คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด

Properties of Portland Cement Containing Selected-Size Fly Ash

ปริญญา จินดาประเสริฐ *
สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี**
ธีระพงษ์ แก้วคง***

บทคัดย่อ

ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด การทดสอบใช้เถ้าลอย 4 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยธรรมดา (FA I) เถ้าลอยร่อนผ่านแร่งเบอร์ 200 (FA II) เถ้าลอยร่อนผ่านแร่งเบอร์ 300 (FA III) และเถ้าลอยละเอียด (FA IV) ที่ได้จากเครื่องแยกขนาดโดยใช้แรงลม (Cyclone Separator) จากการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตรา 0-60% ทำให้การก่อตัวระยะต้นของเพสต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย การก่อตัวระยะปลายเพิ่มขึ้นมาก และทำให้ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ลดลงเนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลมทำให้ส่วนผสมลื่นไหลได้ดี แต่เถ้าลอยที่ละเอียดมากทำให้มอร์ต้าร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยธรรมดา เถ้าลอยยังช่วยทำให้การคายน้ำของมอร์ต้าร์ลดลงทั้งนี้เถ้าลอยที่ละเอียดกว่าจะลดการคายน้ำได้มีประสิทธิภาพกว่า ในด้านกำลังรับแรงอัด เถ้าลอยที่ละเอียดเพิ่มกำลังแรงอัดระยะปลายขึ้นมากในขณะที่กำลังรับแรงอัดระยะต้นลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เถ้าลอยที่ละเอียดยังเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรด และทำให้การหดตัวเมื่อตากแห้งของมอร์ต้าร์ลดลง

Abstract

The properties of Portland Cement Containing selected size fly ash were studied. Four types of fly ash viz. normal fly ash (FA I), fly ash passed No. 200 sieve (FA II), fly ash passed No. 300 sieve (FA III) and very fine fly ash (FA IV) obtained from cyclone separator were used. From the studies, it was found that the use of fly ash to replace 0-60% of Portland cement resulted in a small increase in the initial setting time of the paste and a large increase in the final setting time. The water requirement of mortar was reduced owing the spherical shape of fly ash which facilitated the flow of mortar. However, the very fine fly ash caused a small increase in the water require of mortar in comparison with that of normal fly ash. Fly ash also reduced the bleeding of mortar; the reduction was more effective for the finer fly ash. With regard to the compressive strength, the fine fly ash increased significantly the strength of mortar at a later stage while the initial compressive strength was only marginally reduced. Furthermore, the fine fly ash increased the resistance to acid attack and reduced the drying shrinkage of mortar.

*รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น
**อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น
***นักศึกษาปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1. บทนำ

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้ความร้อนสูงและค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานเป็นต้นทุนที่สูงมาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-Pozzolan Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับสารปอซโซลาน (ASTM C595) สารปอซโซลานที่มีอยู่ในปริมาณที่สามารถนำมาใช้เชิงอุตสาหกรรมได้คือ เถ้าลอย (Fly Ash) โดยทั่วไปการผสมสารปอซโซลานจะทำให้ความร้อนของไฮเดรชันต่ำลง และกำลังรับแรงในช่วงแรกจะต่ำลงด้วย แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยให้กำลังรับแรงช่วงปลายดีขึ้น และทำให้คุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของคอนกรีต เช่น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีดีขึ้น

เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย เถ้าลอยจำนวนมากมาจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้มาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าประมาณ 35,000 ตันต่อวัน (สมชัย, 2539) ซึ่งจะได้เถ้าลอยที่เป็นปัญหาด้านการจัดเก็บ และนำไปทิ้งประมาณเกือบ 7,000 ตันต่อวัน ในสมัยแรกเถ้าลอยที่ได้มีปริมาณคัลเซียมอ๊อกไซด์ (Calcium Oxide) และซัลเฟอร์ไตรอ๊อกไซด์ (Sulfur Trioxide) ผสมอยู่ในปริมาณสูง เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุซีเมนต์ในตัวเองสามารถนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ทำมอร์ต้าร์และคอนกรีต แต่กำลังรับแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ และมีการขยายตัวสูง สามารถใช้เป็นสารปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานซึ่งสามารถนำมาใช้งานคอนกรีตที่ไม่รับแรงสูงมากได้ (Cnindaprasirt และคณะ 1985) เถ้าลอยที่ได้ในปัจจุบันมีคุณสมบัติดีขึ้น มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินาสูงขึ้น อีกทั้งยังมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำลงและอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618 (วราภรณ์, 2536) จึงได้มีความพยายามที่จะนำเอาเถ้าลอยไปใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้น โดยสมชัย (2536) ได้นำเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน ปริญญา และสันติสุข (2539) และไกรวุฒิ และคณะ (2539) ได้พยายามนำเถ้าลอยมาศึกษาข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป

เถ้าลอยตามปกติจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้กำลังรับแรงระยะต้นลดลง (ปริญญา และอินทรชัย, 2528 ; ปริญญา และสันติสุข, 2539) ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาได้ช้าและเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจะมีผลช่วยให้กำลังระยะปลายดีขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะขึ้นอยู่กับความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความละเอียด ดังนั้นการใช้เถ้าลอยคัดขนาด (SelectedSize) จะช่วยให้สามารถปรับปรุงกำลังรับแรงและคุณสมบัติอื่น ๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยได้

2. การทดสอบ

2.1 การทดสอบได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ

(1) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย คุณสมบัติที่จะทำการทดสอบ ได้แก่ ความละเอียด และความถ่วงจำเพาะ

(2) การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย โดยทดสอบทั้งเพสต์และ

มอร์ต้าร์ ทดสอบที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 100 : 0, 80 : 20 และ 60 : 40 โดยทำการทดสอบค่าความข้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และทำการทดสอบการคายน้ำกำลังรับแรงอัด การต้านทานสารเคมี และการหดตัวเมื่อตากแห้งของมอร์ต้าร์

2.2 วัสดุที่ใช้

(1) ปูนซีเมนต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(2) เถ้าลอยที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

(2.1) เถ้าลอยไม่ได้คัดขนาด ใช้สัญลักษณ์ FA I

(2.2) เถ้าลอยร่อนผ่านแร่ง เบอร์ 200 ใช้สัญลักษณ์ FA II

(2.3) เถ้าลอยร่อนผ่านแร่ง เบอร์ 325 ใช้สัญลักษณ์ FA III

(2.4) เถ้าลอยที่ผ่านเครื่องแยกขนาดที่ใช้แรงลม (Cyclone Separator) ใช้สัญลักษณ์ อพ ก

(3) ทรายเป็นทรายจาก ภาคกลาง ผ่านแร่งเบอร์ 8 อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

(4) น้ำใช้น้ำประปา

2.3 วิธีการทดสอบ

หาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C188 หาความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C204 ตามวิธีของเบลน (Blaine) หาปริมาณน้ำที่มีความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C187 หาเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เข็มไวแคต (Vicat Needle) ตามมาตรฐาน ASTM C191 ทดสอบการคายน้ำของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C243 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ขนาด 50 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 ทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อสารเคมี ของลูกบาศก์มอร์ต้าร์ขนาด 50 มม. โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 5% ซึ่งการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C267 และทดสอบการหดตัวเมื่อตากแห้งของแท่งมอร์ต้าร์ ขนาด 25 × 25 × 285 มม. ที่อุณหภูมิ 23 ± 20 °ซ และความชื้นสัมพัทธ์ 70 ± 10% ตามมาตรฐาน ASTM C596

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

จากการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3.12 และของเถ้าลอย FA I, FA II, FA III และ FA IV มีค่าเท่ากับ 2.10, 2.30, 2.45 และ 2.60 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ประกอบด้วยปริมาณของอ๊อกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นสูงมากกว่าเถ้าลอย ได้แก่ อ๊อกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียม มักเนเซียม และคัลเซียม ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยที่มีความแตกต่างกันเนื่องจากบางอนุภาคของเถ้าลอยมีโพรงอากาศ และกลวงเป็นรู (Enders, 1991) ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้เถ้าลอยที่คัดขนาดและละเอียดกว่ามีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า

เมื่อวัดความละเอียดโดยวิธีของเบลน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3360 ซม.^{2}/กรัม และเถ้าลอย FA I, FA II, FA III และ FA IV มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3540, 3930, 4650 และ 17160 ซม.^{2}/กรัมตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเถ้าลอย

ธรรมดา FA I มีพื้นที่ผิว 3540 ซม^2/กรัม ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งมีพื้นที่ผิว 3360 ซม^2/กรัม และเถ้าลอยที่ผ่านแร่งเบอร์ 200 (FA II) และ 300 (FA III) จะมีพื้นที่ผิวและความละเอียดสูงขึ้น โดยเถ้าลอย FA IV ซึ่งได้จากเครื่องแยกขนาดโดยใช้แรงลมมีความละเอียดสูงมาก ซึ่งแสดงว่าเครื่องแยกขนาดโดยใช้แรงลมสามารถแยกส่วนละเอียดของเถ้าลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

(ก) ความข้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย FA I, FA II และ FA III ค่าความข้นปกติจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลมทำให้เพสต์ลื่นไหลได้ดี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจะทำให้ความต้องการน้ำลดลง แต่สำหรับเถ้าลอย FA IV ที่มีความละเอียดสูงมาก ที่อัตราการแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20% จะทำให้ความข้นเหลวปกติลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 40% และ 60% กลับทำให้ความข้นเหลวปกติเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้องการน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณ และความละเอียดของเถ้าลอย

ส่วนผลการทดสอบการก่อตัวของเพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการแทนที่เถ้าลอย 0-40% ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้นและจะเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสูงกว่า 40% ส่วนการก่อตัวระยะปลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย 0-60% สำหรับเถ้าลอย FA I และ FA II แต่สำหรับเถ้าลอย FA III และ FA IV การแทนที่ด้วยเถ้าลอย 60% มีแนวโน้มทำให้การก่อตัวระยะปลายเริ่มที่จะชะลอการเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้ใกล้เคียงกับการทดสอบของปริญญา และอินทรชัย (2528) และเวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของทุกส่วนผสมอยู่ในช่วงที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C595 สำหรับปูนซีเมนต์ผสม (Blended Cement)

(ข) ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนทรายต่อสารซีเมนต์ 2.0, 2.5 และ 2.75 และที่ค่าการไหลแผ่คงที่ 110 ± 5% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ก, ข และ ค จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนทรายต่อสารซีเมนต์ทั้งสามอัตราส่วน ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีรูปร่างลักษณะทรงกลมจะช่วยทำให้มอร์ต้าร์ลื่นไหลได้ดีขึ้น การแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20% จะทำให้ปริมาณน้ำลดลงมากพอควร และเมื่อเถ้าลอยเพิ่มเป็น 40 และ 60% ตามลำดับ ปริมาณน้ำจะลดลงอีกเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนทรายต่อสารซีเมนต์ใด ๆ จะพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย FA I, FA II และ FA III จะทำให้มอร์ต้าร์ต้องการน้ำลดลง และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย FA IV ซึ่งมีความละเอียดสูง มอร์ต้าร์จะเริ่มมีความต้องการน้ำสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความละเอียดของเถ้าลอย

(ค) การคายน้ำของมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบการคายน้ำของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ได้

แสดงไว้ในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยทำให้มีการคายน้ำลดลง และการคายน้ำจะลดลงอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับเพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง ซึ่งได้แก่เถ้าลอย FA IV ซึ่งสาเหตุการคายน้ำเกิดจากการที่ส่วนประกอบที่เป็นของแข็งในมอร์ต้าร์ไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ น้ำที่เหลือจึงถูกคายออกจากส่วนผสมเถ้าลอยที่ละเอียดมีพื้นที่ผิวสูง จึงสามารถอุ้มน้ำได้มากทำให้เกิดการคายน้ำต่ำ

(ง) กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอยที่ค่าการไหลแผ่คงที่ 110 ± 5% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย FA I, FA II, FA III และ FA IV ที่อัตราการแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20, 40 และ 60 ที่อายุ 3 วัน จะต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน สาเหตุเนื่องจากการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง ซึ่งกำลังรับแรงช่วงแรกจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก ดังนั้นการลดปริมาณปูนซีเมนต์จึงทำให้กำลังรับแรงอัดช่วงแรกต่ำ และที่อายุ 7 วัน มอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย FA III และ FA IV ที่อัตราแทนที่ด้วยเถ้าลอย 20% มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่เมื่อเวลานานขึ้นที่อายุ 28 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยทุกชนิดในการทดสอบที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 และ 40 จะดีขึ้นมาก โดยที่กำลังรับแรงอัดจะสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเหลือ ซึ่งคัลเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าลอยได้อีก และที่อัตราการแทนที่ด้วยเถ้าลอยแต่ละชนิด 60% จะให้กำลังรับแรงต่ำ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เหลือน้อยและปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระก็มีน้อยด้วย กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากกว่าจะมีค่าสูงกว่า ซึ่งเถ้าลอย FA II และ FA III จะให้กำลังใกล้เคียงกันและสูงกว่าเถ้าลอย FA I และส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอย FA IV จะมีกำลังรับแรงสูงที่สุด เนื่องจากเถ้าลอยที่ละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลให้กำรับรับแรงอัดระยะต้นลดลงเพียงเล็กน้อย และกำลังอัดระยะปลายดีขึ้นมาก

(จ) การต้านทานต่อสารเคมี

ผลการทดสอบการต้านทานกรดซัลฟูริกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นการสูญเสียน้ำหนักจะลดลง โดยที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์จะลดลงเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์จากการกัดกร่อนของกรดเกิดจากคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระซึ่งเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาหรือถูกกัดกร่อนโดยสารละลายกรดซัลฟูริก ดังนั้นการลดปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าต่ำที่สุดจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมี นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะเพิ่มความทึบน้ำของมอร์ต้าร์ทำให้อัตราการซึมผ่านได้ต่ำ เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนได้น้อยลงด้วย (Kokubu, 1968) ส่วนผลของการทดสอบการสูญเสียกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ภายหลังจากแช่ในกรดซัลฟูริก 5% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของ

มอร์ต้าร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของเถ้าลอย โดยที่กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ธรรมดาจะลดลงมากที่สุด และส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมากขึ้นจะสูญเสียกำลังรับแรงอัดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของก้อนมอร์ต้าร์

(ฉ) การหดตัวเมื่อตากแห้ง

ผลการทดสอบการหดตัวเมื่อตากแห้งของแท่งมอร์ต้าร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการผสมเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้การหดตัวเมื่อตากแห้งลดลง ตามปริมาณการเพิ่มของเถ้าลอย การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะทำให้ส่วยผสมมีความต้องการน้ำลดลง และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณซีเมนต์เจล (Gel) ในส่วนผสมลดลงด้วย ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การหดตัวเมื่อตากแห้งลดลง นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มว่าแท่งมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าลอยที่ละเอียดจะให้การหดตัวเมื่อตากแห้งสูงกว่า การใช้เถ้าลอยที่ละเอียดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากขึ้นและเกิดซีเมนต์เจลมากขึ้นด้วย เป็นผลให้มอร์ต้าร์มีการหดตัวเมื่อตากแห้งสูงขึ้นได้

รูปที่ 8 แสดงถึงน้ำหนักที่ลดลงของแท่งมอร์ต้าร์ที่ถูกตากแห้ง จากรูปที่ 8 ก. จะเห็นได้ว่า มอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยธรรมดา FA I มีน้ำหนักลดลง เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริญญา และอินทรชัย (2528) ให้เหตุผลว่าน้ำที่สูญเสียที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นน้ำในโพรงคาปิลารี (Capillary Pore) ซึ่งจะมีมากขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยมากขึ้น และจากรูปที่ 8 ข, ค และ ง จะเห็นได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าลอยที่ละเอียดขึ้นจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยที่ละเอียดจะทำปฏิกิริยาได้มากกว่าและทำให้เกิดโพรงคาปิลารีน้อยลง

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อการศึกษาวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าบางมด ซึ่งได้เป็นผู้ประสานงานโครงการวิจัยและได้ช่วยมาโดยตลอด

5. บทสรุป

จากการทดสอบสมการสรุปผลได้ดังนี้

1.) ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3.12 และของเถ้าลอย FA I, FA II, FA III และ FA IV มีค่าเท่ากับ 2.10, 2.30, 2.45 และ 2.60 ซึ่งเถ้าลอยที่ละเอียดมีความถ่วงจำเพาะสูงเพราะอนุภาคของเถ้าลอยใหญ่บางอนุภาคเป็นรูกลวง

2.) ความละเอียดของปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 3360 ซม.^{2}/กรัม และของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2540, 3930, 4650 และ 17160 ซม.^{2}/กรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าเครื่องแยกขนาดโดยใช้แรงลมสามารถแยกขนาดของเถ้าลอยอย่างมีประสิทธิภาพ

3.) เถ้าลอยทำให้ความข้นเหลวปกติของเพสต์ลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลมจึงทำให้เพสต์ลื่นไหลได้ดี

4.) ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยอยู่ในช่วง 0-40% แต่เมื่อใช้เถ้าลอยมากกว่า 40% ขึ้นไประยะเวลาการก่อตัวระยะต้นจะเริ่มลดลง สำหรับการก่อตัวระยะปลายจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย แต่เมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงและปริมาณการแทนที่ 60% เวลาการก่อตัวระยะปลายมีแนวโน้มชะลอการเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีผลต่อการก่อตัวปลายมากกว่าการก่อตัวระยะต้น

5.) เถ้าลอยทำให้ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ลดลง แต่เมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดสูงจะเพิ่มความต้องการน้ำ

6.) การพัฒนากำลังรับแรงอัดระยะต้นของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เกิดในระยะต้น ประกอบกับการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ลดลง แต่เมื่อระยะเวลานานขึ้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน การผสมเถ้าลอยพอเหมาะในช่วง 0-40% ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ตลอดจนเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นและทำให้กำลังรับแรงอัดระยะปลายสูงขึ้นมาก

7.) การเพิ่มปริมาณและความละเอียดของเถ้าลอย จะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยสามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้เพิ่มขึ้น

8.) การคายน้ำของมอร์ต้าร์ลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะทำให้การคายน้ำของมอร์ต้าร์ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถอุ้มน้ำได้มาก

9.) การผสมเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้การหดตัวเมื่อตากแห้งลดลง การหดตัวเมื่อตากแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงลาปิลารี และการสูญเสียน้ำหนักจะลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจะลดโพรงคาปิลารีทำให้โครงสร้างของเจลแน่นขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ. 2539. การคัดเลือกเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต. ในเอกสารการประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, หน้า 257-269. กรุงเทพฯ 15-18 สิงหาคม.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และสันติสุข เชื่อมชัยตระกูล. 2539. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ. **วารสารวิจัย มข.** 1(1) : 1-11.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. 2528. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. รายงานวิจัยสำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท. ขอนแก่น : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมชัย กกกำแหง. 2539. การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. ใน เอกสารการสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, หน้า 4-1 ถึง 4-23. กรุงเทพฯ : สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 27-28 เมษายน 2536.

ASTM Standards. 1997. Annual Book of Standards. Easton : ASTM.

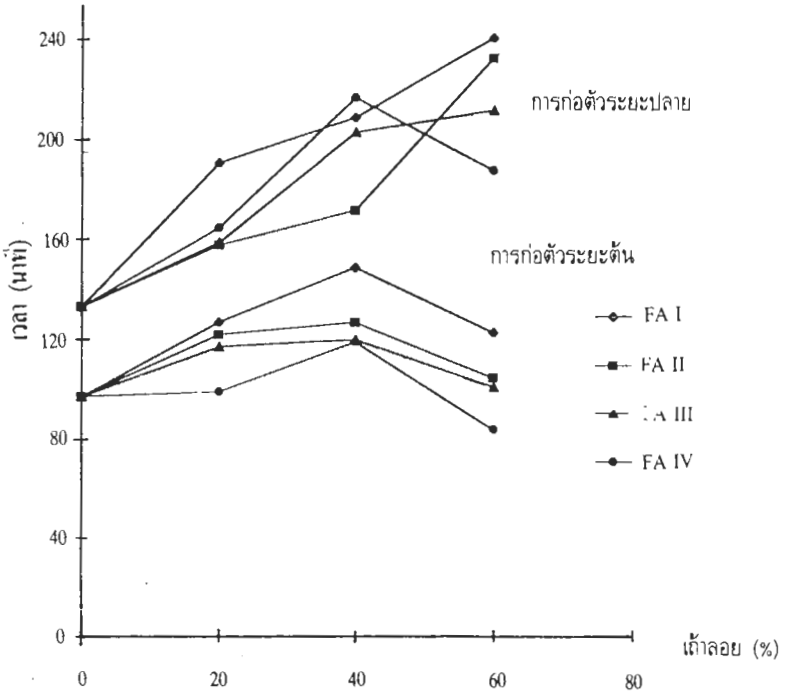
Chindaprasirt, P.; Hovichitr, I. and Pinnarat, C. 1985. Further study of Portland cement counting Mae-Moh fly ash. In : **Recent Advances in Structural Engineering,** pp. 47-65. Japan-Thai Civil Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 14-15 March 1997.

Enders, M. 1995. Microanalytical characterization (AEM) of glassy spheres and anhydrite from a high-calcium lignite fly ash from Germany. Cement and Concrete Research. 25(6): 1369-1377.

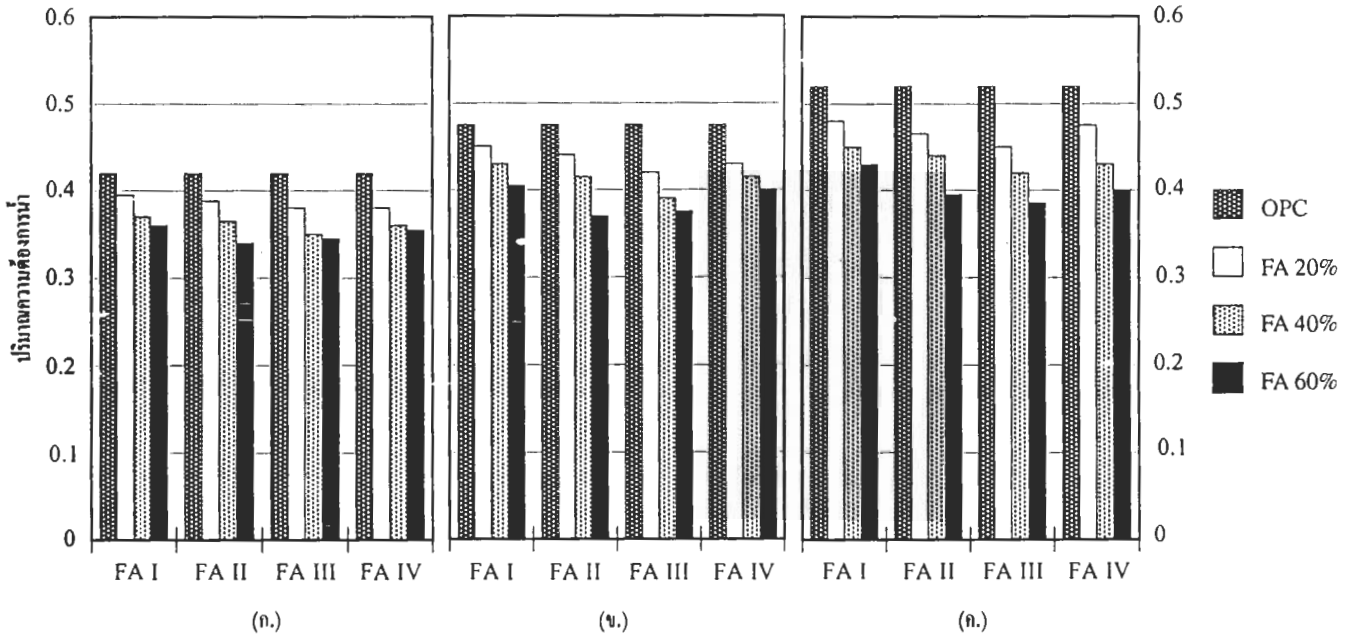
Kokupu, M. 1968. Fly ash and fly ash cement. In The Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, pp. 75-113.

ตารางที่ 1 ความข้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

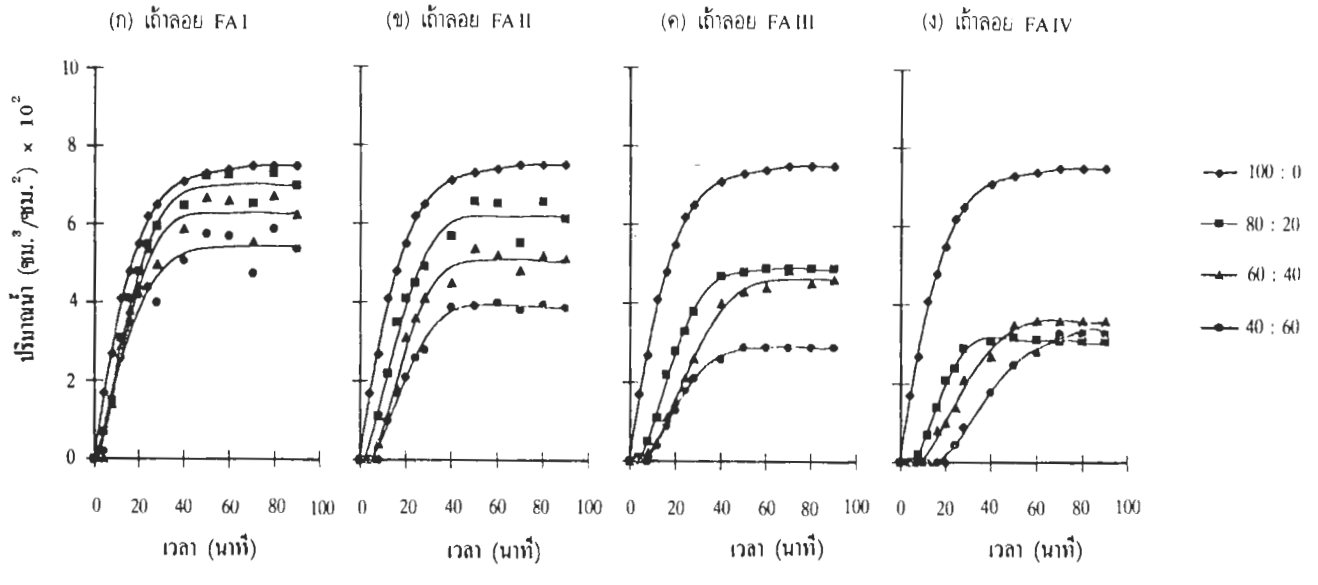
OPC : FA	ความข้นเหลวปกติ	เวลาการกอตัว นาที	
	(%)	ระยะต้น	ระยะปลาย
100 : 0 - OPC	25.4	97	133
80 : 20 - FA I	24	127	191
60 : 40 - FA I	22.9	149	209
40 : 60 - FA I	22.7	123	241
80 : 20 - FA II	23.9	122	158
60 : 40 - FA II	23	127	172
40 : 60 - FA II	22.5	105	233
80 : 20 - FA III	24	117	159
60 : 40 - FA III	23.2	120	203
40 : 60 - FA III	22.8	101	212
80 : 20 - FA IV	22.6	99	165
60 : 40 - FA IV	22.8	119	217
40 : 60 - FA IV	23.2	84	188



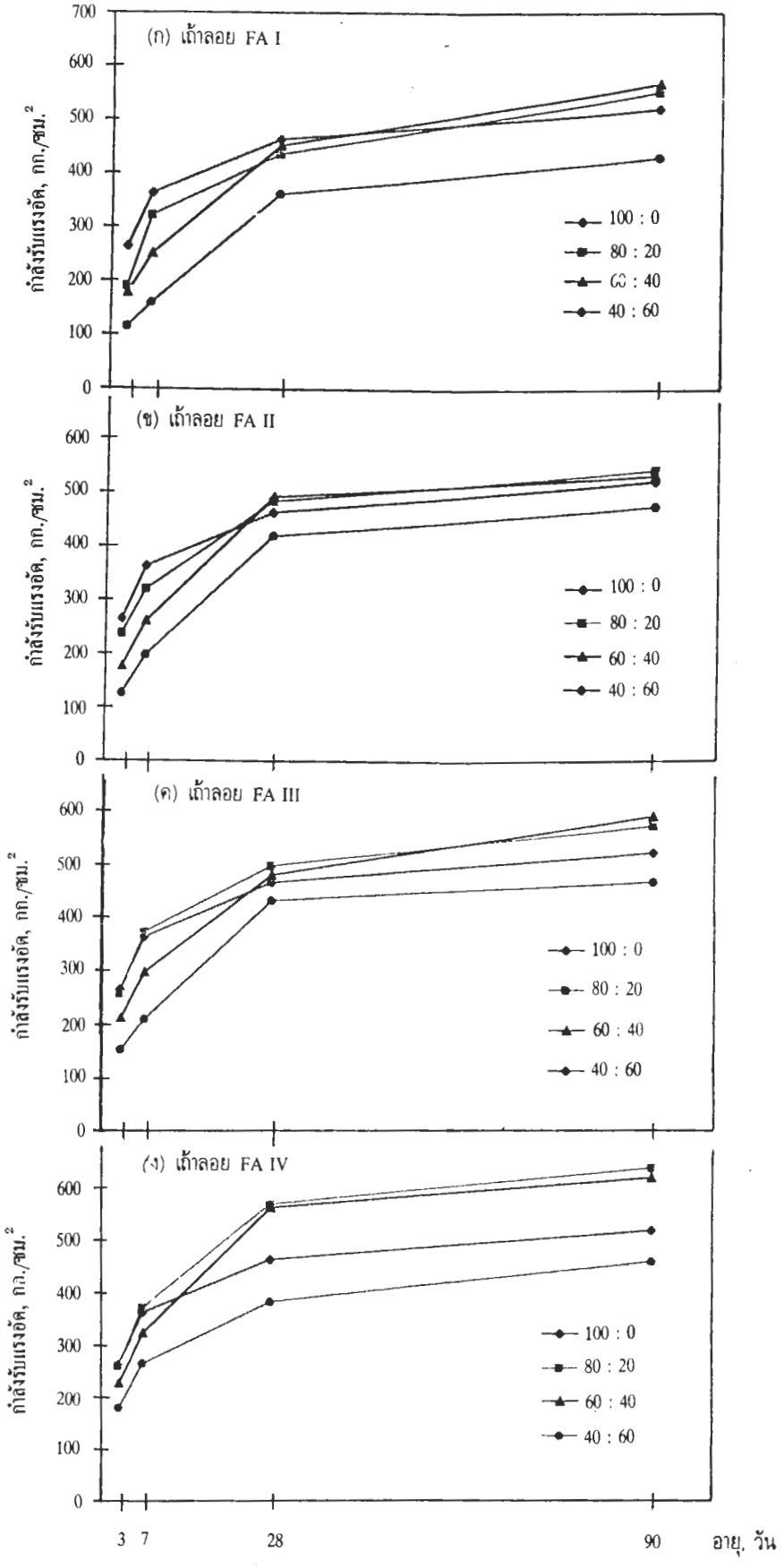
รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย



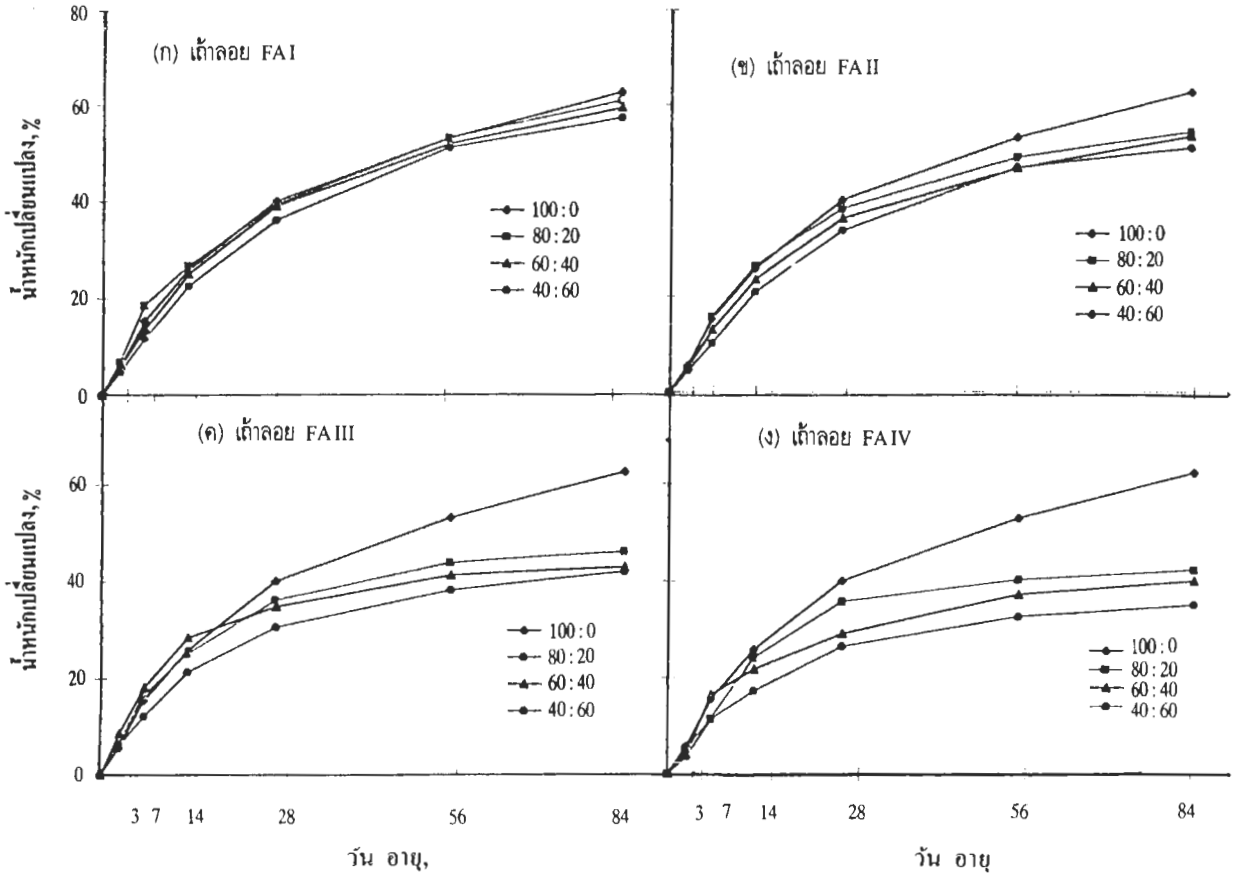
รูปที่ 2 ความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย
(ก) ทรายต่อสารซีเมนต์ = 2.0 (ข) ทรายต่อสารซีเมนต์ = 2.5
(ค) ทรายต่อสารซีเมนต์ = 2.75



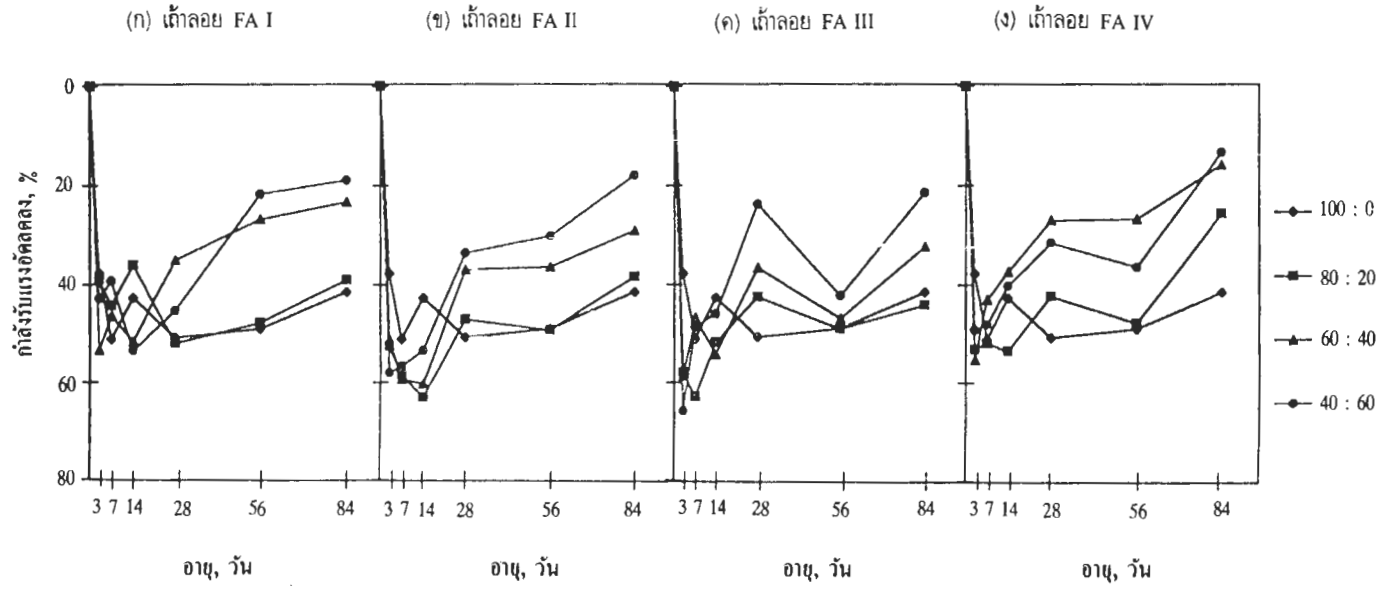
รูปที่ 3 การคายน้ำของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย



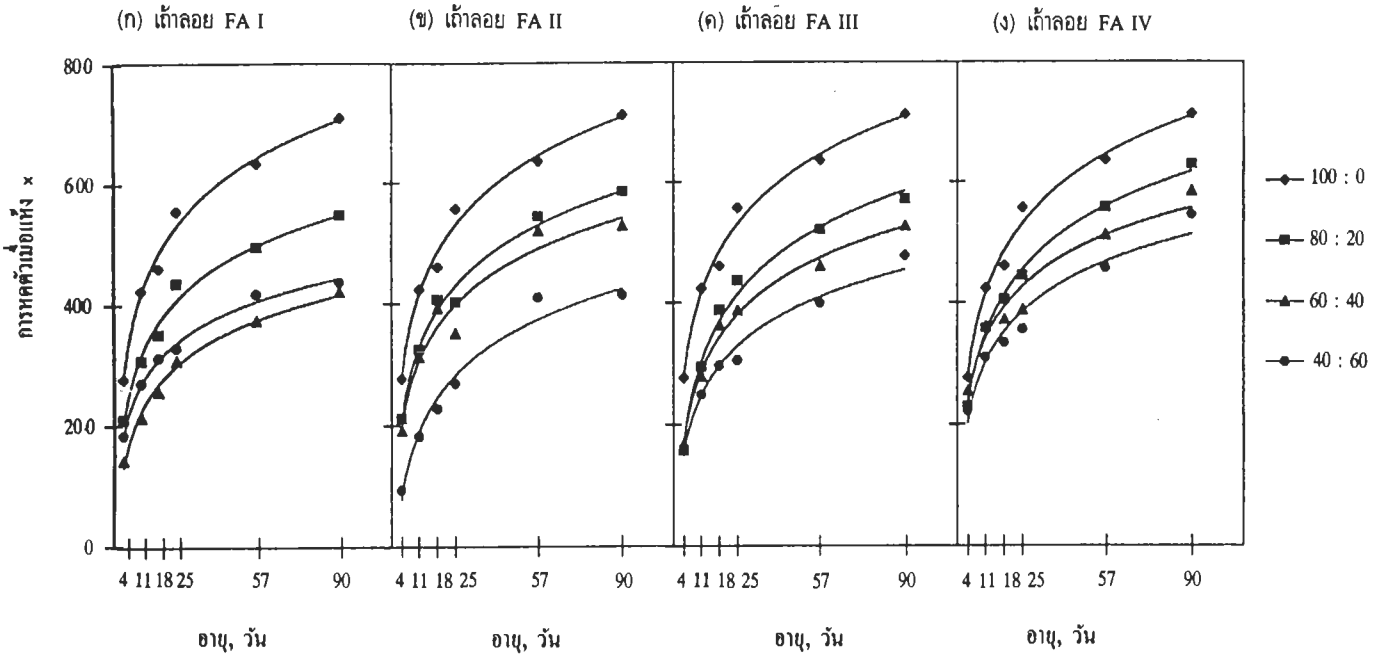
รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย



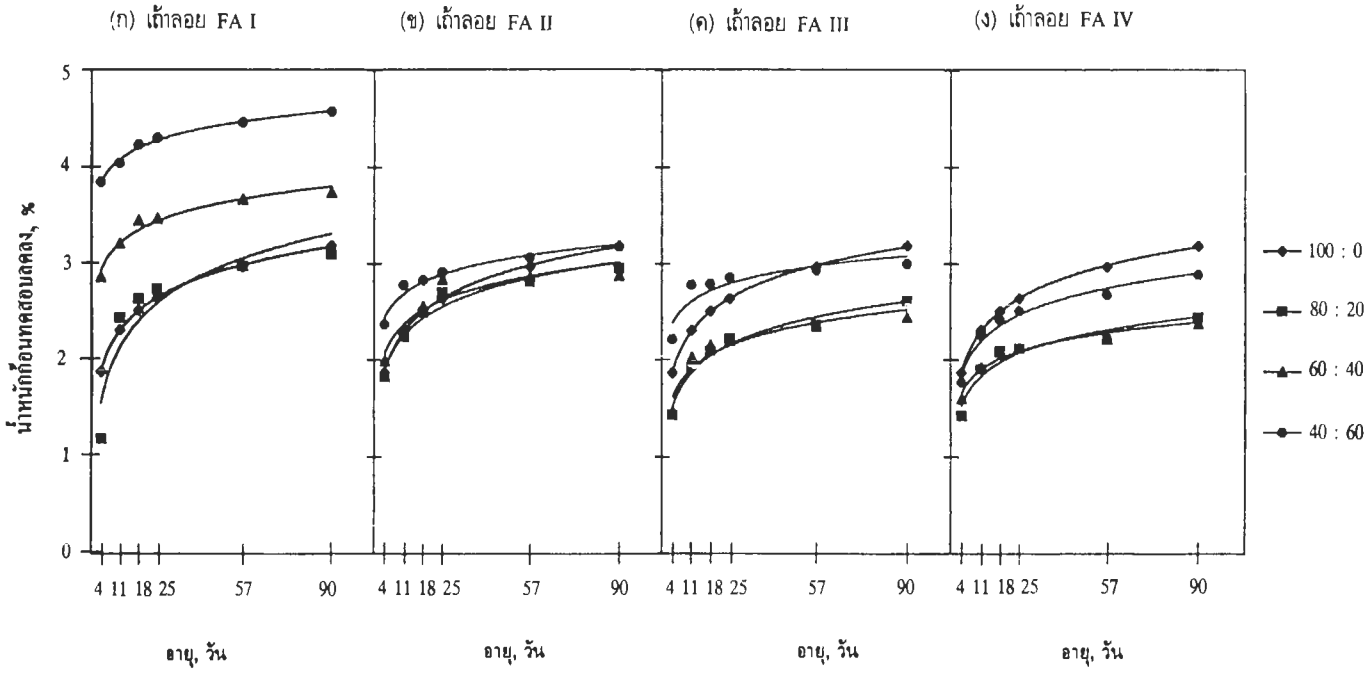
รูปที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของลูกบาศก์มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ผสมเถ้าลอย ภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้น 5%



รูปที่ 6 การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ผสมเถ้าลอย ภายหลังแช่แรดซัลฟูริกเข้มข้น 5%



รูปที่ 7 การหดตัวเมื่อตากแห้งของแท่งมอร์ต้าร์ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 ± 10%



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแท่งมอร์ต้าร์ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 ± 10%