



วิทยานิพนธ์

การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา

**STUDY ON THE PROPERTIES OF MORTAR MIXED WITH
FLY ASH AND PARAWOOD SAWDUST ASH**

นายสรารัฐ เทศศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา

Study on the Properties of Mortar mixed with Fly Ash and Parawood Sawdust Ash

نامผู้วิจัย นายสรารุช เทศศิริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ตระกูล อร่ามรักษ์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉกหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาคุณสมบัติของ mortars ผสมเถ้าลอย และเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา

Study on the Properties of Mortar mixed with Fly Ash and Parawood Sawdust Ash

โดย

นายสรารุช เทศศิริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2550

สราวุธ เทศศิริ 2550: การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา ประชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ตระกูล อร่ามรักษ์, Ph.D.
109 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา
ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ และ
ทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ และคุณสมบัติของมอร์ตาร์
ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา
ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก เถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราผ่านการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดเป็น
เวลา 0-3 ชั่วโมง โดยเพิ่มระยะเวลาการบดขึ้นทุก 30 นาที การทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลาน
ของเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราร้อยละ 20
ที่อายุ 7 วันและ 28 วัน มีค่ากำลังอัดร้อยละ 60-70 และร้อยละ 50-60 ของมอร์ตาร์มาตรฐานทุก
ระยะเวลาการบด ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้เถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราที่ใช้เวลาในการบด 1 ชั่วโมง ซึ่งมี
น้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 9.2 ผสมเพิ่มในมอร์ตาร์

ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO
เท่ากับร้อยละ 50.71, 15.60, 9.41 และ 16.62 ตามลำดับ ส่วนเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารามี SiO_2 , Al_2O_3 ,
 Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 15.14, 1.06, 0.56 และ 32.34 ตามลำดับ รูปร่างลักษณะอนุภาคของ
เถ้าลอยส่วนใหญ่เป็นทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ รูปร่างลักษณะอนุภาคของเถ้าจีเลื้อยไม้
ยางพาราส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความพรุน ทำให้ปริมาณน้ำที่
ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น และทำให้มี
ระยะเวลาการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นอีกด้วย คุณสมบัติของมอร์ตาร์ มีหน่วยน้ำหนักลดลง
และมีน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกักต่อนลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ เถ้าจีเลื้อยไม้ยางพารา
และเมื่อผสมเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์
ควบคุมทุกอายุของมอร์ตาร์ และเมื่อผสมเถ้าจีเลื้อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15-40 พบว่ามี
ค่ากำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุของมอร์ตาร์ ดังนั้นอัตราส่วนของการผสมเพิ่มเถ้าจีเลื้อย
ไม้ยางพาราที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20
คือ อัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10

Sarawut Tassiri 2007: Study on the Properties of Mortar mixed with Fly Ash and Parawood Sawdust Ash. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Trakool Aramraks, Ph.D. 109 pages.

This thesis is to study the properties of mortar mixed with fly ash and parawood sawdust ash. The fly ash and parawood sawdust ash are the waste product from manufacturing industry. The study comprise of physical properties and chemical properties of fly ash and parawood sawdust ash, the characteristic of cement paste, and the characteristics of mortar replaced by 20 percent by weight of fly ash and added by 0 to 40 percent by weight of parawood sawdust ash. Parawood sawdust ash were pulverized by increasing 30 minutes pulverized time from zero to three hours for the purpose of pozzolan test. It was found from pozzolan test result that the compressive strength of mortar replaced by 20 percent by weight of parawood sawdust ash at 7 day and 28 day were 60 to 70 percent and 50 to 60 percent of mortar strength without replacement respectively for every pulverized time. Therefore, one hour pulverized parawood sawdust ash having 9.2 percent retaining weight on seive no.325 was used in this study.

The test result showed that the chemical composition of fly ash were SiO_2 (50.71%), Al_2O_3 (15.60%), Fe_2O_3 (9.41%) and CaO (16.62%) respectively and the chemical composition of parawood sawdust ash were SiO_2 (15.14%), Al_2O_3 (1.06%), Fe_2O_3 (0.56%) and CaO (32.34%) respectively. The physical shape of fly ash were flat, spherical with unpredictable dimensions. The physical shape of parawood sawdust ash showed irregular sizes with rough surface. These characteristics affected the increasing demand of water for normal consistency of cement paste. The normal consistency of cement paste increased in the same proportion as the increase of parawood sawdust ash. Initial setting time and final setting time were also increased as well. The unit weight of mortar and the weight loss of mortar by corrosion test decreased according to the increasing quantity of parawood sawdust ash. It was found that the compressive strength of mortar with 5 to 10 percent of parawood sawdust ash were greater than the strength of mortar with 15 to 40 percent parawood sawdust ash for all ages. Therefore the proportions of mortar replaced by 20 percent by weight of fly ash and added by 5 to 10 percent by weight of parawood sawdust ash were recommended.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงของท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ตระกูล อร่ามรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา กรรมการวิชาเอก และรองศาสตราจารย์ ประทีป ดวงเดือน กรรมการวิชาการ และท่านอาจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตร อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความรู้ให้คำปรึกษาแนะนำต่างๆ และช่วยเหลือในการวางแผนการวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิ คณาจารย์ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ สนับสนุนทั้งด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้เขียนตำรา และเอกสารบทความต่างๆ ที่ช่วยสนับสนุนผู้วิจัยในการค้นคว้า และอ้างอิงในงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุด คุณประโยชน์อันพึงควรจะได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณ และสมาชิกในครอบครัวที่ทำให้กำลังใจตลอดมา

สราวุธ เทศศิริ

กันยายน 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	15
อุปกรณ์	15
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	33
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
สรุป	56
ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	59
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ผลทดสอบลักษณะทางกายภาพ	63
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์	65
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นดัชนีปอซโซลาน ของเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา	69
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	6
2.2	ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	9
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	10
3.1	อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	22
3.2	อัตราส่วนผสมของการทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	28
3.3	อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	30
3.4	ประเภทการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	32
4.1	เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีระยะเวลาการบดแตกต่างกัน	33
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	36
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	40
4.4	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์	41
4.5	ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์	43
4.6	ผลการทดสอบการไหล (Flow Test) ของมอร์ตาร์	45
4.7	หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	48
4.8	กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มด้วยเถ้าชี้ละเอียดไม่ย่างพารา	50
4.9	น้ำหนักที่สูญหายของลูกบาศก์มอร์ตาร์ เมื่อแช่ในน้ำกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าจี้ละเอียดไม่ย่างพารา	64
ข1	ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์	66
ข2	ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้ละเอียดไม่ย่างพารา	67
ค1	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CS	70
ค2	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-0	71
ค3	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-1.0	72
ค4	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-1.5	73
ค5	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-2.0	74
ค6	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-2.5	75
ค7	ผลการทดสอบความเป็นดัชนีพอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-3.0	76
ง1	ผลการทดสอบหาค่าการไหลแผ่ (Flow Test) ของมอร์ต้าร์	78
ง2	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP00	79
ง3	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP05	82
ง4	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP10	85
ง5	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP15	88
ง6	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP20	91
ง7	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP25	94
ง8	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP30	97
ง9	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP35	100
ง10	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP40	103
ง11	ผลการทดสอบการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์	106

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	เตาเผาจี๊เลื่อยไม้ยางพารา บริษัท วัคเวอร์ค ยูไนเต็ด จำกัด	16
3.2	จี๊เลื่อยไม้ยางพาราที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง	16
3.3	ถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพาราที่ออกจากเตาเผา	17
3.4	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	20
3.5	การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์	24
3.6	การทดสอบหาค่าการไหล (Flow Test) ของมอร์ตาร์	26
3.7	เครื่องทดสอบแรงกด (Los Angeles) ที่นำมาใช้ในการบด ถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพารา	27
3.8	การทดสอบหาค่ากำลังอัด (Compression Testing) ของมอร์ตาร์	31
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับ ชนิดส่วนผสม	34
4.2	สีของปูนซีเมนต์ ถ้ำลอย และถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพารา	35
4.3	รูปขยายอนุภาคถ้ำลอย 500 เท่า	38
4.4	รูปขยายอนุภาคถ้ำลอย 1000 เท่า	38
4.5	รูปขยายอนุภาคถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพารา 500 เท่า	39
4.6	รูปขยายอนุภาคถ้ำจี๊เลื่อยไม้ยางพารา 1000 เท่า	39
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์กับ ชนิดส่วนผสม	42
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการ ก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์	44
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม	46
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง W/B ของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม	46
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม	48
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ต้าร์กับชนิดส่วนผสม และอัตราส่วน W/B	50
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของมอร์ต้าร์	51
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังอัดกับอายุของมอร์ต้าร์	51
4.16	การกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกของมอร์ต้าร์	54
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักที่สูญเสียกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อแช่ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก	55

การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา

Study on the Properties of Mortar mixed with Fly Ash and Parawood Sawdust Ash

คำนำ

ปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้าง และยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังอัดให้สูงขึ้นในระยะยาว ทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำลง เพิ่มความสามารถในการเท มีความทนทาน และทนซัลเฟตสูงขึ้น แต่การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตก็มีข้อด้อยคือ กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นจะพัฒนาได้ช้ากว่าคอนกรีตปกติ และกำลังอัดยังต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียที่สำคัญของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยรวมลดลงเนื่องจากเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์จึงมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ดี กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในระยะยาวมิได้ขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ด้วย (สมนึก, 2542)

ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลื่อยไม้ ไม้แปรรูปและทำเฟอร์นิเจอร์ รวมทั้งมีกิจการแปรรูปไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก สถิติการส่งออกไม้แปรรูปไม้ยางพาราในปี 2546 มีปริมาณ 1,064,815 ลบ.ม. ซึ่งคิดเป็น 96% ของปริมาณไม้แปรรูปที่ส่งออกทั้งหมด (กองแผนงานและสารสนเทศ กรมป่าไม้, 2546) ซึ่งนับเป็นปริมาณที่สูงมาก และในการแปรรูปไม้ยางพาราดังกล่าวก็จะได้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วขี้เลื่อยจากไม้ยางพาราจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแก้ม้อต้ม หลังจากการเผาไหม้จะได้เถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Parawood Sawdust Ash) และเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราจะถูกทิ้งโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์แต่อย่างใด จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา พบว่ามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงเท่ากับปูนซีเมนต์ ซึ่งการที่มีสารแคลเซียมออกไซด์สูงเมื่อนำเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราไปผสมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยก็น่าจะทำให้คอนกรีตสามารถที่จะรับกำลังอัดได้สูงด้วย ดังนั้นจึงควรหาวิธีที่จะนำเถ้าขี้เลื่อยไม้

ยางพารามาใช้ผสมในคอนกรีตผสมเถ้าลอย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นและเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และมลพิษจากกากอุตสาหกรรม

ดังนั้นการศึกษานี้ จึงศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งทั้งเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารามาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยเฉพาะในส่วนผสมของคอนกรีตก็จะเป็นประโยชน์ในวงการอุตสาหกรรมก่อสร้าง สนับสนุนให้เกิดการใช้ทรัพยากรของประเทศไปใช้อย่างคุ้มค่า ช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ลดมลพิษ และช่วยส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานของประเทศทางอ้อมอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ของเถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ การทดสอบความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ และลักษณะอนุภาค ของวัสดุจากภาพถ่ายขยายขนาด
2. ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา ได้แก่ ความชื้นเหลวปกติ และระยะเวลาในการก่อตัว
3. ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา ได้แก่ ความต้องการน้ำ หน่วงน้ำหนัก ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา กำลังอัด และความต้านทานการกัดกร่อนของสารเคมี
4. ศึกษาอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อเถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราที่เหมาะสม เพื่อจะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

ขอบเขตการวิจัย

1. เถ้าลอยนำมาจากเตาเผาเลขที่ 13 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ได้จากเครื่องดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator)
2. เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารานำมาจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา บริษัท ภูวดเวอร์ค ยูไนเต็ด จำกัด อ. ห้วยยอด จ.ตรัง
3. คุณสมบัติของเถ้าลอยและเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ ทางกายภาพ และทางเคมี
4. คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราที่ทดสอบ ได้แก่ ความชื้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ในแต่ละอัตราส่วนผสม

5. คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพาราที่ทดสอบ ได้แก่ ความสามารถในการไหลแผ่ ในแต่ละอัตราส่วนผสม

6. คุณสมบัติความเป็นดัชนีปอชโซลานของเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารา โดยนำเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารามาทำการบดเป็นเวลา 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง โดยทดสอบกำลังอัดใช้มอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังนั้นจึงมีส่วนผสมทั้งหมด 7 อัตราส่วนผสม จึงมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบดัชนีความเป็นปอชโซลานทั้งหมด 84 ตัวอย่าง

7. คุณสมบัติด้านกำลังอัดใช้มอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์กับทรายมาตรฐานในอัตราส่วน 1: 2.75 สำหรับปริมาณน้ำที่ใช้จะต้องให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 จากการทดสอบการไหล ทดสอบมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนักดังนั้นในการศึกษาดังนี้จึงมีตัวอย่างมอร์ตาร์ 9 อัตราส่วนผสม แต่ละอัตราส่วนผสมมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่าง จึงมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัดทั้งหมด 324 ตัวอย่าง

8. คุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้มอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ต่อทรายมาตรฐานในอัตราส่วน 1:2.75 สำหรับปริมาณน้ำที่ใช้จะต้องให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 จากการทดสอบการไหล สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการศึกษาดังนี้จึงมีตัวอย่างมอร์ตาร์ 9 อัตราส่วนผสม เริ่มทดสอบเมื่ออายุ 7 วัน โดยนำไปแช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก หรือน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการแช่ในกรดซัลฟูริก เมื่อมีอายุ 1, 7, 14, 28 วัน โดยแต่ละอัตราส่วนผสมมีตัวอย่างทดสอบ 6 ก้อน ดังนั้นในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนทั้งหมด 270 ตัวอย่าง

การตรวจเอกสาร

เถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารา

1. ลักษณะทางกายภาพ

ธนุพล และคณะ (2545) ได้กล่าวว่า อนุภาคของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารามีขนาดเล็กใหญ่กว่าถั่วลอ่ย ซึ่งอนุภาคของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารามีขนาด 48.85 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าถั่วลอ่ยประมาณ 10 เท่า เถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารามีลักษณะทั้งเม็ดเหลี่ยมและเหลี่ยมมุม มีทั้งพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนอยู่ และมีบางอนุภาคเป็นแผ่นวางซ้อนหน้าติดกัน ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวจึงมีความดูดซึมน้ำได้มาก และพื้นที่บางส่วนบดบังการทำปฏิกิริยาทำให้การทำปฏิกิริยาได้ไม่ทั่วถึง

จรรยา (2547) ได้กล่าวว่า ลักษณะของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารา มีอนุภาคหยาบกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ ลักษณะของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดแตกต่างกัน มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ๆ มน ๆ ปะปนเป็นจำนวนมาก ลักษณะคล้ายวัตถุที่มีรูพรุนการกระจายตัวของอนุภาคลักษณะของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพาราอยู่ในเกณฑ์สูง ขนาดของอนุภาคแตกต่างกันมากโดยมีอนุภาคเล็กที่สุดเท่ากับ 0.375 ไมครอน และมีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 717.80 ไมครอน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.91 ไมครอน ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 21.30 ไมครอน

2. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถาจิ้เลื่อยไม้ยางพารา ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณร้อยละ 40-55 โดยน้ำหนัก มีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก และมีโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ประมาณร้อยละ 18-26 โดยน้ำหนัก

จรรยา (2547) ได้กล่าวว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์เทียบเท่า (CaO Equivalent) ในวัสดุประสานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลาน กล่าวคือ มอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานในอัตราแทนที่เท่ากัน กำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า จะมีความสามารถรับกำลังอัดได้มากด้วย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และ เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ซีเมนต์*	เถ้าลอย	เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา
SiO ₂	20.80	33.64	9.91
Al ₂ O ₃	5.50	20.21	1.19
Fe ₂ O ₃	3.16	17.08	1.63
CaO	64.97	12.08	40.23
MgO	1.06	4.78	11.09
K ₂ O	0.55	6.03	25.92
SO ₃	2.96	2.61	6.50
LOI	2.89	0.80	2.20

ที่มา: *จรรยา (2547); ชัดเจน (2544)

3. คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

จรรยา (2547) ได้ศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแทนที่ปริมาณของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราซึ่งผ่านการอบน้ำยากันความชื้น และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นในปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นและมีค่าการไหลต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำยากันความชื้นที่มีอยู่ในเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราไม่มีผลต่อการไหลของมอร์ตาร์ ส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราซึ่งผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น มีกำลังไม่แตกต่างกันมากนัก แต่กำลังอัดจะลดลงตามอัตราส่วนเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่แทนที่มากขึ้น ส่วนกำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่สุดคือปริมาณการแทนที่เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราร้อยละ 10 คิดเป็นค่ากำลังอัดประมาณร้อยละ 85 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน

ซัดเจน (2544) ได้ศึกษาผลกระทบการเติมเถ้าลอยและเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารา เพื่อประเมินสมบัติบางประการของมอร์ตาร์ โดยมีสัดส่วนผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และกำหนดสัดส่วนเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพาราให้คงที่ โดยมีปริมาณ $1/3$ ของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า มีความหนาแน่นและอัตรา การดูดซึมน้ำลดลงทุกอัตราส่วนผสม มีความทนทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นทุก อัตราส่วนผสมตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Tonnayopas and Chaosincharoen (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย และเถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารา โดยการศึกษาได้ใส่เถ้าทั้งสองในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เถ้าลอยเป็นวัสดุพอชโซลาน สามารถใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 40 แต่เถ้าจีเลื้อยไม่ยางพารา ไม่สามารถใช้เป็นวัสดุพอชโซลานได้เพราะมีกำลังอัดค่อนข้างน้อย

Elinwa and Mahmood (2001) ได้ทำการศึกษาโดยทำการนำเศษจีเลื้อยไม่มาเผาและ นำไปแทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก พบว่า การแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และยังมีกำลังลดต่ำลงเมื่อมีการแทนที่มากขึ้น แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าจีเลื้อยไม่จะช่วยเพิ่ม ความทนทานต่อซัลเฟต และลดอัตราการซึมผ่านของน้ำอีกด้วย

จักรพันธุ์ (2546) ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อเป็นวัสดุพอชโซลาน โดยนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 50 สำหรับศึกษา กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่าไม่ถึง 75% ของมอร์ตาร์มาตรฐาน และกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ยังมีความละเอียด มากก็จะสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นด้วย

ถั่วลย

1. คุณสมบัติทางกายภาพของถั่วลย

รูปร่างส่วนใหญ่ของถั่วลยมีลักษณะค่อนข้างกลมและผิวเรียบ บางครั้งอาจมีลักษณะกลวงมีน้ำหนักเบาและอาจลอยน้ำได้เรียกว่า ถั่วถ่านหินกลวงซีโนสเฟีย (Cenosphere) และถั่วถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีถั่วถ่านหินขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายในก็ได้เรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) ส่วนความละเอียดของถั่วถ่านหินที่ได้จะขึ้นอยู่กับ การบดถ่านหิน ชนิดเครื่องบด และชนิดของการเผา ถั่วถั่วถ่านหินละเอียดมากขึ้น และเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะได้ถั่วถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่ในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของถั่วถ่านหินจะไม่แน่นอน

ปริญญ (2547) ได้กล่าวว่า อนุภาคของถั่วลยมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ถั่วลยแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งถั่วลยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลน มีความละเอียดอยู่ในช่วง 2500 ถึง 3500 ซม²/กรัม

ถั่วลยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่ในที่ต่าง ๆ กัน หรือมาจากแหล่งถ่านหินแตกต่างกันอาจมีสีต่างกัน ได้ สีของถั่วลยและปริมาณถั่วลยที่ใช้ในงานคอนกรีตจะส่งผลต่อสีของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงสีของปูนซีเมนต์ หรือการเปลี่ยนวัสดุผสม โดยทั่วไปสีของถั่วลยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต แต่อาจเป็นตัวชี้บ่งว่าถั่วลยมาจากแหล่งที่ต่างกัน หรือมีค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา และมีปริมาณเหล็กที่ต่างกัน หรือผ่านสภาพการเผาที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของถั่วลยเพื่อนำไปใช้งานนั้นอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพของถั่วลยตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางด้านกายภาพ	จำแนกชั้นเถ้าลอย		
	N	F	C
ความละเอียด			
- ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ร่อนโดยใช้น้ำ, สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์			
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75	75	75
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75	75	75
ความต้องการน้ำ: สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
ความคงตัว (Soundness)	0.8	0.8	0.8
- การขยายตัว หรือ หดตัวออโตแคลฟ, สูงสุดร้อยละ			
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniform Requirement)			
- ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

2. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เพราะมีองค์ประกอบของซิลิกาไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ กันจะมีค่าแตกต่างกันเนื่องจาก ขบวนการผลิต อุณหภูมิ และการبردอันหิน ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพเถ้าลอยในประเทศไทยจากแหล่งแม่เมาะในช่วงปี พ.ศ. 2533-2540 มีปริมาณสารประกอบของซิลิกาไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ รวมกันอยู่ใน ปริมาณร้อยละ 72-80 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 9-17 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย, 2540)

ชัย และคณะ (2543) ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศ มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน แต่ส่วนมากเถ้าลอยจะจัดอยู่ใน Class F ของกำหนดมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณ CaO ก่อนข้างต่ำ แต่ลักษณะเถ้าลอยถ่านหินในประเทศไทยจะมี CaO ก่อนข้างสูง (มากกว่า 10%) สำหรับองค์ประกอบของเถ้าลอยแม่เมาะตั้งแต่ พ.ศ.2533-2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปผลรวมร้อยละของออกไซด์ของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 70% ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่า 10% ปริมาณ LOI ต่ำมากคือมากกว่า 1% นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าแหล่งอื่น ๆ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ นั้น ยังมีตัวแปรอื่น ๆ เช่น การเผาถ่านหิน การดักเก็บเถ้าลอยและการจำแนกชนิดของถ่านหิน

สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 ใช้ผลรวมของปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ ในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อยร้อยละ 70 และ 50 ตามลำดับ ทั้งนี้การกำหนดเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากซัลเฟตในเถ้าลอยมีผลต่อการพัฒนาความสามารถกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัว และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำให้เกิดการขยายตัว และแตกร้าวได้

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	ประเภทเถ้าลอย		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต่ำสุดร้อยละ	50	70	50
SO_3 มากสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นมากสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้(LOI) มากสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na_2O_3) มากสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ค่าดัชนีกำลัง, ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

สำหรับร้อยละความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 เนื่องจากจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน และสำหรับ Class C แล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ขึ้นได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มากการควบคุมในด้านของคอนกรีตจะทำได้ยาก และยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่า 6 มาก ร้อยละของปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มากสุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C618 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali aggregate ขึ้นได้แต่อย่างไรก็ตามเถ้าลอยที่มีร้อยละของปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่มีความไวต่อปฏิกิริยา (Reactive) ได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

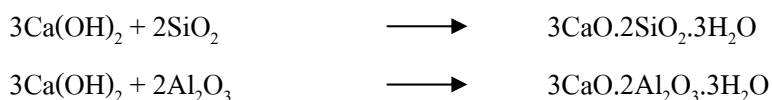
3. ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) อย่างหนึ่งตาม ASTM C595 ซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ถ้าใส่สารปอซโซลาน (Pozzolan) ลงไปในส่วนผสมของคอนกรีต สารนี้จะทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ได้สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และซิลิเกตอะลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เหมือนปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์ในส่วนที่เป็น ไดคัลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และไตรคัลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) กับน้ำ แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ของเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์ ปฏิกิริยาต่างๆแสดงในรูปสมการเคมีดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)



ปฏิกิริยาระหว่าง Ca(OH)_2 กับเถ้าลอย (Pozzolanic Reaction)



อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) จะซับซ้อนกว่าที่นำเสนอ ปอซโซลาน (Pozzolan) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง เถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณแอลคาไลค์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

4. ลักษณะการผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีต

การผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีตมี 3 ลักษณะคือ

4.1 การแทนที่ โดยการใช้เถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ลัญชัย (2545) ได้ทำการศึกษาเถ้าลอยแม่เมาะแบบคัดแยกขนาดและไม่คัดแยกขนาด พบว่าเถ้าลอยคัดแยกขนาดจะลดความต้องการน้ำมากกว่าเถ้าลอยไม่คัดแยกขนาด และความต้องการน้ำจะลดลงเมื่อการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 15-35 จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 25-35 จะให้กำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 28 วัน

วาสนา (2538) ได้ศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอย เกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงอายุต้น ๆ และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นจนเทียบเท่าหรือสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอยผสมอยู่มากจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่มีปริมาณเถ้าลอยผสมอยู่น้อย

ประจิต (2535) ได้ทำการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ โดยมีอัตราส่วนการแทนที่เป็นร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถเติมเถ้าลอยไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงถึง 25-29% โดยน้ำหนัก โดยไม่ทำให้กำลัง

ของคอนกรีตลดลง และนอกจากนี้ยังพบว่าไฮดรเจนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นส่วนไม่เกิดประโยชน์ แต่ถ้าเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งมีซิลิกาไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ ที่มีคุณลักษณะปอซโซลานก็สามารถรวมกันเป็นซีเมนต์ได้ การเกิดอาจช้าแต่ก็เป็นผลให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ๆ ในช่วงเวลาที่ยาวกว่า การหดตัวของคอนกรีตจะไม่รุนแรง

ปริญญ และอินทรชัย (2528) ได้ศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าการแทนที่เถ้าลอยไม่มีผลต่อการก่อตัวในระยะแรก แต่ระยะการก่อตัวปลายจะเพิ่มขึ้น และจะทำให้ปูนซีเมนต์มีการคายน้ำที่ลดลง กำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น กำลังอัดระยะปลายจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน และการบดรวมสามารถเพิ่มกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยได้

Brink and Halstead (1956) ได้ทดสอบมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0-50% โดยน้ำหนัก และพบว่าการผสมเถ้าลอยมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดในอายุเริ่มแรกต่ำกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากที่อายุเริ่มแรกปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่พอเพียงพอที่จะชดเชยกำลังที่ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยมีปริมาณมากขึ้น แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.2 การผสมเพิ่ม โดยการใช้เถ้าลอยผสมเพิ่มในงานคอนกรีต วิธีการนี้นักนิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ ลดการเยิ้มของคอนกรีต คอนกรีตผสมเถ้าลอยด้วยวิธีนี้มักจะให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้เพราะในเนื้อคอนกรีตมีช่องว่างและความต้องการน้ำในเนื้อคอนกรีต การเติมอนุภาคที่มีเม็ดละเอียดของเถ้าลอยเข้าไปนั้นจะทำให้ความต้องการของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้ผิวและรูปร่างของเถ้าลอยที่มีลักษณะเรียบ และเป็นทรงกลมจะช่วยส่งเสริมการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

4.3 การแทนที่และผสมเพิ่มร่วมกัน โดยยึดหลักเพื่อปรับปรุงกำลังของคอนกรีต
ผสมลอยให้ดีขึ้นกว่าการใช้ถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังต้องการจะประหยัด
การใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อลดราคาการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง จึงทำให้ใช้ถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์
ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง เพื่อเร่งการเพิ่มกำลังของคอนกรีต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาตรฐาน มอก. 15-2524
2. ถังลอยนำมาจาก เตาเผาเลขที่ 13 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. ถังซีเมนต์ไม่ยางพารานำมาจากบริษัท วัคเวอร์ค ยูไนเต็ด จำกัด อ.ห้วยยอด จ.ตรัง
ทำการเก็บถังซีเมนต์ไม่ยางพาราเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2549 มาทำการทดสอบประมาณ 300 กิโลกรัม โดย บริษัท วัคเวอร์ค ยูไนเต็ด จำกัด ใช้ถังซีเมนต์ไม่ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงแก้มือดัดน้ำในการอบน้ำยากันความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป ความร้อนในการเผาที่ประมาณ 350 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาถังซีเมนต์ไม่ยางพาราจะถูกทิ้งตามปล่องทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในการจัดทิ้ง และต้องเสียพื้นที่ทิ้งโดยสูญเปล่าในการทิ้ง อีกทั้งยังเกิดปัญหาด้านมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของถังซีเมนต์ไม่ยางพารา



ภาพที่ 3.1 เตาเผาจี๊เลื่อยไม้ยางพารา บริษัท ภูเก็ต เวอร์ค ยูไนเตด จำกัด



ภาพที่ 3.2 จี๊เลื่อยไม้ยางพาราที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 3.3 ถังชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ออกจากเตาเผา

4. ทราเยมน้ำ มีขนาดคละคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C778
5. น้ำประปา
6. กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม
2. เครื่องทดสอบกำลังรับอัด (Compression Testing Machine)
3. เครื่องผสมมอร์ต้าร์
4. ตะแกรงมาตรฐาน

5. แบบหลอมออร์ต้าร์ลูบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร
6. เครื่องมือแบบไวแคต (Vicat Apparatus)
7. เครื่องมือทดสอบการไหลแผ่ (Flow Test)
8. เครื่องบดลอสแอนเจลิส (Los Angeles)
9. เครื่องวิเคราะห์ทดสอบองค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence)
10. เครื่องถ่ายภาพกำลังสูง (Scanning Electron Microscope)
11. ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier)

วิธีการ

1. ศึกษาคุณสมบัติส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารา โดยส่งไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารา โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray Fluorescence spectrometer, Oxford model ED 2000 วิเคราะห์โดยวิธี Energy dispersive x-ray Fluorescence spectrometry ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, Fundamental parameter calculations. ซึ่งปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูปออกไซด์ของธาตุนั้น ๆ

2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย และเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารา ได้แก่ รูปร่าง ลักษณะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี

2.1 ศึกษารูปร่างและลักษณะของอนุภาคเถ้าลอย และเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพารา โดยถ่ายภาพขยายกำลังสูงของด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM : JEOL รุ่น JSM-5410LN) โดยส่งไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 วิธีทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C188

- เติมน้ำมันก๊าด (Kerosene) ที่ไม่มีน้ำเจือปน ลงในขวดแก้วมาตรฐาน ให้ถึงคอขวดระหว่าง 0-1 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยขวดแก้วตอนที่สูงกว่าระดับน้ำมันก๊าดจะต้องแห้ง

- ปิดปากขวดด้วยจุกแก้วแล้วจุ่มขวดแก้วนี้ลงในอ่างน้ำที่มีอุณหภูมิคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง โดยให้นานพอที่จะอ่านค่าใด ๆ ได้ หลังจากนั้นอ่านค่าเป็นครั้งแรก

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 64 กรัม กรอกตัวอย่างที่อุณหภูมิเดียวกันกับน้ำมันก๊าดลงในขวดที่ละน้อย ให้ใช้กรวยช่วยในการบรรจุตัวอย่างลงในขวดแก้ว เพื่อป้องกันตัวอย่างเกาะที่คอขวด เมื่อกรอกตัวอย่างลงในขวดจนหมดแล้ว ปิดปากขวดแก้วด้วยจุกแก้ว แล้วกลิ้งขวดในสภาพเอียงช้า ๆ หรือแกว่งขวดเบา ๆ ในแนวราบเป็นวงกลม เพื่อไล่ฟองอากาศออกจนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาหลังจากเติมตัวอย่างลงไปปริมาณที่เหมาะสมแล้ว ระดับน้ำมันก๊าดจะหยุดอยู่ที่ช่วงหนึ่งในช่วงบน จุ่มขวดแก้วลงไปใอ่างน้ำ แล้วอ่านค่าเป็นครั้งสุดท้าย

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$



ภาพที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

2.3 วิธีทดสอบความละเอียดโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้แบบเบลน

ตามมาตรฐาน ASTM C204

- หาปริมาตร (Bulk Volume) ของปูนซีเมนต์ที่อัดตัวในเซลพอดิโดยวิธีการแทน ที่ในปรอท
- เตรียมตัวอย่างมาตรฐาน เทตัวอย่างมาตรฐานออกจากหลอดแก้วใส่ขวด ประมาณ 120 ลูกบาศก์เมตร และเขย่าขวดแรง ๆ 2 นาที เพื่อให้ซีเมนต์ตัวอย่างฟูไม่จับกัน เป็นก้อน ปล่อยขวดทิ้งไว้ 2 นาที แล้วเปิดฝาทิ้งออกค่อย ๆ คนให้ส่วนละเอียดที่อยู่บนผิวกระจายทั่ว
- ปริมาณของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ทดสอบจะต้องมีน้ำหนักเท่ากับตัวอย่างมาตรฐาน ที่ใช้สอบเทียบ
- การอัดเตรียมชั้นปูนซีเมนต์ โดยวางแผ่นโลหะลงบนบ่อของเพอร์มีอะบิลิตี้ นำกระดาษวางบนแผ่นโลหะ กดตรงขอบแผ่นให้สนิทกับแผ่นโลหะ และชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้ละเอียด 0.001 กรัม

- หาดัชนีการไหลผ่านซีเมนต์ โดยเติมไดบิลทาเลดลงในมานอมิเตอร์

หลังจากนั้นสวมเพอร์มีอะบิลิตีลงบนก้านมานอมิเตอร์ และสูบลูกอากาศออกจากก้านมานอมิเตอร์ช้า ๆ เริ่มจับเวลาที่ระดับก้นของของเหลวลดลงมาถึงขีดหมายเส้นที่สองโดยนับจากบน และหยุดจับเวลาที่ระดับก้นของของเหลวลดลงมาถึงขีดที่สาม บันทึกช่วงเวลาดังกล่าวเป็นวินาที และอุณหภูมิทดสอบ

3. การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก เป็นการทดสอบปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะสามารถศึกษาผลกระทบของการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ได้ และนำมาเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมได้ โดยใช้เครื่องทดสอบไวแกต (Vicat Apparatus)

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนคงที่ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเนื่องจากการศึกษาของ ชัดเจน (2544) ได้ศึกษาผลกระทบการเติมเถ้าลอยและเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราเพื่อประเมินสมบัติบางประการของมอร์ตาร์ โดยมีสัดส่วนผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และกำหนดสัดส่วนเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราให้คงที่ โดยมีปริมาณ 1/3 ของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีความทนทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นทุกระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่ม
เถ้าจีเส้อย่างพารา

ลำดับที่	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก : กรัม)			
	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	เถ้าจีเส้อย่างพารา
1	CFP00A	400	100	0
2	CFP05A	400	100	25
3	CFP10A	400	100	50
4	CFP15A	400	100	75
5	CFP20A	400	100	100
6	CFP25A	400	100	125
7	CFP30A	400	100	150
8	CFP35A	400	100	175
9	CFP40A	400	100	200

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

C หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก

F หมายถึง ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

P หมายถึง ปริมาณเถ้าจีเส้อย่างพาราที่ผสมเพิ่ม

00A, 05A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A, 35A, 40A หมายถึง การผสมเพิ่มเถ้าจีเส้อย่างพาราในซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น CFP10A หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจี้ละเอียดไม่ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3.1 วิธีทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ ตามมาตรฐาน ASTM C187

- ผสมตัวอย่างกับน้ำสะอาดที่วัดปริมาตรแล้ว หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้มาปั่นให้เป็นก้อนกลมโดยเร็ว โยนจากมือหนึ่งไปอีกมือหนึ่ง 6 ครั้งโดยรักษาระยะห่างประมาณ 15 เซนติเมตร
- ใส่ส่วนผสมให้เต็มวงแหวน ใช้ฝ่ามือปาดส่วนผสมที่ล้นออกทางปลายด้านใหญ่ให้หมด
- วางกรวยลงบนแผ่นกระจกโดยให้ปลายด้านใหญ่อยู่ด้านล่าง และใช้เกรียงปาดแต่งผิวด้านบนให้เรียบ
- วางซีเมนต์เพสต์อยู่ใต้เข็มไวแคตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร แล้วเลื่อนปลายเข็มให้แตะกับผิวของซีเมนต์เพสต์ตรงกลางและปรับเข็มชี้ให้อยู่ที่ศูนย์หรืออ่านค่าแรกเริ่มของเข็มชี้ หลังจากนั้นปล่อยเข็มทันทีเมื่อผสมซีเมนต์เพสต์แล้วเสร็จ 30 วินาที
- อ่านสเกลบนหน้าปัทม์และคำนวณหาระยะจมของเข็ม
- คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องการ เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติโดยคำนวณเป็นร้อยละของปูนซีเมนต์แห้งให้ละเอียดถึง 0.1 เปอร์เซนต์

$$\text{ปริมาณน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่ใช้} \times 100}{\text{น้ำหนักปูนซีเมนต์แห้ง}} \dots\dots\dots (3.2)$$



ภาพที่ 3.5 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

3.2 วิธีทดสอบหาระยะการก่อตัวต้น ตามมาตรฐาน ASTM C191 เวลาก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) หมายถึง ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนอยู่ถึงสถานะที่สามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานที่ปล่อยตัวอย่างอิสระ และจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มิลลิเมตรภายในเวลา 30 วินาที

- นำตัวอย่างผสมกับน้ำสะอาดในปริมาณที่ทำให้เกิดภาวะความชื้นเหลวปกติ โดยเครื่องผสม ตามมาตรฐาน ASTM C305

- วางกรวยบรรจุซีเมนต์เพสต์ที่ได้เตรียมไว้ในที่ขึ้นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการก่อตัว จากนั้นวางกรวยได้เข็มเข็มไว้แคตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ปรับปลายเข็มให้แตะผิวซีเมนต์เพสต์ และปรับเข็มชี้ให้อ่านศูนย์หรืออ่านค่าเริ่มต้นไว้

- ปล่อยเข็มเลื่อนลงในซีเมนต์ และอ่านค่าหลังปล่อยเข็ม 30 วินาที ทำเช่นนี้เป็นระยะเวลา 15 นาที จนกระทั่งระยะจมของเข็มเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และต้องห่างจากขอบในของกรวยเกิน 9 มิลลิเมตร ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงระยะเวลาที่เข็มจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มิลลิเมตรในเวลา 30 วินาที คือ ค่าเวลาการก่อตัวระยะต้น

3.3 วิธีหาระยะเวลาการก่อตัวปลาย ตามมาตรฐาน ASTM C191 เวลาก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) หมายถึง ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนอยู่ในสถานะที่สามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานที่ปล่อยตัวอย่างอิสระ และไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เลย

- นำตัวอย่างผสมกับน้ำสะอาดในปริมาณที่ทำให้เกิดภาวะความชื้นเหลวปกติ โดยเครื่องผสม ตามมาตรฐาน ASTM C305

- วางกรวยบรรจุซีเมนต์เพสต์ที่ได้เตรียมไว้ในที่ชื้นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการก่อตัว จากนั้นวางกรวยได้เข็มไวแคตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ปรับปลายเข็มให้แตะผิวซีเมนต์เพสต์ และปรับเข็มชี้ให้อ่านศูนย์หรืออ่านค่าเริ่มต้นไว้

- ปล่อยเข็มเลื่อนลงในซีเมนต์ และอ่านค่าหลังปล่อยเข็ม 30 วินาที เช่นนี้ เป็นระยะเวลา 15 นาที จนกระทั่งเข็มไวแคตไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์ และต้องห่างจากขอบในของกรวยเกิน 9 มิลลิเมตร ระยะเวลาการก่อตัวระยะปลายเป็นระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสม จนถึงเวลาที่ปล่อยเข็มแล้วมีเพียงรอยจากปลายเข็มปรากฏบนผิวของซีเมนต์เพสต์

4. การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจี้ลอยไม่ย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ โดยใช้โต๊ะไหล (Flow Table) โดยทดสอบมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และควบคุมการไหลแผ่ให้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เปลี่ยนไป และสามารถอธิบายความต้องการปริมาณน้ำที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเถ้าจี้ลอยไม่ย่างพาราได้

4.1 วิธีทดสอบหาค่าการไหล (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C230

- วางแบบหล่อลงบนกลาง Flow Table แล้วเติมมอร์ตาร์ ลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของแบบหล่อ กระทั่ง 20 ครั้งให้ทั่วหน้าตัด แล้วเติมมอร์ตาร์ลงไปอีกจนเต็มล้น กระทั่งอีก 20 ครั้งปาดมอร์ตาร์เหนือขอบของแบบหล่อให้เรียบ

- ยกแบบหล่อออกในแนวตั้ง แล้วหมุนแท่นกระแทกในแนวตั้งสูงมิลลิเมตร จำนวน 25 ครั้ง โดยสม่ำเสมอภายในเวลา 15 วินาที

- วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่ขยายออกไปอย่างน้อย 4 ครั้งในทิศทางต่าง ๆ กันแล้วหา ค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง

ค่าร้อยละการไหลของมอร์ตาร์ =

$$\frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์} - \text{เส้นผ่านศูนย์กลางขอบล่างของแบบหล่อ}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$



ภาพที่ 3.6 การทดสอบหาค่าการไหล (Flow Test) ของมอร์ตาร์

5. การทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพาราโดยนำเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารามาทำการบดเพื่อเพิ่มความละเอียดเป็นเวลา 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง การบดทำโดยใช้เครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles) โดยถอดแผ่นเหล็กกันข้างในเครื่องออก ด้วยคัทเตอร์เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มม. ยาว 450 มม. จำนวน 16 แท่ง โดยเครื่องบดหมุนรอบด้วยความเร็ว 33 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของการทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารา

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก : กรัม)			อัตราการไหลแผ่ (ร้อยละ)
		ปูนซีเมนต์	เถ้าจีเเล่ย์ ไม้ยางพารา	ทราย	
1	CS	500	-	1375	110±5
2	CPI-0	400	100	1375	110±5
3	CPI-1.0	400	100	1375	110±5
4	CPI-1.5	400	100	1375	110±5
5	CPI-2.0	400	100	1375	110±5
6	CPI-2.5	400	100	1375	110±5
7	CPI-3.0	400	100	1375	110±5

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

C หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก

PI หมายถึง ปริมาณเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพาราร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 หมายถึง ระยะเวลาในการบดเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพารา

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น CS หมายถึง มอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

CPI-3.0 หมายถึง มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจีเเล่ย์ไม้ยางพาราที่ผ่านการบดเป็นระยะเวลา 3.0 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

6. การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก ทดสอบด้วยมอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร แต่ละอัตราส่วนผสมมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัดจำนวน 6 ตัวอย่าง และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน จึงมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบรับกำลังอัดทั้งหมด 324 ตัวอย่าง ซึ่งอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 3.3

6.1 วิธีทดสอบความกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109

- ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์ กระทำด้วยเครื่องผสม ให้เป็นตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานใช้เท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบการไหลแผ่ ควบคุมการไหลแผ่ให้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5
- หลังจากหล่อแบบแล้วใช้ผ้าชุบน้ำคลุมไว้ 24 ชั่วโมง แล้ว ทำการถอดแบบแล้วนำไปแช่ในน้ำสะอาดจนครบระยะเวลาที่ต้องการ
- เมื่อได้อายุที่ต้องการ ให้นำออกแล้วทำความสะอาด เช็ดผิวให้แห้ง วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน
- วางก้อนทดสอบให้อยู่ในศูนย์กลางของแท่นทดสอบ และผิวก้อนตัวอย่างสัมผัสกับแป้นกด เพื่อตรวจสอบการขยับของแป้นบ่าทรงกระบอก โดยเพิ่มแรงอัดด้วยอัตราที่เหมาะสมสม่ำเสมอจนกระทั่งแท่งตัวอย่างทดสอบแตก โดยใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 20-80 วินาที

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่ม
เถ้าจีเถ้าไม่ย่างพารา

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก : กรัม)		อัตราการใช้เถ้าลอยไม่ย่างพารา	อัตราการใช้เถ้าลอยไม่ย่างพารา (ร้อยละ)
				ทราย	อัตราการใช้เถ้าลอยไม่ย่างพารา		
1	CFP00	400	100	0	1375	110±5	
2	CFP05	400	100	25	1375	110±5	
3	CFP10	400	100	50	1375	110±5	
4	CFP15	400	100	75	1375	110±5	
5	CFP20	400	100	100	1375	110±5	
6	CFP25	400	100	125	1375	110±5	
7	CFP30	400	100	150	1375	110±5	
8	CFP35	400	100	175	1375	110±5	
9	CFP40	400	100	200	1375	110±5	

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

C หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก

F หมายถึง ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

P หมายถึง ปริมาณเถ้าจีเถ้าไม่ย่างพาราที่ผสมเพิ่ม

00, 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 หมายถึง การผสมเพิ่มเถ้าจีเถ้าไม่ย่างพารา
ในมอร์ตาร์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น CFP10 หมายถึง มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจีเถ้าไม่ย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ
10 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.8 การทดสอบหากล้างอัด (Compression Testing) ของมอร์ตาร์

7. ทดสอบความทนทานการกัดกร่อนของสารเคมี

ทดสอบมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร แต่ละอัตราส่วนผสมมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบจำนวน 6 ตัวอย่าง จึงมีมอร์ตาร์เพื่อทดสอบความทนทานการกัดกร่อนทั้งหมด 270 ตัวอย่าง

7.1 วิธีทดสอบความทนทานการกัดกร่อน ตามมาตรฐาน ASTM C266-77

- ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์ กระทำด้วยเครื่องผสม ให้เป็นตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบการไหลแผ่ ควบคุมการไหลแผ่ให้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5

- ภายหลังจากการหล่อ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบและนำไปการบ่มในน้ำประปา
- และเริ่มทดสอบเมื่อมีอายุ 7 วันโดยนำไปแช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก
- หาน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากแช่กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) ที่อายุในการแช่ 1, 7, 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 3.4 ประเภทการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ประเภทการทดสอบ	จำนวนตัวอย่าง
ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์	9
ทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์	9
ทดสอบดัชนีปอซโซลานของเถ้าขี้เถ้าไม่ย่างพารา	84
ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	324
ทดสอบความทนทานการกัดกร่อน	270

ผลและวิจารณ์

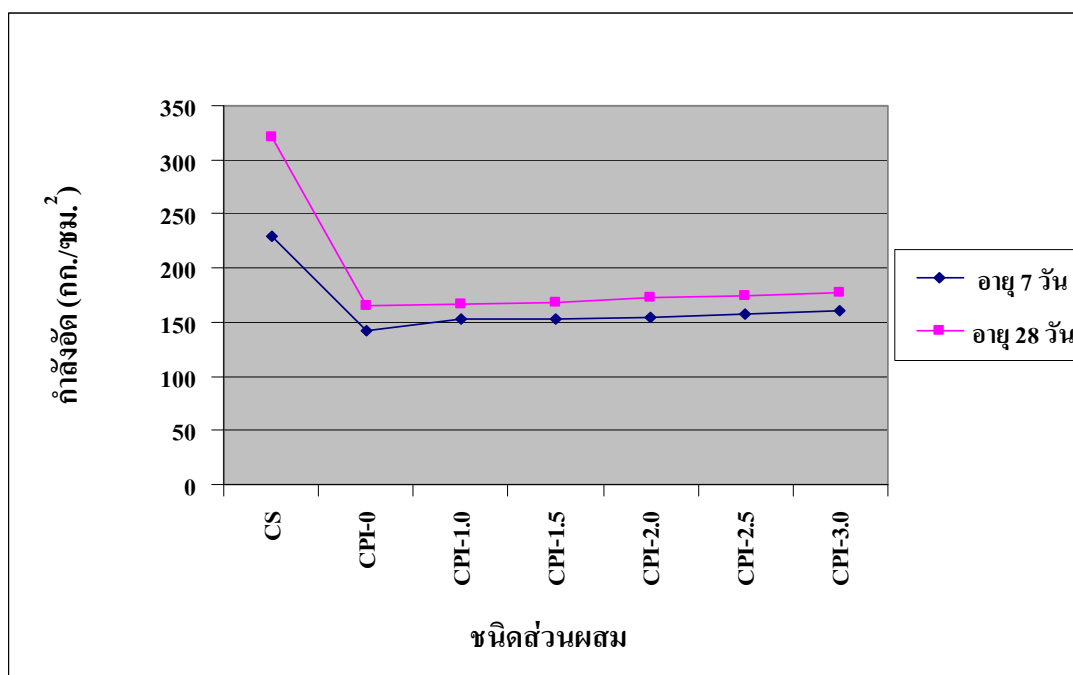
ผลการทดสอบคุณสมบัติ ทางกายภาพ และทางเคมี ของเถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อย ไม้ยางพารา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตี้ ภาพถ่ายอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี รวมถึง การศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อย ไม้ยางพารา ได้แก่ ปริมาณความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลาย สุดท้ายคือการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา ได้แก่ ความต้องการน้ำ หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และความต้านทาน การกัดกร่อนของมอร์ตาร์

ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา

ผลทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ดังตารางที่ 4.1 โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจี้เลื้อย ไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีระยะเวลาการบดแตกต่างกัน

ชนิดส่วนผสม	กำลังอัด (กก. /ซม. ²) – ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ (%)	
	7 วัน	28 วัน
CS	230 (100)	321 (100)
CPI-0	142 (62)	165 (51)
CPI-1.0	153 (66)	167 (52)
CPI-1.5	153 (66)	168 (52)
CPI-2.0	154 (67)	172 (54)
CPI-2.5	158 (69)	175 (55)
CPI-3.0	160 (70)	178 (56)



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจีเเลื่อย
ไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับชนิดส่วนผสม

ซึ่งจากผลการทดสอบได้ว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 230 กก./ชม.² ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าจีเเลื่อยไม้ยางพาราที่บดด้วยเวลา 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, และ 3.0 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 142, 153, 153, 154, 158 และ 160 กก./ชม.² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 62, 66, 66, 67, 69 และ 70 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ส่วนค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 321 กก./ชม.² ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าจีเเลื่อยไม้ยางพาราที่บดด้วยเวลา 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 165, 167, 168, 172, 175 และ 178 กก./ชม.² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 51, 52, 52, 54, 55 และ 56 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งค่าดัชนีกำลังอัดนั้นต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งกำหนดค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วันต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน

ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงเลือกใช้เถ้าจีเเลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการบดเป็นระยะเวลา 1.0 ชั่วโมง ซึ่งมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 9.20 มาใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ และคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผสมเพิ่มเถ้าจีเเลื่อยไม้ยางพารา เนื่องจากกำลังอัดที่ทดสอบได้มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของเถ้าจีเเลื่อยไม้ยางพาราที่ใช้ระยะเวลาในการบดที่นานขึ้น ดังนั้นเพื่อประหยัดเวลาและ

พลังงานในการบดถั่วลิสงไม้ยางพาราจึงเลือกใช้ถั่วลิสงไม้ยางพาราที่ผ่านการบดเป็นระยะเวลา 1.0 ชั่วโมง

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและถั่วลิสงไม้ยางพารา

สี

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีสีเทาอ่อน เถ้าลอยมีสีน้ำตาลแก่ และถั่วลิสงไม้ยางพารามีสีน้ำตาลอ่อน



ภาพที่ 4.2 สีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และถั่วลิสงไม้ยางพารา

ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.55 ส่วนเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.19 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13 ซึ่งเมื่อนำเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารามาบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มเป็น 2.28 แสดงว่าการบดเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราสามารถทำให้อนุภาค มีขนาดเล็กลงและสามารถลดช่องว่าง และรูพรุน ทั้งนี้เพราะว่าอนุภาคของเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราก่อนบดมีความพรุนสูงและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง แต่เมื่อบดแล้วทำให้อนุภาคที่ขนาดใหญ่แตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก รูพรุนจึงน้อยลงทำให้มีความถ่วงจำเพาะมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ความละเอียด	
		ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	แอร์เพอร์มิอะบิลิตี้ (ชม. ² /กรัม)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 คราซ้าง	3.13	5.2	3300
เถ้าลอย	2.55	31.1	2670
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพารา	2.19	20.1	5900
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราบด 1.0 ชั่วโมง	2.28	9.2	8290
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราบด 1.5 ชั่วโมง	-	5.8	-
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราบด 2.0 ชั่วโมง	-	3.8	-
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราบด 2.5 ชั่วโมง	-	3.4	-
เถ้าจี้เลื้อยไม้ยางพาราบด 3.0 ชั่วโมง	-	3.0	-

ความละเอียดและพื้นที่ผิวจำเพาะ

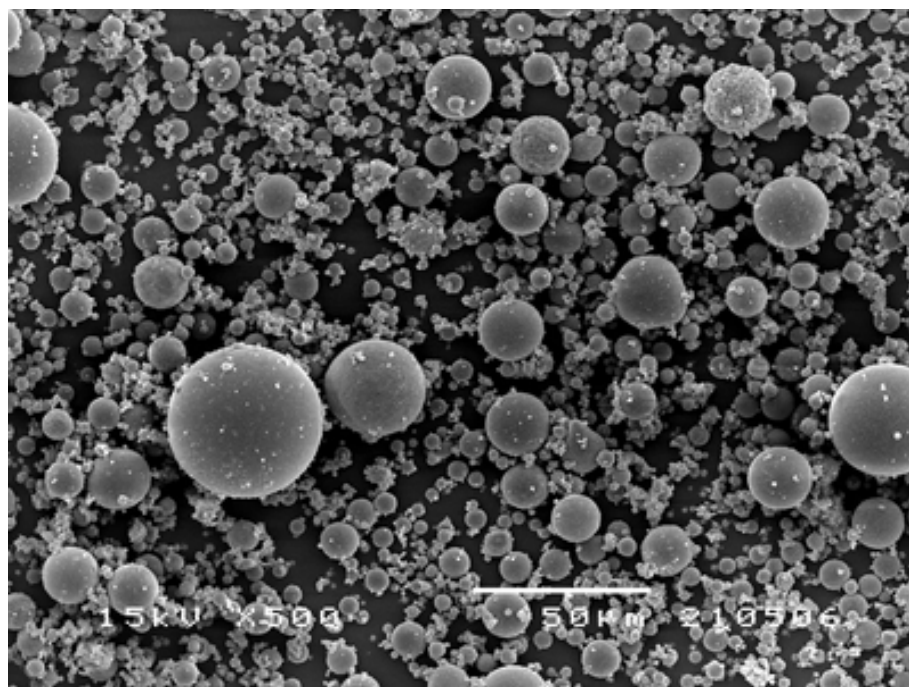
ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราโดยการหาอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.2, 31.2 และ 20.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของเถ้าลอย และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบโดยวิธีแอร์เพอร์มิอ์เบิลิตี้ (Air Permeability) ของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บด 1.0 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3300, 2670, 5900 และ 8290 ซม.²/กรัมตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการบดเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราให้มีความละเอียดขึ้นแล้ว นอกจากจะลดขนาดอนุภาคแล้ว ยังเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราอีกด้วย

จากพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บด 1.0 ชั่วโมง ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์มาก ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่บด 1.0 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และประกอบกับภาพถ่ายของอนุภาคเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราแสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีความพรุนเหลืออยู่ ดังนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดขึ้นอาจรวมถึงพื้นที่ผิวที่เกิดจากโพรงอากาศภายในอนุภาคของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นจึงเป็นพื้นที่ผิวโดยรอบของอนุภาคมากกว่าการเป็นพื้นที่ผิวที่เกิดจากโพรงอากาศภายในอนุภาค จึงทำให้เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์

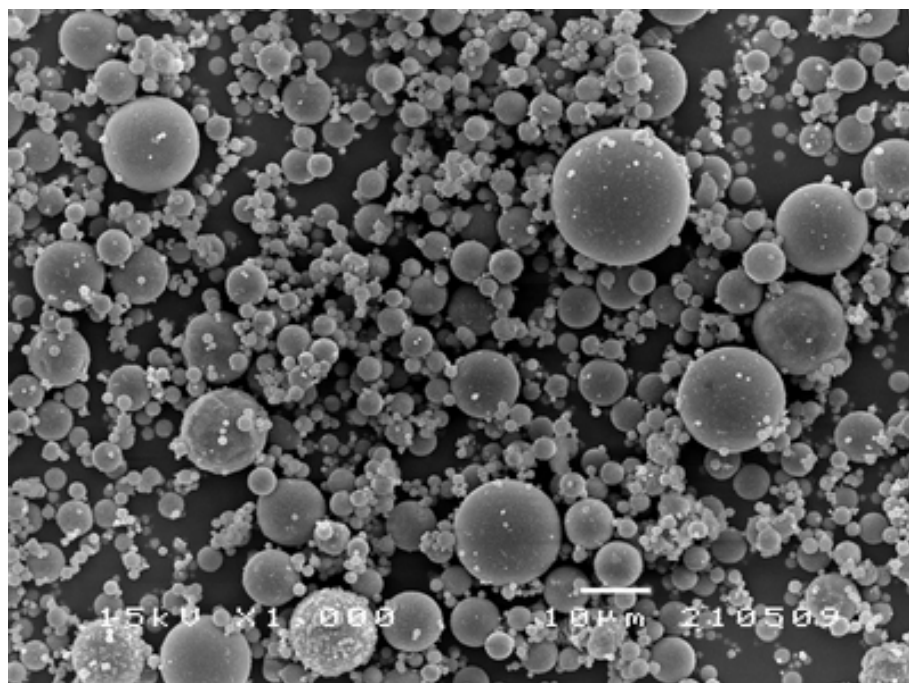
รูปร่างลักษณะของอนุภาค

รูปร่างลักษณะของอนุภาค ของเถ้าลอยและเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายขยายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงในรูปที่ 4.3-4.6 พบว่าเถ้าลอย มีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

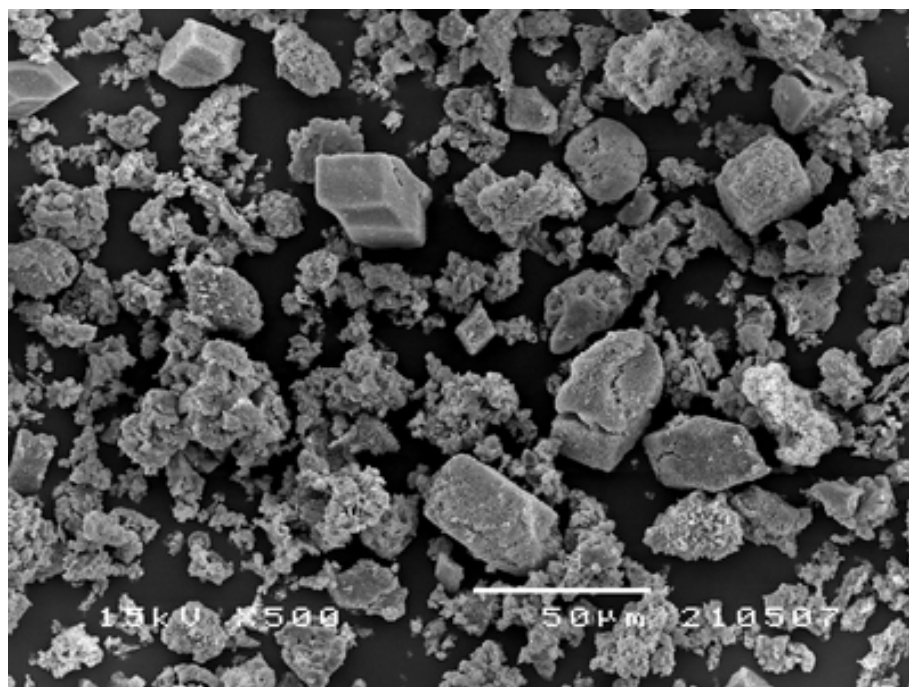
ส่วนเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความพรุน ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถ ดูดซึมน้ำได้มาก



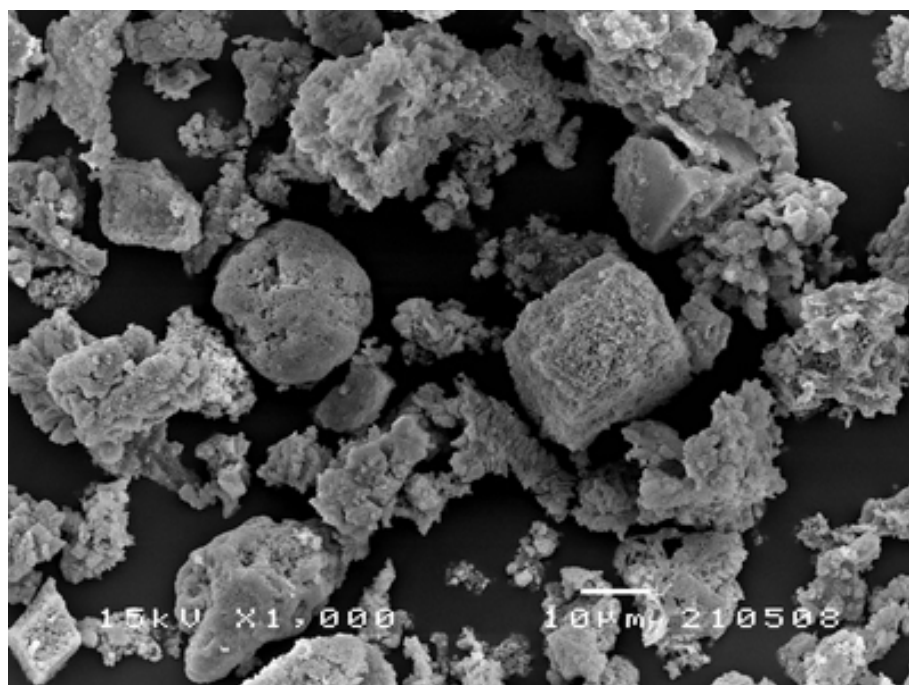
ภาพที่ 4.3 รูปขยายอนุภาคถั่วลอย 500 เท่า



ภาพที่ 4.4 รูปขยายอนุภาคถั่วลอย 1000 เท่า



ภาพที่ 4.5 รูปขยายอนุภาคเถ้าข้าวเปลือก 500 เท่า



ภาพที่ 4.6 รูปขยายอนุภาคเถ้าข้าวเปลือก 1000 เท่า

คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่ามีปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 50.71, 15.60, 9.41 และ 16.62 ตามลำดับ ซึ่งเป็นเถ้าลอย Class F เนื่องจากมีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 75.72 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C618 นอกจากนี้ เถ้าลอยยังมี SO_3 เท่ากับร้อยละ 3.42 น้อยกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน C618 ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา พบว่ามีปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 15.14, 1.06, 0.56 และ 32.34 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามี CaO สูงกว่าเถ้าลอย และมี SO_3 เท่ากับร้อยละ 3.29 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 2.64 อย่างไรก็ตาม เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราไม่จัดเป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากไม่มี SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักตามมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย	เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา
SiO_2	50.71	15.14
Al_2O_3	15.60	1.06
Fe_2O_3	9.41	0.56
CaO	16.62	32.34
K_2O	2.53	19.05
SO_3	3.42	3.29
LOI	-	2.64

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพารา

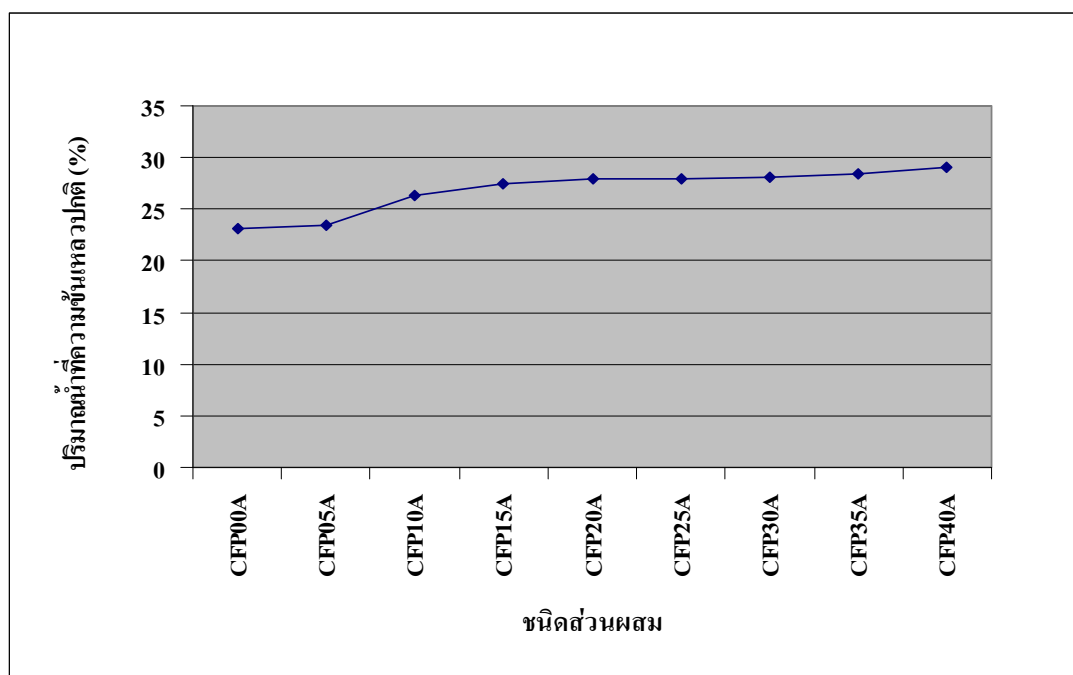
ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพารา

ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 23.13, 23.42, 26.36, 27.39, 27.88, 27.96, 28.15, 28.34 และ 29.00 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 101, 114, 118, 121, 121, 122, 123 และ 125 ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม (CFP00A)

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราจะแปรผันโดยตรงเมื่ออัตราการแทนที่ของเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพาราเพิ่มขึ้น จะทำให้มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าจี้เลื้อยไม่ยางพารามีรูพรุนสูง โครงอากาศมกทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมีมาก จึงมีความต้องการน้ำมากเพื่อไปเติมช่องว่างของอนุภาค และรูพรุนที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

ชนิดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (%) - ดัชนีความต้องการน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (%)
CFP00A	23.13 (100)
CFP05A	23.42 (101)
CFP10A	26.36 (114)
CFP15A	27.39 (118)
CFP20A	27.88 (121)
CFP25A	27.96 (121)
CFP30A	28.15 (122)
CFP35A	28.34 (123)
CFP40A	29.00 (125)



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์กับชนิดส่วนผสม

ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

ระยะเวลาการก่อตัวต้นของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราดัวยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 130, 135, 140, 146, 150, 161, 165, 175 และ 193 นาที ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 104, 108, 112, 115, 124, 127, 135 และ 148 ของมอร์ตาร์ดาร์ควมคุม (CFP00A)

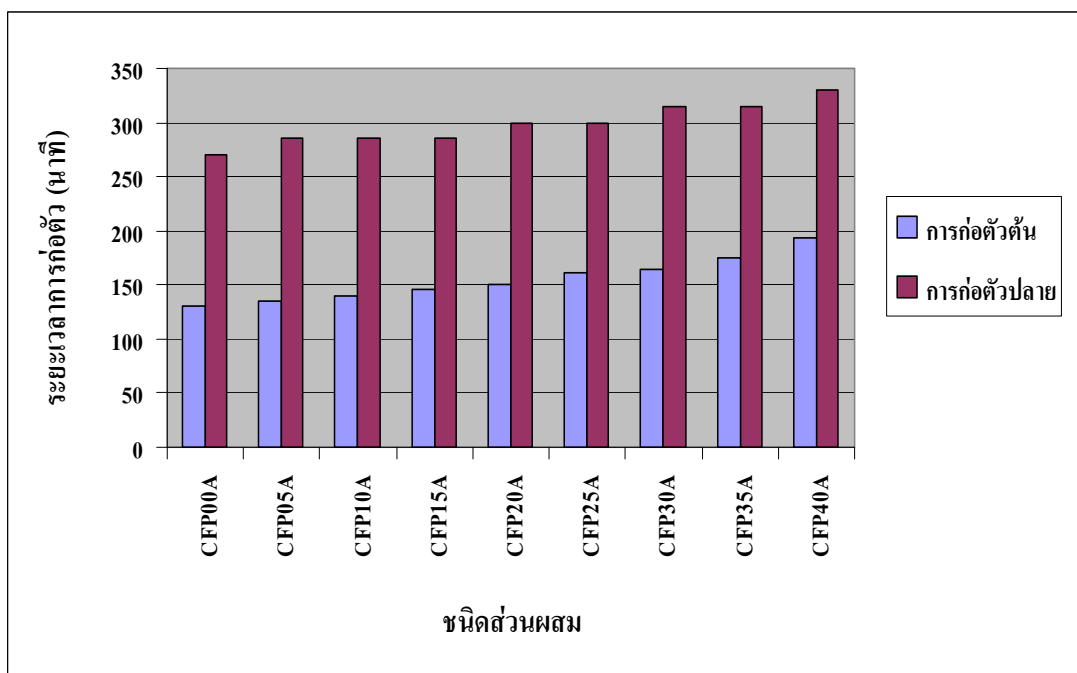
ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ก่อตัวต้นของซีเมนต์เพสต์จะแปรผันโดยตรงกับร้อยละของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น ซึ่งร้อยละของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุของระยะเวลาในการก่อตัวต้นที่เพิ่มขึ้นตามร้อยละการผสมเพิ่มเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นแฝงในรูปพรุน และช่องว่างของอนุภาคเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่แทนที่เข้าไป จึงต้องใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากขึ้นด้วยส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวช้าลง

สำหรับระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มด้วยเถ้าซีลี้อย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 270, 285, 285, 285, 300, 300, 315, 315 และ 330 นาที ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 106, 106, 106, 111, 111, 117, 117 และ 122 ของมอร์ตาร์ดรีควม (CFP00A) ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของซีเมนต์เพสต์ผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อย่างพารา ทุกส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวปลายที่นานขึ้น เมื่ออัตรา การแทนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับระยะเวลาการก่อตัวต้น

อย่างไรก็ตามค่าระยะเวลาการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลายที่ได้จากการทดสอบ ในแต่ละอัตราส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C150 ซึ่งได้กำหนดให้ ระยะเวลาการก่อตัวต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาการก่อตัวปลายไม่เกิน 375 นาที

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์

ชนิดส่วนผสม	ระยะเวลาการก่อตัวต้น(นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวปลา(นาที)
	- ดัชนีก่อตัวต้น (%)	- ดัชนีก่อตัวปลาย (%)
CFP00A	130 (100)	270 (100)
CFP05A	135 (104)	285 (106)
CFP10A	140 (108)	285 (106)
CFP15A	146 (112)	285 (106)
CFP20A	150 (115)	300 (111)
CFP25A	161 (124)	300 (111)
CFP30A	165 (127)	315 (117)
CFP35A	175 (135)	315 (117)
CFP40A	193 (148)	330 (122)



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์

คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพารา

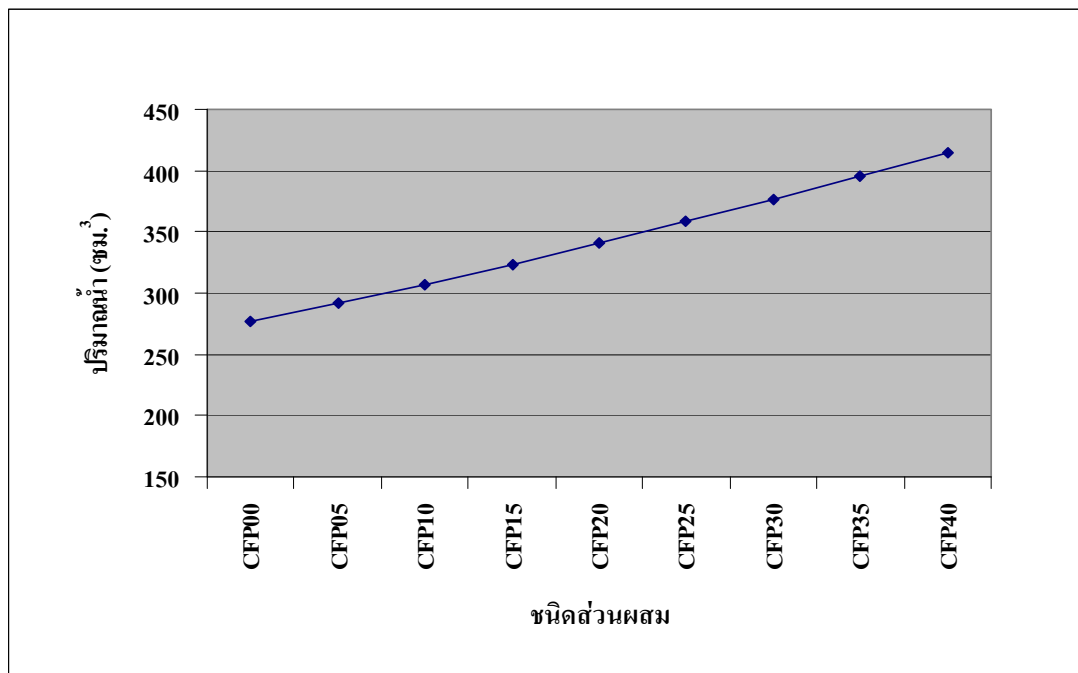
ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก และควบคุมปริมาณน้ำให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 110 ± 5 พบว่ามีความต้องการน้ำเท่ากับ 277, 292, 307, 323, 341, 358, 376, 395 และ 415 ลบ.ซม. ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 105, 111, 107, 123, 129, 136, 143 และ 150 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00) และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีค่าเท่ากับ 0.554, 0.556, 0.558, 0.562, 0.568, 0.573, 0.578, 0.585 และ 0.593 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 101, 101, 103, 103, 104, 106 และ 107 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00)

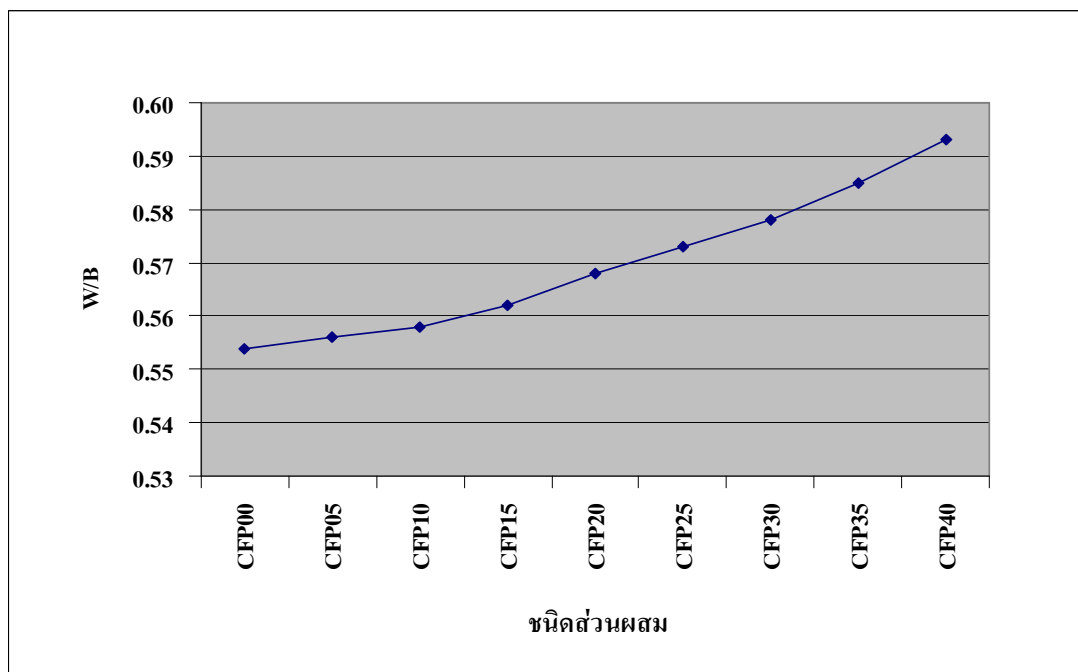
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมเพิ่มด้วยเถ้าซีลี้อยู่ในปริมาณร้อยละเพิ่มขึ้น จะทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเถ้าซีลี้อยู่ในปริมาณสูง ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคสูงส่งผลให้มีช่องว่างเป็นจำนวนมาก และวัสดุมีความพรุนสูง ส่งผลทำให้การดูดซึมน้ำมากขึ้น ดังนั้นเพื่อควบคุมการไหลให้เท่ากับมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วย เถ้าซีลี้อยู่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการไหล (Flow Test) ของมอร์ตาร์

ชนิดส่วนผสม	ปริมาณน้ำ (ลบ.ซม.) - ดัชนีปริมาณน้ำ (%)	W/B - ดัชนี W/B (%)	Flow Test (%)
CFP00	277 (100)	0.554 (100)	106.75
CFP05	292 (105)	0.556 (100)	107.75
CFP10	307 (111)	0.558 (101)	110.75
CFP15	323 (117)	0.562 (101)	110.50
CFP20	341 (123)	0.568 (103)	107.50
CFP25	358 (129)	0.573 (103)	108.00
CFP30	376 (136)	0.578 (104)	106.28
CFP35	395 (143)	0.585 (106)	109.50
CFP40	415 (150)	0.593 (107)	108.00



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/B ของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม

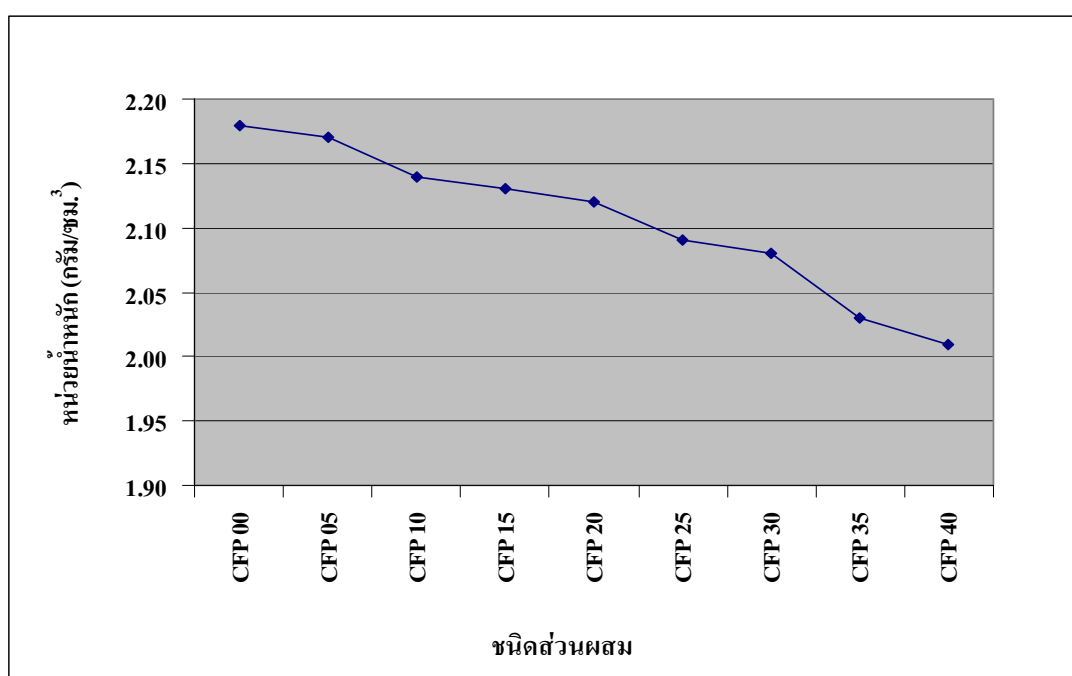
หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพารา

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.18, 2.17, 2.14, 2.13, 2.12, 2.09, 2.08, 2.03 และ 2.01 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 99, 98, 98, 97, 96, 95, 93 และ 92 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00) จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพารา เช่น เมื่อผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีหน่วยน้ำหนักร้อยละ 92 ของมอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพารามีความกว้างจำเพาะน้อยกว่าเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้มีหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้นด้วย

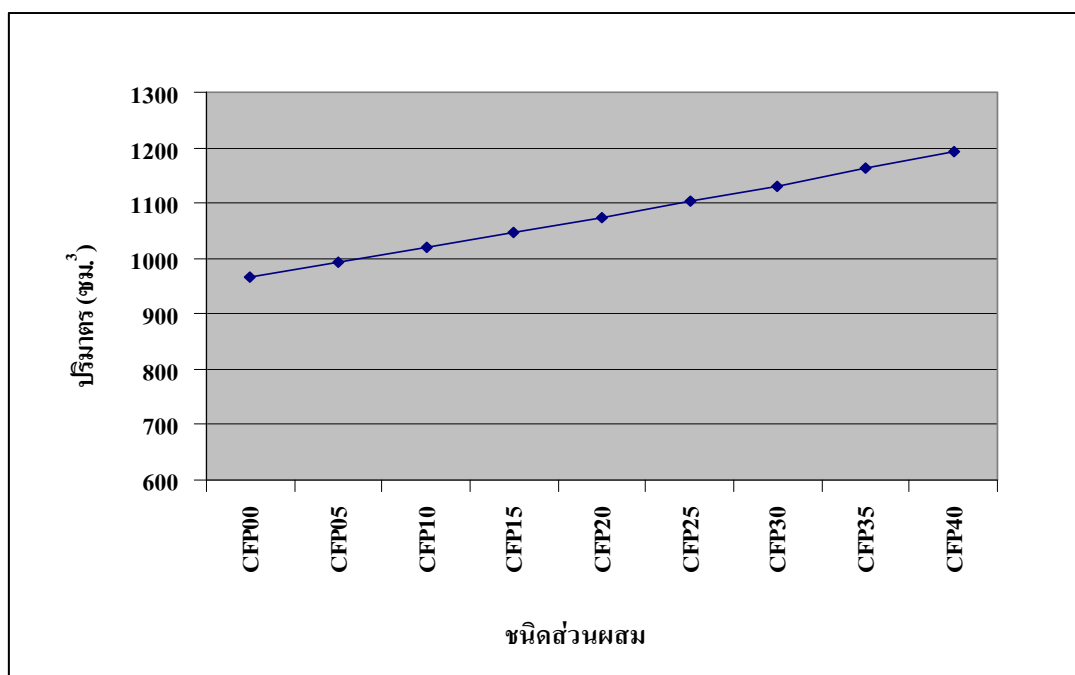
จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อผสมมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาตรของมอร์ตาร์เท่ากับ 966.82, 992.79, 1018.75, 1045.72, 1074.68, 1102.65, 1131.61, 1161.58 และ 1192.54 ซม.³ ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 105, 108, 111, 114, 117, 120 และ 123 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีปริมาตรเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อผสมเพิ่มเถ้าชีเลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีปริมาตรร้อยละ 123 ของมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ได้เนื้อคอนกรีตที่มากกว่าเนื้อคอนกรีตปกติ

ตารางที่ 4.7 หน่วยน้ำหนักและปริมาตรของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจีเเล่อย่างพารา

ชนิดส่วนผสม	หน่วยน้ำหนัก(กรัม/ซม. ³) - คำนวณน้ำหนัก(%)	ปริมาตร(ซม. ³) - คำนวณปริมาตร(%)
CFP00	2.18 (100)	966.82 (100)
CFP05	2.17 (99)	992.79 (103)
CFP10	2.14 (98)	1018.75 (105)
CFP15	2.13 (98)	1045.72 (108)
CFP20	2.12 (97)	1074.68 (111)
CFP25	2.09 (96)	1102.65 (114)
CFP30	2.08 (95)	1131.61 (117)
CFP35	2.03 (93)	1161.58 (120)
CFP40	2.01 (92)	1192.54 (123)



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม



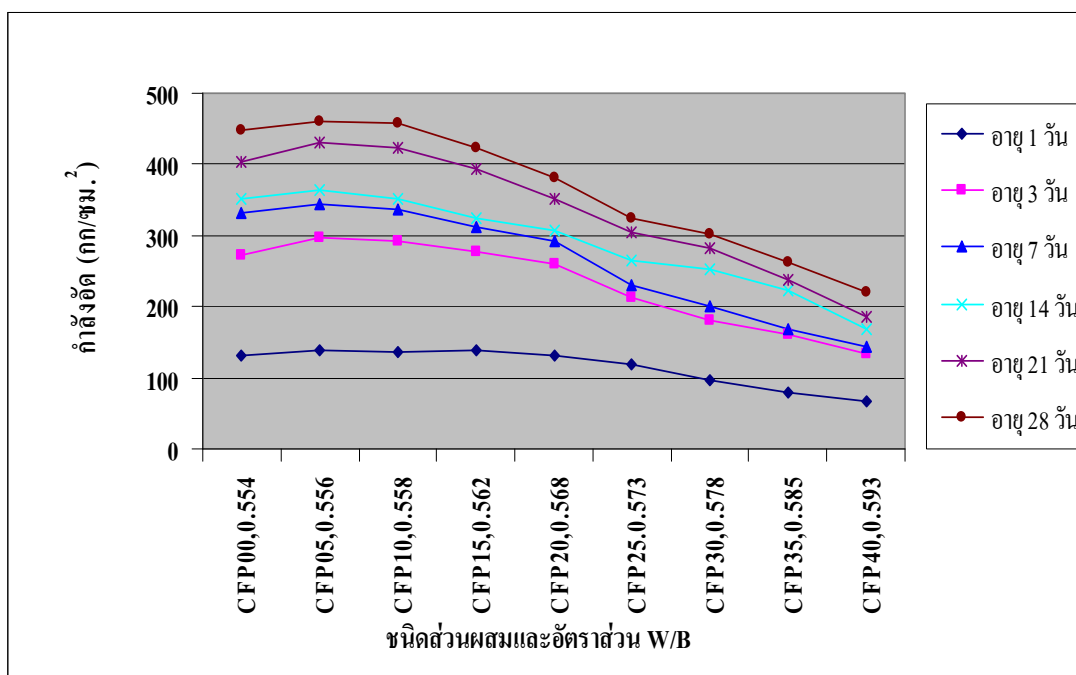
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสม

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา

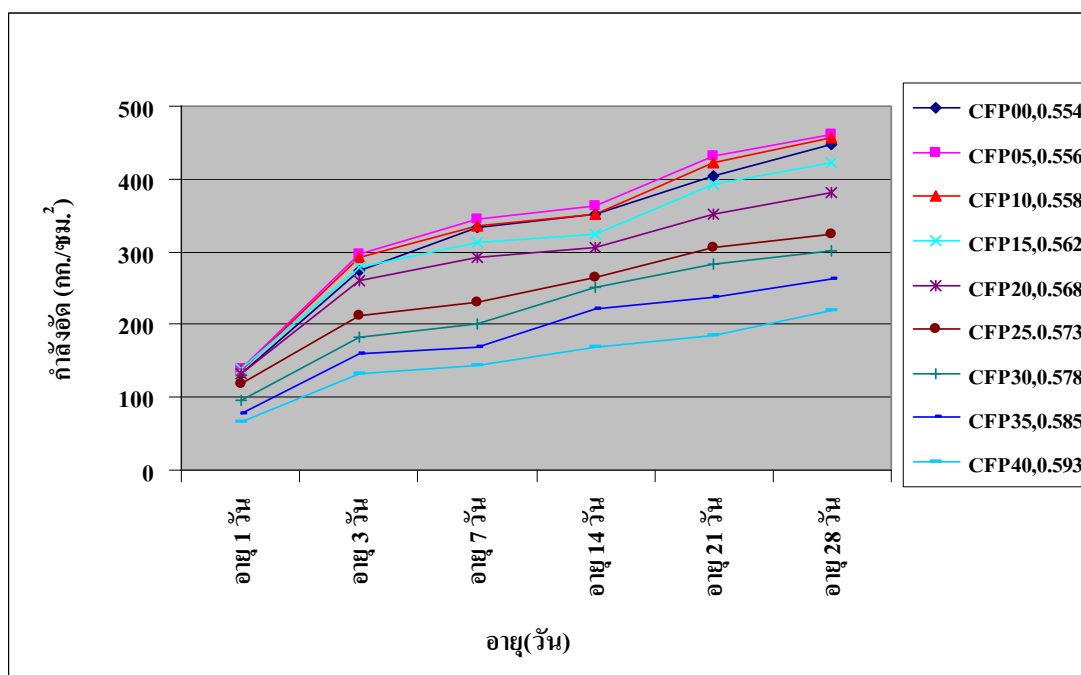
กำลังอัดเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับคอนกรีต ซึ่งจากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนคงที่เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก ทดสอบด้วยมอร์ตาร์ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร และได้ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังอัดดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มด้วยเถ้าชี้เลี้ยงไม่ย่างพารา

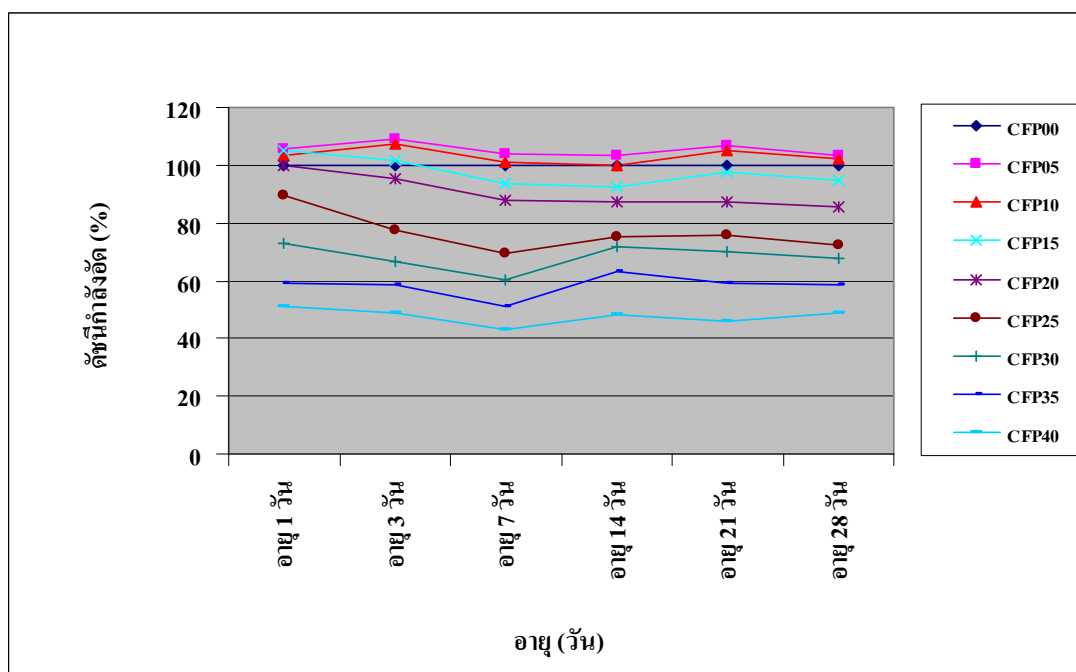
ชนิด ส่วนผสม	กำลังอัด (กก./ซม. ²) - ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ (%)					
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
CFP00	132 (100)	273 (100)	333 (100)	352 (100)	403 (100)	447 (100)
CFP05	140 (106)	297 (109)	345 (104)	363 (103)	432 (107)	461 (103)
CFP10	136 (103)	293 (107)	336 (101)	352 (100)	423 (105)	457 (102)
CFP15	138 (105)	278 (102)	312 (94)	325 (92)	392 (97)	423 (95)
CFP20	132 (100)	261 (95)	292 (88)	307 (87)	352 (87)	381 (85)
CFP25	118 (90)	212 (78)	231 (69)	265 (75)	306 (76)	324 (73)
CFP30	96 (73)	182 (67)	201 (60)	252 (72)	283 (70)	302 (68)
CFP35	78 (59)	160 (59)	169 (51)	222 (63)	238 (59)	263 (59)
CFP40	67 (51)	133 (49)	143 (43)	169 (48)	186 (46)	219 (49)



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับชนิดส่วนผสมและอัตราส่วน W/B



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มด้วยเถ้าชี้เลื่อย ไม้ยางพารา ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ควบคุม CFP00 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 132, 273, 333, 352, 403 และ 447 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP05 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 140, 297, 345, 363, 432 และ 461 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 106, 109, 104, 103, 107 และ 103 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 136, 293, 336, 352, 423 และ 457 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 103, 107, 101, 100, 105 และ 102 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นว่ามอร์ตาร์ CFP05 และมอร์ตาร์ CFP10 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CFP00 ทุกอายุการบ่ม เนื่องจากเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง จึงช่วยเติมแคลเซียมออกไซด์ที่ขาดหายไปจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ซึ่งตรงกับการวิจัยของ (จรูญ, 2547) ได้กล่าวว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์เทียบเท่า (CaO Equivalent) ในวัสดุประสานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลาน กล่าวคือ มอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานในอัตราแทนที่ที่เท่ากัน กำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า จะมีความสามารถรับกำลังอัดได้มากด้วย

มอร์ตาร์ CFP15 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 138, 278, 312, 325, 392 และ 423 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 105, 102, 94, 92, 97 และ 95 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 132, 261, 292, 307, 352 และ 381 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 95, 88, 87, 87 และ 85 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP25 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 118, 212, 231, 265, 306 และ 324 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 90, 78, 69, 75, 76 และ 73 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP30 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 96, 182, 201, 252, 283 และ 302 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 73, 67, 60, 72, 70 และ 68 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP35 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 78, 160, 169, 222, 238 และ 263 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 59, 59, 51, 63, 59 และ 59 ของมอร์ตาร์มาตรฐานตามลำดับ

มอร์ตาร์ CFP40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 67, 133, 143, 169, 186 และ 219 กก./ซม.² ของอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 51, 49, 43, 48, 46 และ 49 ของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราจะทำให้กำลังอัดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 40 เนื่องจากเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารามีความพรุนสูงคูดน้ำมาก และมีพื้นที่ผิวมากจึงมีความต้องการน้ำมาก ดังนั้นปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราไม่เพียงพอที่จะชดเชยความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ จึงทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่มากจะทำให้กำลังน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เช่น มอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดประมาณร้อยละ 40-50 ของมอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุการบ่ม

ทดสอบคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา

จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนลงที่เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนักและนำไปแช่กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)

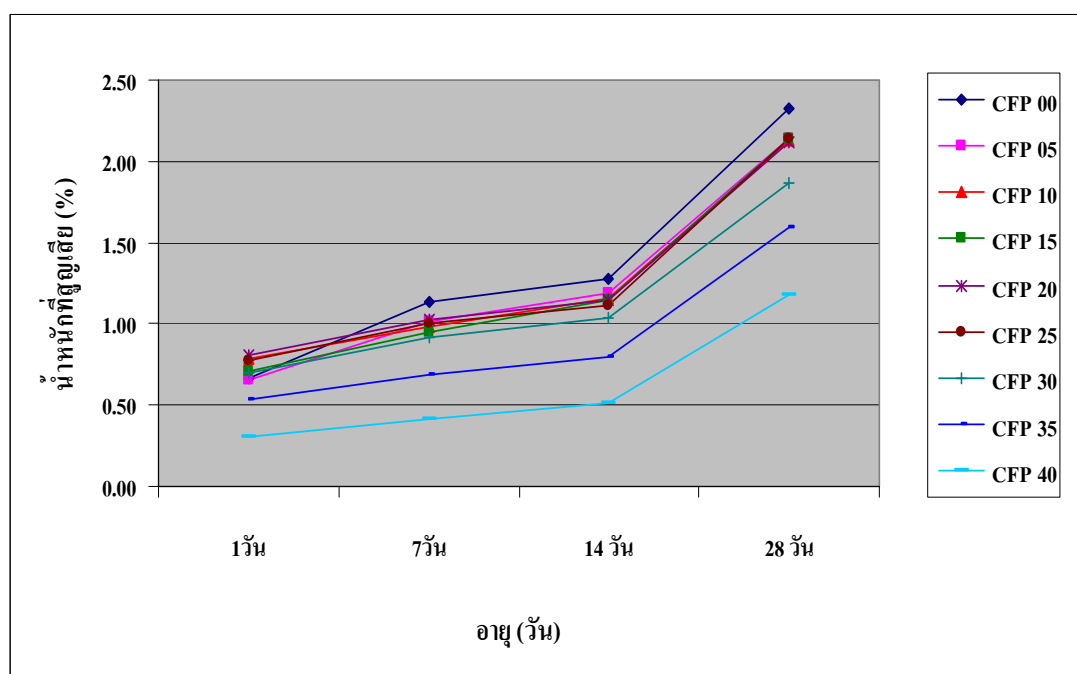
ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์ CFP00 มีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกัดกร่อนของกรดเท่ากับร้อยละ 0.67, 1.14, 1.28 และ 2.32 ของอายุที่แช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) เป็นเวลา 1, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ และมอร์ตาร์ CFP40 มีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) เท่ากับร้อยละ 0.31, 0.41, 0.51 และ 1.18 ของอายุที่แช่ในกรดเป็นเวลา 1, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมเพิ่มเส้นใยแก้วไม้อย่างพาราเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกัดกร่อนน้อยลง อย่างไรก็ตาม การทดสอบการกัดกร่อนยังแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของ W/B น้อยลงความต้านทานการกัดกร่อนก็จะมากขึ้นด้วย เช่น มอร์ตาร์ CFP00 มีค่า W/B เท่ากับ 0.554 มีค่าการมีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกัดกร่อนที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 2.32 ส่วนมอร์ตาร์ CFP40 มีค่า W/B เท่ากับ 0.593 มีค่าการมีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกัดกร่อนที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 1.18



ภาพที่ 4.16 การกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.9 น้ำหนักที่สูญหายของลูกบาศก์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในน้ำกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก

ชนิดส่วนผสม	น้ำหนักที่สูญหาย (%)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
CFP00	0.67	1.14	1.28	2.32
CFP05	0.66	1.01	1.19	2.14
CFP10	0.79	0.98	1.16	2.13
CFP15	0.71	0.95	1.15	2.14
CFP20	0.81	1.03	1.15	2.12
CFP25	0.77	1.00	1.11	2.14
CFP30	0.70	0.92	1.04	1.87
CFP35	0.54	0.69	0.80	1.59
CFP40	0.31	0.41	0.51	1.18



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักที่สูญเสียกับอายุของมอร์ตาร์ เมื่อแช่ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

คุณสมบัติทางด้านกายภาพของถ้ำลอยพบว่ารูปร่างลักษณะของอนุภาคมีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นทรงกลม ผิวเรียบ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.55 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้เท่ากับ $2670 \text{ ซม.}^2/\text{กรัม}$ และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 ส่วนถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพาราที่มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความพรุนสูง มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.19 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้เท่ากับ $5900 \text{ ซม.}^2/\text{กรัม}$ และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20.1 และเมื่อนำถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพารามาบดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ามีความถ่วงจำเพาะเพิ่มเป็น 2.28 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทดสอบโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้เท่ากับ $8290 \text{ ซม.}^2/\text{กรัม}$ และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 9.2

คุณสมบัติทางด้านเคมีคุณสมบัติทางเคมีของถ้ำลอยพบว่ามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 50.71, 15.60, 9.41 และ 16.62 ตามลำดับ ซึ่งเป็นถ้ำลอย Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 และถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพารามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 15.14, 1.06, 0.56 และ 32.34 ซึ่งพบว่ามี CaO สูงกว่าถ้ำลอย

ดัชนีความเป็นปอซโซลานของมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพาราที่บดด้วยเวลา 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, และ 3.0 ชั่วโมง มีค่าดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 60-70 ของมอร์ต้ารควบคุม ส่วนดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 50-60 ของมอร์ต้ารควบคุม จึงสรุปได้ว่าถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพาราไม่มีความเป็นปอซโซลาน เนื่องจากมีค่ากำลังอัดไม่ถึงร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งจากผลการทดสอบจึงควรนำถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุมวลเบา เนื่องจากมีความต้องการกำลังอัดที่น้อย

ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์และความต้องการน้ำของมอร์ต้าจะแปรผันโดยตรงเมื่ออัตราการผสมเพิ่มของถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของถ้ำจี๋เลื่อยไม้ยางพารามีรูพรุนสูง โพรงอากาศมากจึงทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมีมาก

จึงต้องมีความต้องการน้ำมากเพื่อไปเติมช่องว่างของอนุภาค และรูพรุนที่เกิดขึ้นของเถ้าซีลี้อย
ไม่เพียงพอ

ระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายซึ่งพบว่าระยะเวลาการก่อตัวจะแปรผัน
โดยตรงกับร้อยละของเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นของซีเมนต์
เพสต์ที่เพิ่มขึ้น สาเหตุของระยะเวลาในการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นตามร้อยละการผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อย
ไม่เพียงพอ เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเพื่อแผ่งในอยู่รูพรุน และช่องว่างของอนุภาค
เถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอที่ผสมเพิ่มเข้าไปจึงทำให้มีช่องว่างที่มาก จึงต้องใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลว
ปกติมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวช้าลง

หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วยเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอ จะทำให้มีหน่วยน้ำหนัก
ลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอ เนื่องจากเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอมีความถ่วงจำเพาะ
น้อยกว่าเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอในงานคอนกรีต
จะทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอจะทำให้
มอร์ตาร์มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานคอนกรีตจะทำให้ได้เนื้อคอนกรีตที่มากกว่าเนื้อคอนกรีต
ที่ไม่ได้ผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอ

กำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10
จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอายุของมอร์ตาร์ ซึ่งมีค่ากำลังอัดประมาณเท่ากับร้อยละ
100 -110 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00) เนื่องจากเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง
จึงช่วยเติมแคลเซียมออกไซด์ที่ขาดหายไปจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และเมื่อผสมเพิ่ม
เถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอเพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 จะทำให้กำลังอัด
ลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 40-90 ของมอร์ตาร์ควบคุม (CFP00)
เนื่องจากเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอมีความพรุนสูง คุณค่ามาก และมีพื้นที่ผิวมาก จึงมีความต้องการน้ำมาก
ดังนั้นปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอไม่เพียงพอที่จะชดเชย
ความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ จึงทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อย
ไม่เพียงพอที่มากจะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ดังนั้นอัตราส่วนของการผสมเพิ่ม
เถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอที่เหมาะสมคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
และผสมเพิ่มเถ้าซีลี้อยไม่เพียงพอด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีค่ากำลัง
อัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม มีน้ำหนักเบากว่ามอร์ตาร์ควบคุม มีปริมาตรของเนื้อมอร์ตาร์มากกว่า
มอร์ตาร์ควบคุม และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

หน่วยน้ำหนักที่สูญหายจากการแช่ในกรดซัลฟริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.45 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อผสมเพิ่มเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น จะทำให้มีค่าน้ำหนักที่สูญหายไปจากการกักกร่อน น้อยลง ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าล่อย และผสมเพิ่ม เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราสามารถช่วยลดการกักกร่อนของกรดซัลฟริกได้

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การศึกษาวิจัยการนำเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ในวงการอุตสาหกรรม ก่อสร้างนั้น จึงขอเสนอแนะแนวทางในการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ลักษณะคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา อาจมีความแตกต่างกันตามแหล่งที่มา
2. เนื่องจากเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงควรจะทำการศึกษาเพื่อที่จะนำปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีอยู่ในเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น
3. เนื่องจากการแทนที่เถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้มีกำลังอัดน้อยกว่ามาตรฐาน จึงเห็นควรนำเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุมวลเบา เนื่องเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารามีน้ำหนักเบา และวัสดุมวลเบามีความต้องการกำลังอัดที่น้อย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2546. รายงานสถิติการป่าไม้ของประเทศไทย. กองแผนงาน กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2540. รายงานการศึกษาศักยภาพการนำถ่านล้อยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนซีเมนต์. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

จักรพันธ์ วงษ์พา. 2546. การใช้ถ่านกลบ-เปลือกไม้เพื่อเป็นวัสดุปลูกโซลาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จรูญ เจริญเนตรกุล. 2547. รายงานการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยถ่านล้อยลิกไนต์อย่างพารา. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9.

ชัดเจน ฤตวิรุฬห์. 2544. การศึกษาผลกระทบจากการเติมถ่านล้อยและถ่านล้อยลิกไนต์อย่างพาราที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมบางประการของมอร์ตาร์. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย, และ วราภรณ์ คุณาวานากิจ. 2543. รายงานคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของถ่านล้อย. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้ถ่านล้อยในงานคอนกรีต. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ดนุพล ตันนโยภาส, ชัดเจน ฤตวิรุฬห์, อำพล กิติโชติ. 2545. ผลกระทบจากการเติมถ่านล้อยและถ่านล้อยลิกไนต์อย่างพาราที่มีต่อมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์. เอกสารการประชุมโยธาแห่งชาติ.

ประจित จิรัปปภา. 2535. รายงานคอนกรีตผสมขี้ถ่านล้อยแม่เมาะ รายงานผลการวิจัย ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ. 2547. **เถ้าลอยในงานคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีต, กรุงเทพฯ.

_____, และ อินทรชัย หอวิจิตร. 2528. **รายงานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วาสนา สามห้วย. 2538. **การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. 2542. **การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สัญญา สอาดกิตินันท์. 2545. **การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะแบบ และไม่คัดแยกขนาดโดยปรับปรุงตามมาตรฐานเอซีไอ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2544. **รายงานการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต**. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

American Society for Testing and Material. 1986a. **Annual Book of ASTM Standards**. VOL 04.01 ed. Easton, MD, Philadelphia, U.S.A.

_____. 1986b. **Annual Book of ASTM Standards**. VOL 04.02 ed. Easton, MD, Philadelphia, U.S.A.

Brink, R.H., W.J. Halsted. 1956. **Studies relating to the testing of fly ash for use in concrete**. **Proceeding ASTM56.1161-1206**. n.p.

Elinwa, A.U., Y.A. Mahmood. 2001. **Ash from timber waste as cement replacement material**. cement concrete composite. n.p.

Tonnayopas, D. and J. Chaosincharoen. 2001. **Properties of mortar containing fly ash and parawood sawdust ash.** Report to Proc of Regional Conf on Higher Engineering Education System. University of Malaya, Kualalamper Malasia.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลทดสอบลักษณะทางกายภาพ

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย
และเถ้าจี้ละเอียดไม่ยางพารา

ตัวอย่างที่	ชนิดของวัสดุ	น้ำหนักตัวอย่าง	ปริมาตรตัวอย่าง	ค่าความ ถ่วงจำเพาะ
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ตราช้าง)	64.0	20.4	3.13
2		64.0	20.5	3.12
เฉลี่ย				3.13
1	เถ้าลอย	53.7	21.2	2.53
2		54.3	21.2	2.56
เฉลี่ย				2.55
1	เถ้าจี้ละเอียดไม่ยางพารา	46.0	20.9	2.20
2		46.1	21.1	2.18
เฉลี่ย				2.19
1	เถ้าจี้ละเอียดไม่ยางพารา บด 1 ชั่วโมง	47.6	20.8	2.28
2		47.0	20.7	2.27
เฉลี่ย				2.28

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์

ชนิดส่วนผสม	ครั้งที่	ปริมาณน้ำ		ความลึกของ ก้านเข็มที่จม (มม.)	ความชื้นเหลือ ปกติ (%)
		ลบ.ซม.	%		
CFP00A	1	113	22.60	8	23.13
	2	115	23.00	9	
	3	117	23.40	12	
CFP05A	1	121	23.05	8	23.42
	2	123	23.43	10	
	3	125	23.81	12	
CFP10A	1	135	24.55	6	26.36
	2	143	26.00	8	
	3	147	26.73	12	
CFP15A	1	154	26.78	7	27.39
	2	157	27.30	9	
	3	159	27.65	13	
CFP20A	1	154	25.67	7	26.16
	2	157	26.17	10	
	3	159	26.50	13	
CFP25A	1	171	27.36	7	27.96
	2	174	27.84	9	
	3	177	28.32	13	
CFP30A	1	180	27.69	8	28.15
	2	182	28.00	9	
	3	184	28.31	11	
CFP35A	1	187	27.70	8	28.34
	2	190	28.15	7	
	3	192	28.44	11	
CFP40A	1	198	28.29	8	29.00
	2	202	28.86	9	
	3	205	29.29	12	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย และผสมเพิ่มเถ้าจี้เลื้อยไม่ย่างพารา

เวลา (นาที)	ความลึกของก้านเข็มที่จม (มม.)								
	CFP00A	CFP05A	CFP10A	CFP15A	CFP20A	CFP25A	CFP30A	CFP35A	CFP40A
30	40	40	40	40	40	40	40	40	40
45	40	40	40	40	40	40	40	40	40
60	40	40	40	40	40	40	40	40	40
75	38	38	40	40	40	40	40	40	40
90	32	35	38	39	40	40	40	40	40
105	30	32	30	35	38	39	40	40	40
120	27	28	28	33	36	37	38	38	40
135	24	25	26	28	33	34	36	36	39
150	20	23	23	24	25	28	30	32	36
165	19	20	21	22	24	24	25	27	32
180	15	18	19	20	22	23	23	24	27
195	13	15	17	18	20	20	21	23	24
210	9	13	14	17	19	19	20	21	22
225	6	11	12	15	16	16	18	19	20
240	5	7	9	10	12	13	15	17	19
255	3	4	4	5	7	9	10	13	16

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

เวลา	ความลึกของก้านเข็มที่จม (มม.)								
(นาทีก)	CFP00A	CFP05A	CFP10A	CFP15A	CFP20A	CFP25A	CFP30A	CFP35A	CFP40A
270	0	1	2	2	4	5	7	10	13
285		0	0	0	2	1	3	5	9
300					0	0	2	1	4
315							0	0	2
330									0
345									
ระยะเวลา									
ก่อดำต้น	130	135	140	146	150	161	165	175	193
(นาทีก)									
ระยะเวลา									
ก่อดำปลาย	270	285	285	285	300	300	315	315	330
(นาทีก)									

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นดัชนีปอชโซลานของเถ้าชี้เลื่อยไม้ยางพารา

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CS

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	289.7	5.08	5.16	5.17	2.14	26.21	5825	222.22	230.22
7	2	290.9	5.07	5.08	5.16	2.19	25.76	6200	240.72	
7	3	279.2	5.07	5.16	4.95	2.16	26.16	5075	191.99	
7	4	291.1	5.18	5.10	5.16	2.14	26.42	6275	237.53	
7	5	284.5	5.18	5.06	5.02	2.16	26.21	6100	232.73	
7	6	280.7	5.19	5.09	5.03	2.11	26.42	5950	225.23	
28	1	284.5	5.14	5.17	5.00	2.14	26.57	10500	395.13	320.88
28	2	283.2	5.09	5.18	5.12	2.10	26.37	9050	343.24	
28	3	290.3	5.22	5.11	5.07	2.15	26.67	8275	310.22	
28	4	289.3	5.14	5.17	5.07	2.15	26.57	8300	312.34	
28	5	291.3	5.16	5.20	5.13	2.12	26.83	8525	317.72	
28	6	289.4	5.07	5.11	5.14	2.17	25.91	6950	268.26	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CS

ปูนซีเมนต์ = 500 กรัม

W/(C+P) = 0.70

เถ้าจี้ลอยไม่ยางพารา = 0 กรัม

Flow = 115.00

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CPI-0

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	262.9	5.11	5.12	5.20	1.93	26.16	3450	131.86	141.97
7	2	264.3	5.14	5.08	5.19	1.95	26.11	3275	125.43	
7	3	265.7	5.11	5.09	5.16	1.98	26.01	3950	151.87	
7	4	263.5	5.14	5.06	5.10	1.99	26.01	4050	155.72	
7	5	267.8	5.14	5.15	5.09	1.99	26.47	3400	128.44	
7	6	268.0	5.11	5.07	5.20	1.99	25.91	4200	162.11	
28	1	275.2	5.16	5.12	5.10	2.04	26.42	4250	160.87	165.07
28	2	273.8	5.13	5.13	5.09	2.04	26.32	4375	166.24	
28	3	281.7	5.10	5.11	5.10	2.12	26.06	5400	207.21	
28	4	276.3	5.11	5.12	5.12	2.06	26.16	4050	154.80	
28	5	276.6	5.10	5.13	5.16	2.05	26.16	4375	265.31	
28	6	275.1	5.10	5.11	5.14	2.05	26.06	4375	167.88	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-0

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

$W/(C+P) = 0.74$

ถ้ำน้ำเกลี้ยงไม่ยางพารา = 100 กรัม

Flow = 109.25

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CPI-1.0

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	269.4	5.01	5.14	5.08	2.06	25.75	3950	153.39	153.02
7	2	271.8	5.09	5.14	5.12	2.03	26.16	3750	143.33	
7	3	270.7	5.14	5.00	5.14	2.05	25.70	4475	174.12	
7	4	269.6	5.05	5.12	5.14	2.03	25.86	3850	148.90	
7	5	270.8	5.06	5.11	5.15	2.03	25.86	4150	160.50	
7	6	272.1	5.16	5.16	5.13	1.99	26.63	3975	149.29	
28	1	273.6	5.16	5.12	5.10	2.04	26.42	4250	160.87	165.07
28	2	274.8	5.15	5.16	5.09	2.04	26.32	4375	166.24	
28	3	274.4	5.07	5.16	5.1	2.12	26.06	5400	207.21	
28	4	270.1	5.01	5.10	5.12	2.06	26.16	4050	154.80	
28	5	273.4	5.15	5.12	5.16	2.05	26.16	4325	163.31	
28	6	274.2	5.11	5.12	5.14	2.05	26.06	4375	167.88	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-1.0

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

W/(C+P) = 0.74

เถ้าขี้เถ้าไม่ยางพารา = 100 กรัม

Flow = 114.25

ตารางผนวกที่ ๓4 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอชโซลานของมอร์ต้าร์ CPI-1.5

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	272.6	5.16	5.08	5.01	2.08	26.21	4750	181.21	153.12
7	2	271.6	5.14	5.13	5.09	2.02	26.37	5125	194.36	
7	3	271.0	5.09	5.09	5.07	2.06	25.91	3550	137.02	
7	4	271.1	5.12	5.16	5.05	2.03	26.42	3675	139.10	
7	5	270.8	5.12	5.13	5.17	1.99	26.27	4075	155.15	
7	6	272.1	5.12	5.13	5.16	1.98	26.27	3425	130.40	
28	1	274.1	5.09	5.10	5.15	2.05	25.96	4375	168.53	168.00
28	2	275.3	5.13	5.20	5.09	2.03	26.68	4600	172.44	
28	3	271.9	5.14	5.06	5.11	2.05	26.01	4350	167.25	
28	4	272.9	5.08	5.15	5.07	2.06	26.16	4125	157.67	
28	5	271.6	5.10	5.08	5.12	2.05	25.91	4525	174.66	
28	6	273.0	5.14	5.05	5.13	2.05	25.96	4150	159.88	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-1.5

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

$W/(C+P) = 0.74$

เถ้าขี้เถ้าไม่ยั้งพารา = 100 กรัม

Flow = 113.25

ตารางผนวกที่ ค5 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CPI-2.0

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	269.3	5.05	5.10	5.08	2.06	25.76	4550	176.66	153.92
7	2	266.4	5.13	5.04	5.12	2.01	25.86	4425	171.15	
7	3	269.3	5.07	5.07	5.07	2.07	25.70	3950	153.67	
7	4	269.6	5.17	5.08	5.13	2.00	26.26	2825	145.64	
7	5	270.2	5.12	5.11	5.09	2.03	26.16	3800	145.24	
7	6	267.6	5.05	5.06	5.16	2.03	25.55	3325	130.12	
28	1	271.6	5.12	5.11	5.06	2.05	26.16	4350	166.26	172.03
28	2	277.6	5.08	5.16	5.12	2.07	26.21	4375	166.90	
28	3	273.6	5.20	5.08	5.10	2.03	26.42	4250	160.89	
28	4	275.1	5.17	5.06	5.08	2.07	26.16	4575	174.88	
28	5	275.2	5.10	5.11	5.11	2.07	25.96	4675	180.09	
28	6	275.6	5.08	5.08	5.08	2.07	26.26	5100	194.19	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-2.0

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

$W/(C+P) = 0.74$

ถ้ำน้ำเกลี้ยงไม่ยางพารา = 100 กรัม

Flow = 111.25

ตารางผนวกที่ ๓6 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CPI-2.5

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	275.9	5.13	5.12	5.11	2.06	26.27	4775	181.80	158.12
7	2	273.1	5.03	5.14	5.12	2.06	25.85	4375	169.22	
7	3	273.1	5.16	5.06	5.11	2.05	26.11	3875	148.41	
7	4	273.7	5.14	5.08	5.11	2.05	26.11	3500	134.04	
7	5	275.7	5.15	5.03	5.14	2.03	26.42	4175	158.03	
7	6	268.2	5.09	5.01	5.11	2.06	25.50	4000	156.86	
28	1	274.9	5.18	5.10	5.13	2.03	26.42	4650	176.02	175.12
28	2	275.3	5.10	5.13	5.11	2.06	26.16	4550	173.91	
28	3	271.1	5.16	5.17	5.05	2.01	26.68	4700	176.18	
28	4	272.8	5.14	5.10	5.10	2.04	26.21	4425	168.80	
28	5	273.9	5.07	5.09	5.18	2.05	25.81	4500	174.38	
28	6	275.7	5.13	5.14	5.07	2.06	26.37	4775	181.09	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-2.5

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

$W/(C+P) = 0.74$

น้ำจืดสะอาดไม่ยวดยาว = 100 กรัม

Flow = 110.50

ตารางผนวกที่ ๓7 ผลการทดสอบความเป็นดัชนีปอซโซลานของมอร์ตาร์ CPI-3.0

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	252.7	4.97	5.09	5.02	1.99	25.30	3875	153.18	160.31
7	2	255.7	5.01	5.09	5.06	1.98	25.50	4025	157.84	
7	3	260.2	5.20	5.09	4.96	1.98	26.47	4850	183.24	
7	4	258.9	5.14	5.05	5.03	1.98	25.96	4225	162.77	
7	5	261.2	5.08	5.05	5.02	1.98	26.26	4175	158.97	
7	6	255.8	5.01	5.17	5.06	2.02	25.05	4050	161.68	
28	1	270.5	4.98	5.10	5.22	2.04	25.40	4675	184.07	177.52
28	2	265.7	5.19	5.01	5.06	2.02	26.00	4550	174.99	
28	3	270.7	5.12	5.20	5.00	2.03	26.62	4825	181.23	
28	4	257.2	4.98	5.06	4.98	2.05	25.20	4300	170.64	
28	5	262.6	5.00	5.08	5.06	2.04	25.40	4475	176.18	
28	6	264.2	5.13	5.10	5.01	2.02	26.26	4575	174.87	

หมายเหตุ ชนิดส่วนผสม : CPI-3.0

ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

$W/(C+P) = 0.74$

ถ้ำซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา = 100 กรัม

Flow = 109.75

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

ตารางผนวกที่ ง1 ผลการทดสอบหาค่าการไหลแผ่ (Flow Test) ของมอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสม	ปริมาณน้ำ (ลบ.ซม.)	W/B	ระยะเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย	ร้อยละการไหลแผ่ (%)
CFP00	277	0.554	20.68	106.75
CFP05	292	0.556	20.78	107.75
CFP10	307	0.558	21.08	110.75
CFP15	323	0.562	21.05	110.50
CFP20	341	0.568	20.75	107.50
CFP25	358	0.573	20.80	108.00
CFP30	376	0.578	20.63	106.25
CFP35	395	0.585	20.95	109.50
CFP40	415	0.593	20.80	108.00

ตารางผนวกที่ ๑2 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP00

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	287.7	5.11	5.12	5.28	2.08	26.16	3425	130.91	131.81
1	2	287.6	5.08	5.19	5.16	2.11	26.37	3050	115.68	
1	3	288.8	5.19	5.20	5.10	2.10	26.99	3700	137.10	
1	4	287	5.05	5.16	5.12	2.15	26.06	3750	143.91	
1	5	291.1	5.18	5.23	5.15	2.09	27.09	3350	123.66	
1	6	288.1	5.12	5.15	5.14	2.13	26.37	3575	135.58	
3	1	290.6	5.04	5.24	5.18	2.12	26.41	7075	267.90	273.22
3	2	290.9	5.06	5.08	5.07	2.23	25.70	7125	277.19	
3	3	290.2	5.21	5.03	5.09	2.18	26.21	6500	248.03	
3	4	294.6	5.15	5.21	5.19	2.12	26.83	7925	295.36	
3	5	288.3	5.07	5.23	5.00	2.17	26.52	7225	272.48	
3	6	289.7	5.25	5.24	5.09	2.07	27.51	7575	275.35	

ตารางผนวกที่ ๑2 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	295.3	5.08	5.21	5.11	2.18	26.47	9350	353.27	332.67
7	2	299.5	5.10	5.30	5.16	2.15	27.03	8900	329.26	
7	3	289.0	5.02	5.22	5.03	2.19	26.20	8100	302.11	
7	4	289.7	5.04	5.15	5.09	2.19	25.96	8775	338.07	
7	5	300.1	5.09	5.24	5.12	2.20	26.67	9075	340.25	
7	6	296.4	5.09	5.29	5.08	2.17	26.93	8700	323.11	
14	1	295.9	5.06	5.04	5.22	2.22	25.50	8250	323.5	351.71
14	2	294.6	5.06	5.08	5.20	2.20	25.70	7550	293.72	
14	3	299.6	5.10	5.10	5.20	2.22	26.01	9575	368.13	
14	4	297.3	5.15	5.12	5.02	2.25	26.37	9500	360.29	
14	5	302.3	5.17	5.10	5.10	2.25	26.37	9625	365.04	
14	6	300	5.06	5.15	5.23	2.20	26.06	9250	354.96	

ตารางผนวกที่ ๑2 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	301.5	5.17	5.14	5.18	2.19	26.57	10250	385.72	403.22
28	2	296.9	5.12	5.18	5.03	2.23	26.52	12050	454.35	
28	3	286.7	5.12	5.00	5.09	2.20	25.60	10550	412.11	
28	4	294.4	5.12	5.00	5.07	2.27	25.60	11250	439.45	
28	5	286.9	5.15	5.04	5.05	2.19	25.96	9750	375.64	
28	6	297.6	5.13	5.16	5.16	2.18	26.47	9325	352.27	
90	1	300.7	5.08	5.14	5.11	2.25	26.11	12125	464.36	446.82
90	2	301.5	5.10	5.18	5.12	2.23	26.42	11625	440.04	
90	3	301.4	5.12	5.19	5.09	2.23	26.57	12350	464.76	
90	4	306.6	5.11	5.19	5.12	2.26	26.52	11650	439.28	
90	5	301.7	5.14	5.12	5.16	2.22	26.32	11675	443.63	
90	6	302.6	5.1	5.22	5.07	2.24	26.62	10050	377.51	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม
 ทราย = 100 กรัม
 ไม้จิ้มฟัน = 0 กรัม

$W/(C+F+P) = 0.554$
 Flow = 106.75

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP05

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	282.2	5.12	5.14	5.13	2.09	26.32	3675	139.64	139.56
1	2	285.9	5.06	5.19	5.11	2.13	26.26	3675	139.94	
1	3	292.2	5.08	5.26	5.15	2.12	26.72	4000	149.70	
1	4	284.7	5.13	5.09	5.14	2.12	26.11	3825	146.49	
1	5	281.7	5.13	5.17	5.17	2.05	26.52	2825	106.51	
1	6	285.3	5.09	5.15	5.15	2.14	25.91	3425	132.20	
3	1	284.0	5.17	5.14	4.95	2.16	26.57	7575	285.06	294.35
3	2	290.7	5.19	5.17	5.01	2.16	26.83	8250	307.47	
3	3	285.5	5.02	5.19	5.12	2.14	26.05	8025	308.02	
3	4	287.5	5.09	5.20	5.17	2.10	26.47	7725	291.86	
3	5	282.9	5.08	5.13	5.01	2.17	26.06	7950	305.06	
3	6	277.5	5.04	5.28	5.01	2.08	26.61	7150	268.68	

ตารางผนวกที่ 33 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	290.4	5.15	5.06	5.19	2.15	26.06	9175	352.09	345.27
7	2	289.4	5.08	5.22	5.04	2.17	26.52	9250	348.82	
7	3	289.8	5.08	5.11	5.12	2.18	25.96	9675	372.71	
7	4	295.6	5.05	5.33	5.09	2.16	26.92	9075	337.15	
7	5	288.6	5.14	5.09	5.08	2.17	26.16	8975	343.05	
7	6	296.1	5.07	5.31	5.06	2.17	26.92	8775	325.95	
14	1	300.1	5.12	5.2	5.12	2.20	26.62	9750	366.21	363.06
14	2	299.4	5.10	5.16	5.12	2.22	26.32	11325	430.35	
14	3	297.7	5.11	5.17	5.13	2.20	26.42	9650	365.27	
14	4	295.7	5.09	5.15	5.08	2.22	26.21	9375	357.64	
14	5	295.2	5.14	5.17	5.11	2.17	26.57	9650	363.14	
14	6	296.3	5.07	5.06	5.12	2.21	26.16	9350	357.41	

ตารางผนวกที่ 33 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	290.3	5.08	5.13	5.02	2.22	26.06	11150	427.85	431.68
28	2	286.1	4.94	5.27	5.06	2.17	26.03	9250	353.31	
28	3	294.7	5.09	5.14	5.16	2.18	26.16	11775	450.07	
28	4	296.0	5.10	5.22	5.14	2.16	26.62	12575	472.35	
28	5	287.3	5.09	5.22	4.97	2.18	26.57	11375	428.12	
28	6	295.1	5.12	5.13	5.19	2.16	26.27	11050	420.70	
90	1	296.1	5.12	5.17	5.01	2.23	26.47	9675	365.50	460.81
90	2	295.9	5.12	5.13	5.11	2.20	26.27	13050	496.85	
90	3	300.5	5.08	5.19	5.08	2.24	26.37	14250	540.49	
90	4	299.7	5.09	5.14	5.19	2.21	26.16	11875	453.89	
90	5	297.9	5.09	5.14	5.08	2.24	26.16	9650	368.85	
90	6	296.9	5.05	5.11	5.08	2.26	25.81	13600	537.02	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

ถ้ำลอย = 100 กรัม

ถ้ำจี้เลื่อยไม้ยางพารา = 25 กรัม

$W/(C+F+P)$ = 0.556

Flow = 107.75

ตารางผนวกที่ ๓๔ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP10

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	274.9	5.01	5.14	5.18	2.06	25.75	3475	134.94	136.11
1	2	275.7	5.09	5.12	5.08	2.08	26.06	3600	138.14	
1	3	278.9	5.18	5.21	5.03	2.05	26.99	3625	134.32	
1	4	276.9	5.12	5.17	5.00	2.09	26.47	4075	153.95	
1	5	268.3	4.96	5.18	5.02	2.08	25.69	3500	136.22	
1	6	269.1	4.98	5.14	5.08	2.07	25.60	3475	135.76	
3	1	283.1	5.10	5.15	5.11	2.11	26.27	7650	291.26	292.76
3	2	281.2	5.13	5.17	5.04	2.10	26.52	7925	298.81	
3	3	282.8	5.12	5.10	5.05	2.13	26.27	7850	298.87	
3	4	285.4	5.10	5.11	5.17	2.12	26.06	8150	312.73	
3	5	288.0	5.25	5.27	5.08	2.05	27.67	7975	288.24	
3	6	285.1	5.14	5.23	5.11	2.08	26.88	7665	285.13	

ตารางผนวกที่ ๓๔ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	287.9	5.09	5.15	5.14	2.14	26.21	8675	330.94	335.69
7	2	287.3	5.09	5.23	4.98	2.17	26.62	9025	339.02	
7	3	287.3	5.07	5.12	5.17	2.14	25.96	9100	350.56	
7	4	281.0	5.07	5.14	5.08	2.12	26.06	8725	334.81	
7	5	283.6	5.13	5.19	5.04	2.11	26.62	9000	338.03	
7	6	277.7	5.07	5.09	5.05	2.13	25.81	8000	310.00	
14	1	295.8	5.18	5.03	5.21	2.18	26.06	8300	318.55	351.81
14	2	292.9	5.12	5.2	5.08	2.17	26.62	9575	359.64	
14	3	296.2	5.13	5.24	5.10	2.16	26.88	9225	343.18	
14	4	294.8	5.17	5.16	5.13	2.15	26.68	9425	353.30	
14	5	295.2	5.06	5.11	5.23	2.18	25.86	1000	38.67	
14	6	293.6	5.16	5.16	5.06	2.18	26.63	9350	351.17	

ตารางผนวกที่ ๓4 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	285.4	5.16	5.23	5.09	2.08	26.99	8275	306.63	422.55
28	2	296.3	5.06	5.17	5.17	2.19	26.16	11750	449.16	
28	3	283.4	5.05	5.14	5.02	2.17	25.96	11375	438.22	
28	4	297.4	5.11	5.08	5.19	2.21	25.96	9950	383.30	
28	5	294.6	5.23	5.07	5.07	2.19	26.52	11125	419.56	
28	6	284.6	5.03	5.15	5.02	2.19	25.90	11775	454.55	
90	1	297.1	5.07	5.12	5.13	2.23	25.96	13375	515.25	456.96
90	2	288.9	5.06	5.08	5.02	2.24	25.7	10450	406.54	
90	3	291.8	5.02	5.11	5.16	2.20	25.65	9750	380.08	
90	4	295.5	5.09	5.15	5.11	2.21	26.21	10775	411.05	
90	5	294.4	5.06	5.09	5.14	2.24	25.76	12750	495.04	
90	6	297.7	5.09	5.19	5.13	2.20	26.42	13400	507.25	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

 ถั่วลอ่ย = 100 กรัม

 ถั่วจี๋เลื้อยไม้ยางพารา = 50 กรัม

W/(C+F+P) = 0.558

Flow = 110.75

ตารางผนวกที่ ๑๕ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP15

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	277.4	5.07	5.16	5.05	2.10	26.16	3775	144.3	138.36
1	2	276.3	5.13	5.12	5.02	2.10	26.27	3575	136.11	
1	3	276.2	5.22	5.12	5.05	2.05	26.73	3525	131.89	
1	4	276.2	5.08	5.16	5.09	2.07	26.21	3700	141.15	
1	5	278.2	5.06	5.18	5.08	2.09	26.21	3275	124.95	
1	6	278.8	5.04	5.25	5.08	2.07	26.46	3900	147.39	
3	1	279.9	5.12	5.18	5.19	2.03	26.52	7650	288.44	278.45
3	2	279.1	5.09	5.16	5.08	2.09	26.26	7100	270.33	
3	3	278.6	5.09	5.14	5.09	2.09	26.16	7700	294.31	
3	4	273.2	5.13	5.07	5.01	2.10	26.01	6850	263.37	
3	5	275.1	5.07	5.11	5.11	2.08	25.91	7050	272.12	
3	6	277.6	5.09	5.07	5.10	2.11	25.81	7150	277.06	

ตารางผนวกที่ ๓5 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	282.8	5.01	5.22	5.08	2.13	26.15	7000	267.66	312.00
7	2	284.9	5.07	5.34	5.03	2.09	27.07	8275	305.65	
7	3	278.4	5.04	5.19	5.00	2.13	26.16	8225	314.44	
7	4	284.0	5.11	5.19	5.03	2.13	26.52	8425	317.67	
7	5	279.8	5.04	5.18	5.02	2.13	26.11	8100	310.26	
7	6	282.3	4.99	5.27	5.06	2.12	26.30	8725	331.78	
14	1	284.7	5.17	5.08	5.05	2.15	26.26	8375	318.88	325.32
14	2	294.2	5.11	5.23	5.14	2.14	26.73	8875	332.08	
14	3	284.2	5.00	5.23	5.06	2.15	26.15	9000	344.17	
14	4	292.7	5.10	5.27	5.13	2.12	26.88	8475	315.33	
14	5	288.9	5.08	5.20	5.10	2.14	26.42	8850	335.02	
14	6	286.7	5.03	5.22	5.12	2.13	26.26	8275	315.16	

ตารางผนวกที่ ๑๕ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	292.4	5.16	5.03	5.12	2.20	25.95	9425	362.30	353.34
28	2	294.4	5.17	5.09	5.13	2.18	26.32	9650	366.71	
28	3	289.0	5.19	5.24	5.04	2.11	27.20	11275	414.59	
28	4	293.9	5.06	5.19	5.14	2.18	26.26	11175	425.53	
28	5	290.5	5.13	5.16	5.08	2.16	26.47	11400	430.66	
28	6	291.1	5.11	5.08	5.15	2.14	26.47	9250	349.55	
90	1	291.8	5.11	5.17	5.06	2.18	26.42	11725	443.81	423.18
90	2	289.4	5.08	5.10	5.03	2.22	25.91	10100	389.84	
90	3	292.8	5.09	5.18	5.10	2.18	26.37	10700	405.82	
90	4	290.0	5.06	5.11	5.15	2.18	25.86	10975	424.46	
90	5	288.6	5.11	5.06	5.04	2.21	25.86	10825	418.66	
90	6	291.3	5.06	5.15	5.13	2.18	26.06	12000	460.49	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

 ถั่วลอ่ย = 100 กรัม

 ถั่วจี๊เลื้อยไม่ยางพารา = 75 กรัม

W/(C+F+P) = 0.562

Flow = 110.50

ตารางผนวกที่ ๖ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP20

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	282.3	5.08	5.22	5.13	2.08	26.52	3275	123.50	131.82
1	2	277.2	5.09	5.25	5.02	2.07	26.72	3450	129.10	
1	3	281.5	5.19	5.28	5.02	2.05	27.40	3675	134.11	
1	4	277.4	5.08	5.13	5.08	2.10	26.06	3600	138.14	
1	5	279.9	5.08	5.17	5.07	2.10	26.26	3075	117.08	
1	6	277.4	5.07	5.20	5.08	2.07	26.36	3600	136.55	
3	1	283.4	5.16	5.25	5.17	2.02	27.09	7025	259.32	260.75
3	2	278.2	5.06	5.26	5.11	2.05	26.62	6975	262.06	
3	3	277.7	5.13	5.14	5.11	2.06	26.37	7150	271.16	
3	4	274.3	5.03	5.28	5.12	2.02	26.56	6950	261.69	
3	5	281.6	5.14	5.22	5.14	2.04	26.83	6975	259.96	
3	6	265.5	5.01	5.10	5.05	2.06	25.55	6550	256.35	

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	291.91	5.11	5.23	5.06	2.15	26.73	7600	284.37	291.50
7	2	289.5	5.12	5.22	5.08	2.13	26.73	7575	283.43	
7	3	290.8	5.09	5.14	5.04	2.21	26.16	7350	280.94	
7	4	287.8	5.12	5.09	5.08	2.17	26.06	8425	323.28	
7	5	289.1	5.04	5.23	5.13	2.14	26.36	8025	304.45	
7	6	291.5	5.09	5.25	5.12	2.13	26.72	7850	293.76	
14	1	286.8	5.02	5.03	5.25	2.16	25.25	7400	293.06	306.73
14	2	286.6	5.07	5.23	5.12	2.11	26.52	7625	287.56	
14	3	287.0	5.09	5.11	5.15	2.14	26.01	8325	320.07	
14	4	291.1	5.08	5.26	5.06	2.15	26.72	9500	355.53	
14	5	285.1	5.15	5.11	5.13	2.11	26.32	8200	311.59	
14	6	286.5	5.11	5.04	5.22	2.13	25.75	7925	307.71	

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	290.3	5.00	5.16	5.17	2.18	25.80	9550	370.16	352.24
28	2	290.0	5.16	5.15	5.06	2.16	26.57	9325	350.91	
28	3	289.5	5.16	5.10	5.28	2.08	26.32	9025	342.95	
28	4	286.6	5.09	5.11	5.12	2.15	26.01	9375	360.44	
28	5	289.5	5.10	5.17	5.12	2.14	26.37	9352	354.69	
28	6	286.5	5.14	5.07	5.15	2.13	26.06	8550	328.09	
90	1	286.9	5.07	5.18	5.08	2.15	26.26	10000	380.77	381.36
90	2	282.2	5.04	5.14	4.98	2.19	25.91	9625	371.54	
90	3	278.6	4.96	5.10	5.04	2.19	25.30	9625	380.49	
90	4	288.4	5.07	5.09	5.10	2.19	25.81	10000	387.50	
90	5	282.7	5.07	5.14	4.98	2.18	26.06	10050	385.65	
90	6	290.6	5.13	5.11	5.18	2.14	26.21	10450	398.64	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

 ถั่วลอ่ย = 100 กรัม

 ถั่วจี๋เลื้อยไม้ยางพารา = 100 กรัม

W/(C+F+P) = 0.568

Flow = 107.50

ตารางผนวกที่ ๗7 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP25

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	279.4	5.04	5.27	5.08	2.07	26.56	2750	103.54	118.20
1	2	278.7	5.07	5.15	5.02	2.13	26.11	3175	121.60	
1	3	279.9	5.17	5.23	5.04	2.05	27.04	3125	115.57	
1	4	273.9	5.04	5.13	5.09	2.08	25.86	3375	130.53	
1	5	278.6	5.08	5.25	5.09	2.09	26.25	3000	114.29	
1	6	279.0	5.04	5.19	5.11	2.09	26.16	3175	121.38	212.37
3	1	281.6	5.14	5.21	5.15	2.04	26.78	5875	219.39	
3	2	284.2	5.03	5.34	5.11	2.07	26.86	5750	214.07	
3	3	279.4	5.09	5.26	5.15	2.03	26.77	5650	211.03	
3	4	280.4	5.14	5.26	5.12	2.03	27.04	5800	214.53	
3	5	279.4	5.15	5.16	5.13	2.05	26.57	5625	211.67	
3	6	282.6	5.14	5.33	5.09	2.03	27.40	5750	209.88	

ตารางผนวกที่ ๗ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	287.4	5.23	5.16	5.09	2.09	26.99	6275	232.52	230.75
7	2	281.8	5.03	5.19	5.09	2.12	26.11	6025	230.79	
7	3	279.9	5.04	5.30	5.04	2.08	26.71	5675	212.45	
7	4	286.9	5.05	5.32	5.13	2.08	26.87	6125	227.98	
7	5	286.5	5.12	5.31	5.24	2.01	27.19	6300	231.73	
7	6	288.5	5.12	5.32	5.16	2.05	27.24	6725	246.89	
14	1	282.3	4.98	5.08	5.32	2.10	25.30	6900	272.74	264.95
14	2	287.1	5.06	5.13	5.25	2.11	25.96	6775	261.00	
14	3	282.5	5.32	5.16	5.11	2.01	27.45	7475	272.30	
14	4	286.5	5.09	5.09	5.29	2.09	25.91	6575	253.78	
14	5	289.7	5.09	5.17	5.29	2.08	26.32	6275	238.45	
14	6	290.5	5.00	5.21	5.08	2.20	26.05	8900	341.65	

ตารางผนวกที่ ๗ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	284.6	5.12	5.16	5.03	2.14	26.42	7900	299.02	305.56
28	2	284.8	5.14	5.08	5.18	2.11	26.11	8050	308.30	
28	3	280.7	5.11	5.05	5.18	2.10	25.81	7650	296.45	
28	4	284.5	5.11	5.08	5.02	2.18	25.96	8450	325.52	
28	5	287.7	5.08	5.20	5.14	2.12	26.42	7150	270.67	
28	6	279.5	5.08	5.09	5.08	2.13	25.86	8235	318.48	
90	1	280.9	4.95	5.18	5.12	2.14	25.64	7850	306.15	324.24
90	2	281.1	4.95	5.24	5.07	2.14	25.94	8075	311.32	
90	3	290.6	5.12	5.21	5.07	2.15	26.68	9450	354.26	
90	4	285.7	5.16	5.31	4.92	2.12	27.40	9525	347.63	
90	5	285.1	5.04	5.16	5.15	2.13	26.01	6725	258.59	
90	6	287.2	5.08	5.22	5.25	2.06	26.52	8625	325.26	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม
 ทรายละเอียด = 100 กรัม
 ทรายหยาบปานกลาง = 125 กรัม

$W/(C+F+P)$ = 0.573
 Flow = 108.00

ตารางผนวกที่ ๙8 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP30

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	270.1	4.98	5.29	5.01	2.05	26.34	2450	93.00	95.85
1	2	271.1	5.14	5.25	5.60	2.01	26.99	2500	92.64	
1	3	275.4	4.98	5.15	5.14	2.09	25.65	2650	103.33	
1	4	270.7	5.07	5.19	4.99	2.06	26.31	2625	99.76	
1	5	269.7	4.99	5.26	5.12	2.01	26.25	2500	95.25	
1	6	273.0	4.98	5.19	5.05	2.09	25.85	2475	95.76	
3	1	276.5	4.49	5.26	5.18	2.26	23.62	4775	202.18	181.88
3	2	274.9	5.14	5.20	5.04	2.04	26.73	4850	181.46	
3	3	269.5	5.14	5.21	5.14	1.96	26.78	4375	163.37	
3	4	276.8	5.16	5.18	5.11	2.03	26.73	4825	180.52	
3	5	276.2	5.17	5.12	5.04	2.07	26.47	5250	198.33	
3	6	281.4	5.14	5.26	5.12	2.03	27.04	4250	157.20	

ตารางผนวกที่ ๙๘ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	277.2	5.07	5.27	5.12	2.03	26.72	5550	202.72	200.92
7	2	275.5	5.15	5.16	5.01	2.07	26.57	5450	205.09	
7	3	274.8	5.04	5.19	5.01	2.10	25.16	5275	201.66	
7	4	269.7	5.02	5.22	5.00	2.06	26.20	4275	163.14	
7	5	280.2	5.14	5.17	5.09	2.07	26.57	5225	192.62	
7	6	282.3	5.03	5.21	5.11	2.11	26.21	5250	200.33	
14	1	280.3	5.25	5.09	5.06	2.07	26.72	6850	256.34	251.64
14	2	285.7	5.07	5.30	5.12	2.08	26.87	5975	222.36	
14	3	286.1	5.08	5.31	5.16	2.06	26.97	6050	224.28	
14	4	288.6	5.13	5.18	5.13	2.12	26.57	7250	272.83	
14	5	283.4	5.26	5.07	5.16	2.06	26.67	6750	253.11	
14	6	285	5.23	5.03	5.20	2.08	26.31	7475	284.15	

ตารางผนวกที่ ๖8 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	285.7	5.2	5.07	5.15	2.10	26.36	7275	275.94	283.20
28	2	281.3	5.06	5.14	5.13	2.11	26.01	7700	296.06	
28	3	276.5	5.13	5.06	5.04	2.11	25.96	6150	236.92	
28	4	283.4	5.2	5.05	5.12	2.11	26.26	8200	312.26	
28	5	273.8	5.06	5.16	5.04	2.08	26.11	7400	283.42	
28	6	274.4	5.03	5.16	5.05	2.09	25.95	7200	277.41	
90	1	283.7	5.06	5.17	5.08	2.13	26.16	7575	289.56	302.05
90	2	290.4	5.12	5.29	5.08	2.11	27.08	7550	278.75	
90	3	287.5	5.10	5.18	5.09	2.14	26.42	8075	305.66	
90	4	287.3	5.11	5.27	5.10	2.09	26.93	7775	288.71	
90	5	286.8	5.08	5.16	5.11	2.14	26.21	8500	324.27	
90	6	290	5.15	5.21	5.07	2.13	26.83	8725	325.18	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม

 ถั่วลอ่ย = 100 กรัม

 ถั่วจี๊เลื้อยไม้ยางพารา = 150 กรัม

W/(C+F+P) = 0.578

Flow = 106.25

ตารางผนวกที่ ๑๑ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP35

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	263.3	5.16	5.05	5.03	2.01	26.06	2250	86.35	78.21
1	2	262.1	5.05	5.12	4.98	2.04	25.86	1875	72.52	
1	3	268.8	4.99	5.25	4.99	2.06	26.20	2200	83.98	
1	4	268.7	4.99	5.29	5.08	2.00	26.40	2000	75.77	
1	5	272.0	5.26	5.19	5.05	1.98	27.30	2209	80.59	
1	6	263.9	5.09	5.32	5.05	1.93	27.08	1259	46.16	
3	1	266.9	5.06	5.27	5.09	1.97	26.67	3875	145.32	159.93
3	2	274.1	5.09	5.29	5.07	2.01	26.93	4800	178.27	
3	3	267.5	5.06	5.22	5.06	2.00	26.41	4075	154.28	
3	4	271.5	5.08	5.29	5.08	1.99	26.87	4300	160.01	
3	5	271.9	5.07	5.26	5.14	1.98	26.67	3925	147.18	
3	6	271.3	5.02	5.35	5.03	2.01	26.86	4425	164.76	

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	270.5	5.07	5.26	5.09	1.99	26.67	4775	179.05	169.40
7	2	262.5	5.04	5.20	5.21	1.92	26.21	4400	167.89	
7	3	256.4	5.02	5.24	5.12	1.90	26.30	3150	119.75	
7	4	263.2	5.07	5.29	5.06	1.94	26.82	4550	169.65	
7	5	270.8	5.06	5.25	5.15	1.98	26.57	4475	168.45	
7	6	267.7	5.04	5.26	5.12	1.97	26.51	4550	171.63	
14	1	276.4	5.13	5.14	5.26	1.99	26.37	4900	185.83	222.09
14	2	272.7	5.27	5.01	5.04	2.05	26.40	5825	220.62	
14	3	267.0	5.09	5.24	5.14	1.95	26.67	6525	244.64	
14	4	270.2	5.35	5.01	5.10	1.98	26.80	6525	243.44	
14	5	276.6	5.26	5.26	5.08	1.97	27.67	5325	199.69	
14	6	280.1	5.09	5.16	5.13	2.08	26.26	5900	224.64	

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	281.0	5.03	5.13	5.11	2.13	25.80	6250	242.21	237.90
28	2	279.4	5.09	5.26	4.99	2.09	26.77	6150	229.71	
28	3	285.3	5.08	5.14	5.17	2.11	26.11	6250	239.36	
28	4	279.8	5.08	5.22	5.09	2.07	26.52	5400	203.64	
28	5	286.2	5.16	5.12	5.02	2.16	26.42	6450	244.14	
28	6	283.6	5.13	5.15	5.12	2.10	26.42	6350	240.35	
90	1	282.2	5.13	5.18	5.10	2.08	26.57	5250	197.57	262.78
90	2	275.6	5.02	5.23	4.99	2.10	26.25	6000	228.53	
90	3	272.1	5.04	5.14	5.06	2.08	25.91	6050	233.54	
90	4	275.4	5.05	5.14	5.04	2.11	25.96	7750	298.57	
90	5	274.6	5.31	4.99	5.02	2.06	26.50	8350	315.13	
90	6	276.0	5.04	5.14	5.04	2.11	25.91	7325	290.48	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม
 ทรายละเอียด = 100 กรัม
 ทรายหยาบปานกลาง = 175 กรัม

$W/(C+F+P)$ = 0.585
 Flow = 109.50

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CFP40

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
1	1	257.4	5.07	5.14	5.01	1.97	26.06	1700	65.23	67.32
1	2	267.7	5.10	5.21	5.04	2.00	26.57	1725	64.92	
1	3	255.5	5.02	5.21	4.99	1.96	26.15	2075	79.34	
1	4	261.5	5.04	5.21	5.05	1.97	26.26	1575	59.98	
1	5	266.3	5.02	5.17	5.23	1.96	25.95	1825	70.32	
1	6	263.3	4.95	5.21	5.01	2.04	25.79	1775	68.83	
3	1	287.5	5.32	5.21	5.15	2.01	27.52	3500	126.28	132.73
3	2	278.4	5.08	5.28	5.15	2.02	26.82	3950	147.26	
3	3	272.3	5.12	5.32	5.03	1.99	27.24	3925	144.10	
3	4	275.8	5.12	5.35	5.07	1.99	27.39	3750	136.90	
3	5	274.1	5.04	5.26	5.08	2.04	26.51	3125	117.88	
3	6	282.4	5.11	5.34	5.19	1.99	27.29	3375	123.68	

ตารางผนวกที่ ๑10 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
7	1	268.5	5.09	5.23	5.05	2.00	26.62	3750	140.87	142.93
7	2	266.4	5.18	5.24	5.05	1.94	27.14	3825	140.92	
7	3	268.1	5.09	5.19	5.15	1.97	26.42	3825	144.79	
7	4	265.0	5.04	5.30	5.01	1.98	26.71	3900	146.00	
7	5	271.9	5.14	5.25	5.03	2.00	26.99	4025	149.16	
7	6	268.2	5.09	5.31	5.06	1.96	27.03	3775	139.67	
14	1	268.5	5.26	5.23	5.02	1.94	27.51	4600	167.21	169.46
14	2	261.7	5.15	5.03	5.31	1.90	25.90	4425	170.82	
14	3	258.1	5.08	5.12	5.32	1.87	26.01	3800	146.10	
14	4	273.1	5.33	5.12	5.06	1.98	27.29	5600	205.21	
14	5	268.9	5.24	5.12	5.13	1.95	26.83	4600	171.46	
14	6	270.4	5.10	5.27	5.36	1.88	26.88	4525	168.36	

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

Age	No.	Weight (g)	Dimension (cm)			Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average Stress (ksc)
			Width (cm)	Length (m)	Height (cm)					
28	1	277.6	5.06	5.17	5.05	2.10	26.16	4950	189.22	185.75
28	2	286.5	5.11	5.21	5.20	2.07	26.62	5350	200.95	
28	3	285.0	5.13	5.25	5.14	2.06	26.93	4525	168.01	
28	4	281.2	5.17	5.04	5.21	2.07	26.06	3750	143.92	
28	5	282.4	5.14	5.16	5.09	2.09	26.52	5275	198.89	
28	6	278.9	5.18	5.19	5.00	2.07	26.88	5025	186.91	
90	1	279.5	5.04	5.22	5.13	2.07	26.31	5850	222.36	219.06
90	2	281.4	5.11	5.27	5.00	2.09	26.93	5975	221.87	
90	3	281.6	5.12	5.23	5.15	2.04	26.78	5150	192.32	
90	4	286.7	5.25	5.16	5.10	2.08	27.09	6025	222.41	
90	5	279.4	5.17	5.17	5.01	2.09	26.73	5775	216.06	
90	6	281.2	5.02	5.33	5.14	2.04	26.76	5800	216.77	

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ = 400 กรัม
 กล้วย = 100 กรัม
 กล้วยเนื้อไม่ย่างพารา = 200 กรัม

W/(C+F+P) = 0.593
 Flow = 108.00

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์

ชนิด ส่วนผสม	NO.	อายุที่แช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)				
		0 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
CFP00	1	285.10	286.20	283.00	282.10	280.00
	2	277.90	279.90	279.20	278.90	275.30
	3	281.20	283.40	282.30	282.10	279.50
	4	273.00	275.40	274.10	273.60	270.50
	5	276.30	278.60	277.80	277.50	274.50
	6	272.90	275.50	274.70	274.40	271.30
CFP05	1	285.10	287.50	286.30	285.70	283.10
	2	289.10	291.10	290.10	289.80	287.20
	3	284.40	286.60	285.40	284.50	281.90
	4	284.20	286.20	285.20	284.80	281.80
	5	286.00	288.10	287.10	286.50	283.50
	6	292.20	294.00	293.20	292.90	290.10
CFP10	1	280.60	282.80	282.60	282.20	279.30
	2	283.20	284.70	283.90	282.40	279.50
	3	282.20	283.60	283.30	282.80	280.60
	4	286.90	288.60	288.30	288.30	285.40
	5	287.30	289.50	288.90	288.90	286.60
	6	283.10	284.50	283.40	282.60	279.10
CFP15	1	275.20	277.10	276.60	275.90	273.20
	2	271.20	273.50	273.00	272.70	270.20
	3	274.20	276.40	275.70	274.90	272.40
	4	279.00	281.20	280.10	279.70	277.40
	5	282.10	283.70	283.30	282.80	280.30
	6	270.90	272.80	271.90	271.30	267.30

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชนิด ส่วนผสม	NO.	อายุที่แช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)				
		0 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
CFP20	1	279.10	280.80	280.30	279.90	276.60
	2	283.20	285.10	284.40	284.30	281.90
	3	291.50	293.00	292.20	292.00	289.60
	4	288.90	290.60	290.00	289.60	286.60
	5	283.10	285.10	284.30	283.60	280.70
	6	283.20	284.30	284.00	283.70	280.90
CFP25	1	283.50	285.60	285.00	284.80	282.20
	2	285.10	286.80	286.30	285.90	282.50
	3	280.00	281.70	280.60	280.40	277.50
	4	280.90	282.70	282.20	282.10	278.90
	5	280.50	282.10	281.30	280.90	278.40
	6	279.80	281.70	281.30	280.70	277.60
CFP30	1	283.80	285.70	285.20	284.70	282.40
	2	288.50	290.70	290.40	290.10	287.30
	3	288.50	290.30	289.40	289.00	286.30
	4	290.30	292.30	291.50	291.30	289.20
	5	283.80	285.60	284.90	284.40	282.20
	6	285.30	287.40	286.70	286.50	284.10
CFP35	1	283.80	286.10	285.40	285.30	282.90
	2	284.10	286.90	286.80	286.20	284.10
	3	271.30	274.20	273.60	273.20	271.20
	4	286.50	289.00	288.80	288.80	285.70
	5	286.60	288.80	288.40	287.90	285.40
	6	281.00	283.00	282.40	282.20	280.70

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ชนิด ส่วนผสม	NO.	อายุที่แช่ในกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)				
		0 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
CFP40	1	281.40	283.10	282.70	282.40	280.00
	2	272.00	273.90	273.90	273.30	270.90
	3	281.90	284.50	284.30	283.80	281.90
	4	281.20	289.30	289.10	289.00	286.90
	5	276.10	278.50	278.10	278.10	277.80
	6	284.70	286.70	286.20	286.10	283.80

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	สราวุธ เทศศิริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 มกราคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดนครนายก
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรโยธา 3
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ส่วนบริหารและควบคุมน้ำหนัทยานพาหนะ สำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	- ร่วมออกแบบอาคารและโรงงาน โครงการ SCC NEW FACTORY พื้นที่ใช้สอย 43,000 ตร.ม. - ร่วมออกแบบอาคารโรงงาน โครงการ TOSTEM THAI พื้นที่ใช้สอย 50,000 ตร.ม. - ร่วมออกแบบอาคารโรงงาน โครงการ AGT EXTENSION OF BUILDING พื้นที่ใช้สอย 10,000 ตร.ม.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-