกามีปริมาณลดลง ทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เป็นผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างไมโครซิลิกาและคัลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นได้น้อยลง ซึ่งทำให้การพัฒนากำลังรับแรงโดยเฉพาะช่วงต้นเกิดขึ้นได้ไม่มาก กำลังรับแรงของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นจากการปฏิกิริยาของไมโครซิลิกาจึงเกิดขึ้นได้ไม่มากนัก

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 30% และสารลดน้ำพิเศษ 3% จากตารางที่ 2 และรูปที่ 3ง จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 70:30:0 จะมีกำลังรับแรงต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนทุกช่วงอายุโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุ 3 และ 7 วัน เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลงเหลือ 70% และที่อายุ 28 และ 90 วัน กำลังรับแรงจะลดลงไม่มากนัก เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากขี้เถ้าลอยจะเกิดขึ้นและชดเชยกำลังรับแรงที่ลดลงและเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหลือบางส่วนด้วยไมโครซิลิกา ทำให้ส่วนผสมมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา เท่ากับ 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10 และ 55:30:15 จะพบว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณไมโครซิลิกาที่เพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจะไม่สูงเท่ากับส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอยอยู่น้อยกว่าคือ 0, 10 และ 20% (รูปที่ 3ก 3ข และ 3ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมขี้เถ้าลอยเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง และมีผลต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมในส่วนรวม

4. บทสรุป

จากการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 ในการศึกษานี้ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่พอเหมาะสำหรับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย และไมโครซิลิกามีค่าเท่ากับ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ปริมาณการใส่สารลดน้ำพิเศษที่มากกว่านี้จะทำให้ส่วนผสมมีปริมาณน้ำอิสระมากเกินไป และเกิดการแยกตัวได้ง่ายเป็นผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง การใส่สารลดน้ำพิเศษจะทำให้สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ลงได้มาก เป็นผลให้กำลังรับแรงของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างมาก

4.2 ไมโครซิลิกามีความละเอียดมากทำให้ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ขี้เถ้าลอยมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย แต่เนื่องจากมีรูปร่างทรงกลมจึงทำให้ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ลดลง ขี้เถ้าลอยจะทำให้ความข้นเหลวปกติของเพสต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากขี้เถ้าลอยมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่มาก ส่วนไมโครซิลิกาจะทำให้ความข้นเหลวปกติของเพสต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกา

มีความละเอียดสูงมากทำให้ต้องการน้ำมาก ไมโครซิลิกาและขี้เถ้าลอยทำให้ระยะเวลาของการก่อตัวเพิ่มขึ้น การผสมขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง อีกทั้งยังทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาเพิ่มขึ้น

4.3 ไมโครซิลิกามีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามาก การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยไมโครซิลิกาจะทำให้กำลังรับแรงอัดทั้งระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าลอยจะทำให้กำลังรับแรงอัดระยะต้นลดลง แต่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุมากคือที่ 28 และ 90 วัน จะดีขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานและการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาในปริมาณมากจะทำให้การพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาของไมโครซิลิกาเกิดได้น้อยลง

5. เอกสารอ้างอิง

ก.พ.ผ. 2536. **ข้อมูลสำคัญสำหรับผู้บริหาร.** เอกสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ บวรธรรม ไชยเอีย. 2536. คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมไมโครซิลิกา สารลดน้ำพิเศษและสารเร่งการก่อตัว. **วิศวกรรมสาร.** 46(6): 62-65.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร. 2536. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบขี้เถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษ. **ในเอกสารการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำขี้เถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์,** หน้า 5-19. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร. 2528. **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ.** ขอนแก่น: สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วราภรณ์ คุณาวนากิจ. 2536. คุณสมบัติพื้นฐานของขี้เถ้าลอยลิกไนต์. ใน **เอกสารการสัมมนาวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำขี้เถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์,** หน้า 2-15. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. 2533. **ความเป็นมาของคอนกรีตกำลังสูง.** เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ความก้าวหน้าในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 19 มิถุนายน.

Chindaprasirt, P.; Hovichitr, I and Pinnarat, C. 1985. **Further Study of Portland Cement Containing Mae-Moh Fly Ash.** Japan-Thai Civil Engineering Conference, Recent Advances in Structural Engineering. Bangkok, Thailand, 14-15 March.

Stuart, K.D.; et al. 1980. Compressive Strength Studies on Portland Cement Mortars Containing Fly Ash and Superplasticizer. **Cement and Concrete Research.** 10(6) : 823-832.

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3%

OPC : FA : MS	ความข้นเหลวปกติ (%)	เวลาก่อตัว (นาที)	
		ระยะต้น	ระยะปลาย
100 : 0 : 0*	25.6	105	216
100 : 0 : 0	20.0	112	224
95 : 0 : 5	20.6	138	256
90 : 0 : 10	21.4	143	275
85 : 0 : 15	22.1	160	282
90 : 10 : 0	20.4	130	252
85 : 10 : 5	21.2	150	270
80 : 10 : 10	21.8	165	296
75 : 10 : 15	22.3	178	304
80 : 20 : 0	21.0	145	270
75 : 20 : 5	21.7	153	284
70 : 20 : 10	22..1	166	305
65 : 20 : 15	22.7	190	311
70 : 30 : 0	21.8	165	300
65 : 30 : 5	22.0	172	310
60 : 30 : 10	22.5	185	312
55 : 30 : 15	23.2	200	330

หมายเหตุ : 1. OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ FA = ขี้เถ้าลอย MS = ไมโครซิลิกา

*2. * = ไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ*

ตารางที่ 2 ผลการทดลองอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์และกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์

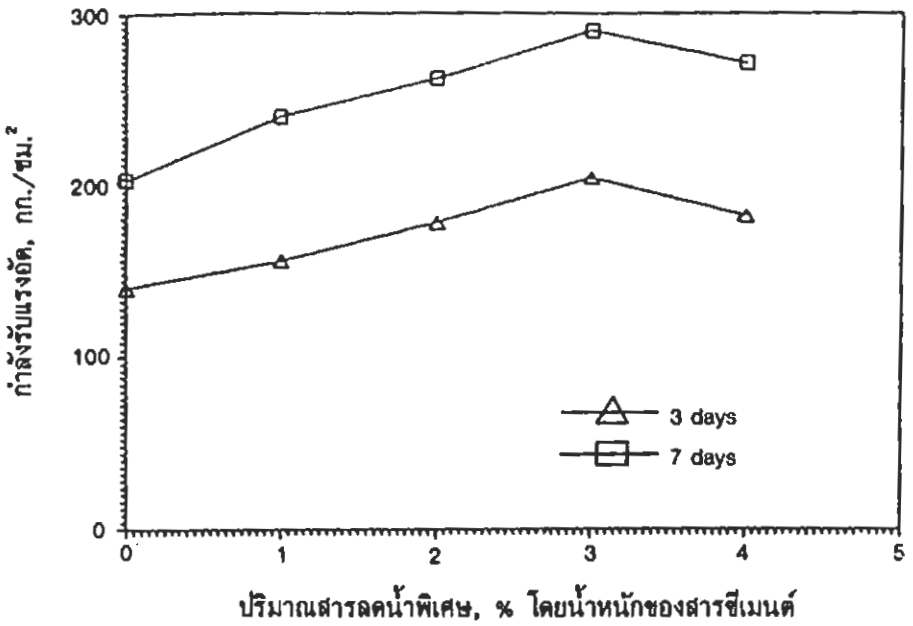
OPC : FA : MS	น้ำ/สารซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด, กก./ซม.^{2}			
		3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
100 : 0 : 0*	0.484	140	203	277	290
100 : 0 : 0	0.362	203	262	333	354
95 : 0 : 5	0.372	225	302	365	412
90 : 0 : 10	0.392	240	320	400	480
85 : 0 : 15	0.412	265	369	450	538
90 : 10 : 0	0.352	193	253	340	368
85 : 10 : 5	0.368	209	290	370	416
80 : 10 : 10	0.384	238	330	445	503
75 : 10 : 15	0.408	252	380	465	547
80 : 20 : 0	0.344	167	235	326	363
75 : 20 : 5	0.364	196	275	352	391
70 : 20 : 10	0.380	204	290	364	463
65 : 20 : 15	0.400	224	298	410	487
70 : 30 : 0	0.334	146	184	290	330
65 : 30 : 5	0.347	182	243	319	344
60 : 30 : 10	0.364	195	258	340	392
55 : 30 : 15	0.385	201	277	375	408

หมายเหตุ : 1. *OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ FA = ขี้เถ้าลอย MS = ไมโครซิลิกา*

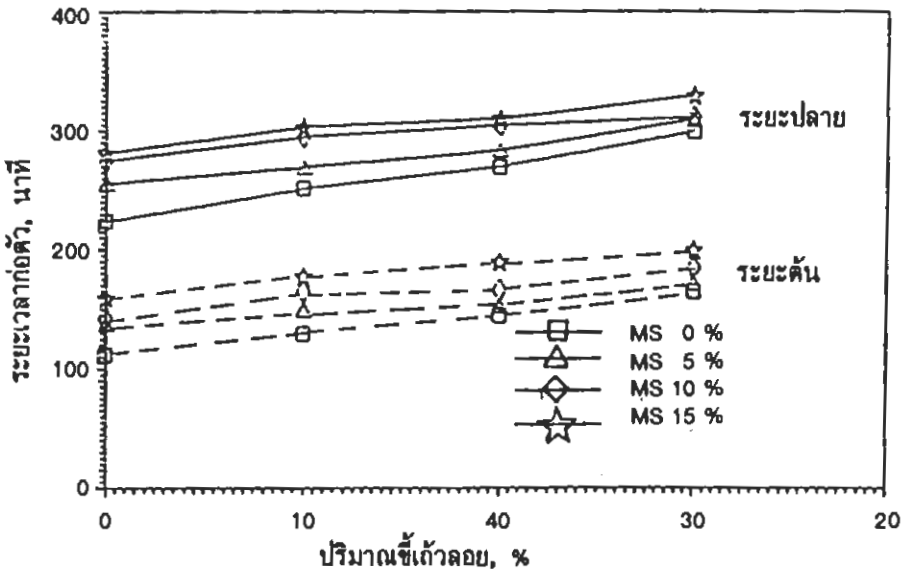
2. *ค่าการไหลแผ่ ร้อยละ 110 ±5*

3. *ทรายต่อสารซีเมนต์ เท่ากับ 2.75*

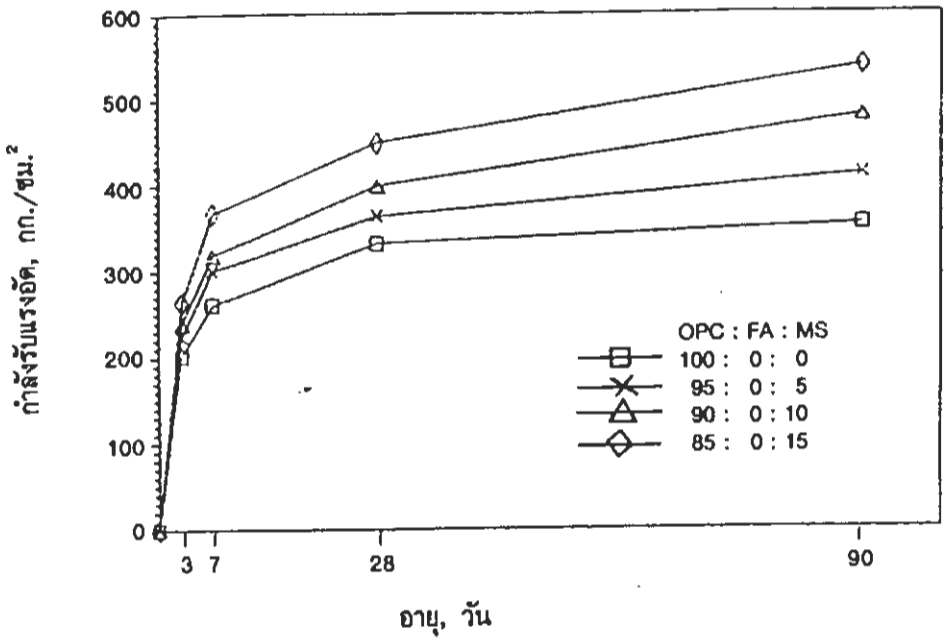
4. ** = ไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ*



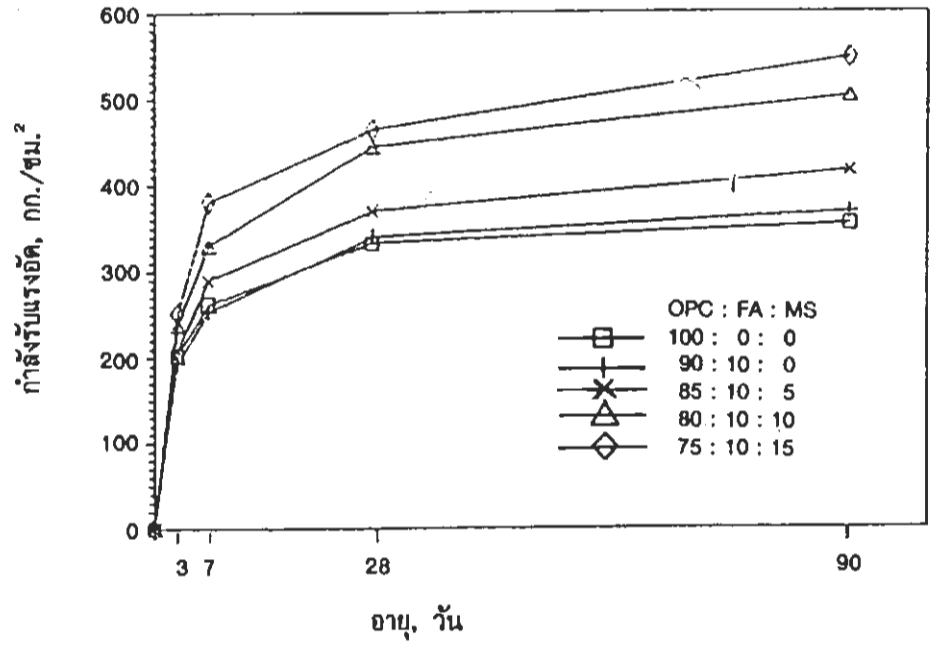
รูปที่ 1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าลอย : ไมโครซิลิกา 70 : 20 : 10 และสารลดน้ำพิเศษที่อายุ 3 และ 7 วัน



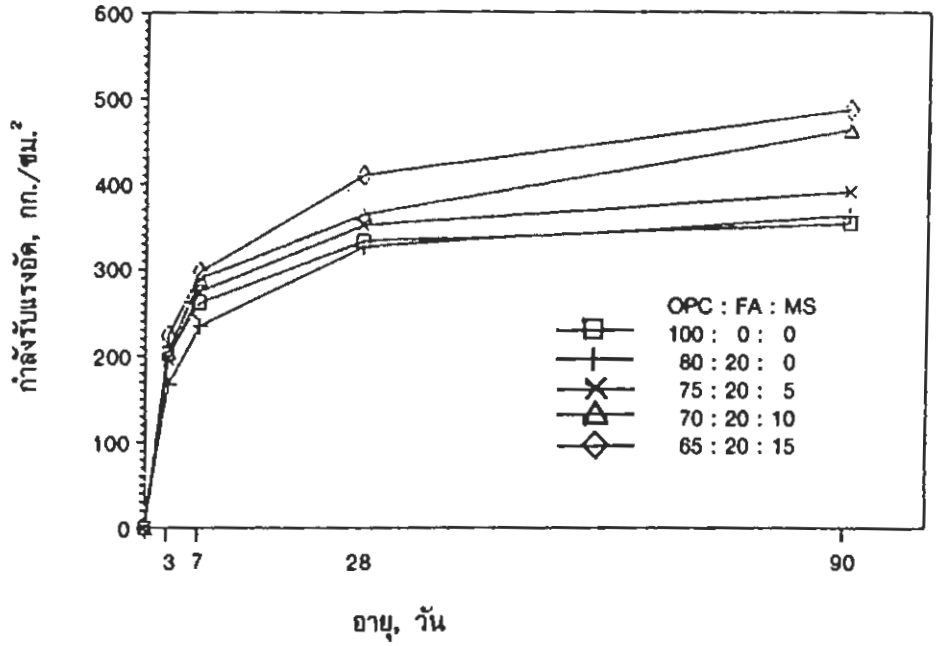
รูปที่ 2 ระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์



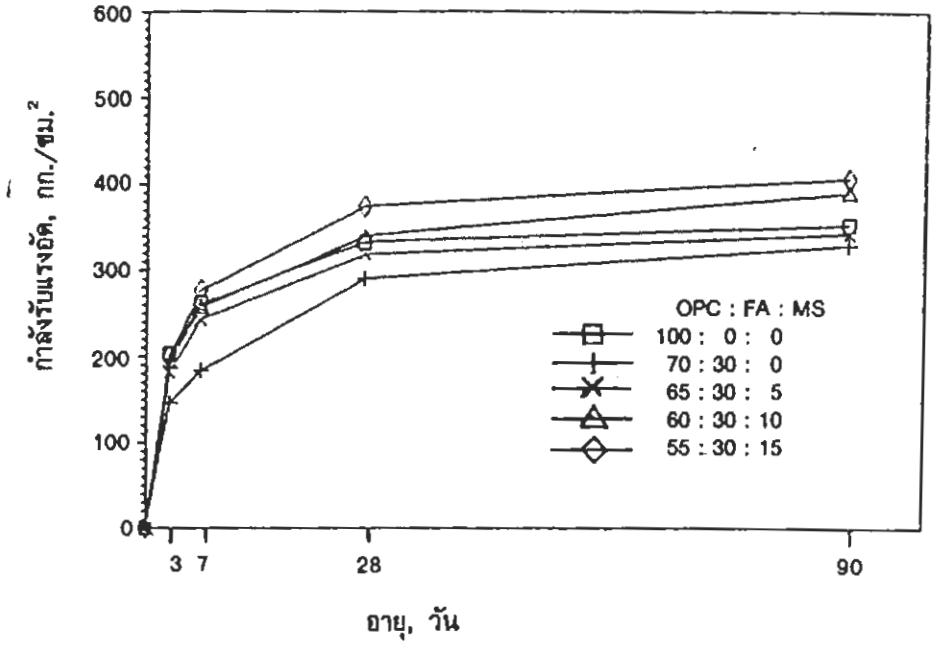
รูปที่ 3ก กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% (ขี้เถ้าลอย 0%)



รูปที่ 3ข กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% (ขี้เถ้าลอย 10%)



รูปที่ 3ค กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% (ขี้เถ้าลอย 20%)



รูปที่ 3ง กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ 3% (ขี้เถ้าลอย 30%)