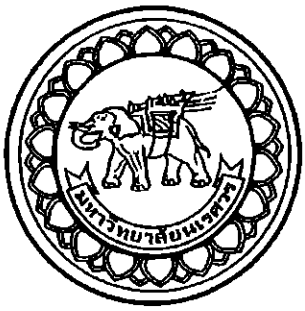


# อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิก้าฟูมและซิลิก้าฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าในระยะยาว

# Examining the roles of Fly Ash, Carbon Particle, Silica Fume and Surface Modified Silica Fume on Compressive Strength of Mortar In the Long term

นายศุภกร เลิศแตง รหัส 51380279

บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 7 ส.ค. 2556
เลขทะเบียน 16337424
เลขเรียกหนังสือ ปร. ศ1750 2555
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2555

# ใบรับรองปริญญานิพนธ์

**ชื่อหัวข้อโครงงาน** อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าในระยะยาว

**ผู้ดำเนินโครงงาน** นายศุภกร เลิศแตง รหัส 51380279

**ที่ปรึกษาโครงงาน** ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์

ว่าที่ร้อยตรี นันธวัฒน์ เบอะเทพ

**สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา

**ภาควิชา** วิศวกรรมโยธา

**ปีการศึกษา** 2555

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ภัคพงศ์ หอมเนียม)

| | |
|---|---|
| **ชื่อหัวข้อโครงงาน** | อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าในระยะยาว |
| **ผู้ดำเนินโครงงาน** | นายศุภกร เลิศแตง รหัส 51380279 |
| **ที่ปรึกษาโครงงาน** | ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์<br>ว่าที่ร้อยตรี นันธวัฒน์ เบอะเทพ |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมโยธา |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมโยธา |
| **ปีการศึกษา** | 2555 |


## บทคัดย่อ

โครงงานนี้ศึกษาผลของการของการแทนที่ซีเมนต์ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูม และซิลิกาฟูมที่ไม่ชอบน้ำ ในปริมาณ 0-20% (โดยน้ำหนักซีเมนต์) ที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า รูปทรงลูกบาศกขนาด 5*5*5 เซนติเมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และการแทนที่ โดยแบ่งปัจจัยการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ ผลของวัสดุผสมเพิ่ม ผลของเคมีพื้นผิวของซิลิก้าฟูม และผลของความพรุนของแร่ผสมเพิ่ม ที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า จากการทดสอบพบว่าแร่ผสมเพิ่มที่ให้กำลังอัดในระยะยาวสูงสุด คือ ซิลิก้าฟูม เนื่องจากจะช่วยลดความพรุนและทำให้เพิ่มความทึบให้กับซีเมนต์มอร์ต้า การศึกษาผลของเคมีพื้นผิวของซิลิก้าฟูมพบว่าส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิก้าฟูมที่ไม่ชอบน้ำ ที่ 1% ให้กำลังอัดที่ 90 วันสูงที่สุด ในส่วนของผลของความพรุนของถ่าน ที่ความพรุนต่ำให้ค่ากำลังอัดที่ 90 วันมีกำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าความพรุนของวัสดุผสมเพิ่มมีผลทางลบต่อกำลังอัด เมื่อมีความพรุนมาก ทำให้กำลังอัดลดลง

| | |
|---|---|
| **Project title** | Examining the roles of Fly Ash, Carbon Particle, Silica Fume and Surface Modified Silica Fume on Compressive Strength of Mortar and Setting Time of Cement Paste |
| **Name** | Mr.Supakon lardthang ID. 51380279 |
| **Project advisor** | Dr. Thanapon Phenrat |
| | Acting Sub Lt.Nanthawat Boethep |
| **Major** | Civil Engineering |
| **Department** | Civil Engineering |
| **Academic year** | 2011 |

.....


## Abstract

This senior project evaluated the effect of mineral admixtures on long term compressive strength of cement mortar. The mineral admixtures evaluated here included fly ash, activated carbon, silica fume, and hydrophobic silica fume at the replacement ratio of 0-20% by the weight of cement. The cement mortar matrices at the size 5*5*5 $cm^3$ and at the water-to-binder ratio of 0.35 were used in this study. Three major parameters evaluated here are 1) effect of mineral admixture type, 2) hydrophobicity of silica fume, and 3) porosity of admixtures. Based on three different types of admixtures, silica fume yielded the highest long term compressive strength, presumably due to micro filling effect via silica addition which decreases porosity of the mortar matrix. As for the surface chemistry effect, the replacement of cement with 1% hydrophobic silica fume increased compressive strength while the addition of 2% resulted in the opposite. Last but not least, the addition of mineral admixtures with high porosity such as highly porous activated carbon decreased the compressive strength at 90 days. This suggests that porosity of mineral admixtures can cause adverse effect on the compressive of mortar matrices.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรม ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ และพี่ป.โทที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินโครงการ ตลอดจนจัดหาเครื่องมือปฏิบัติงานต่างๆและสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงงานให้คณะผู้จัดทำโครงงาน พร้อมทั้งเสียสละเวลาของท่านมาควบคุมดูแลให้คำแนะนำ สั่งสอน การปฏิบัติงานโครงงานของคณะผู้จัดทำอย่างดีเยี่ยม

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณครูช่างทุกท่าน ที่ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือดำเนินโครงงาน อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อการใช้สถานที่ในการปฏิบัติงานโครงงาน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อุปการคุณด้านการเงินและให้กำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆชาววิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้ยืมเครื่องมืออุปกรณ์ในการปฏิบัติงานบางอย่างและช่วยปฏิบัติงานโครงงานรวมถึงให้กำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จ

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นาย ศุภกร เลิศแตง
วันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ.2555

# สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ค
กิตติกรรมประกาศ.....ง
สารบัญ.....จ
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ช

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน.....2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....3
1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน.....3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....4
2.1 ปูนซีเมนต์.....4
2.2 วัสดุผสมเพิ่ม.....4
2.3 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า.....9

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน.....10
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....10
3.2 การเตรียมการทดสอบ.....17
3.3 การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า.....21

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....23

4.1 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังของซีเมนต์มอร์ต้า.....23

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....30

5.1 สรุปผล.....30

5.2 ข้อเสนอแนะ.....31

บรรณานุกรม.....32

ภาคผนวก.....34

## สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินการ.....3

2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์-เถ้าลอย-และซิลิกาฟูม.....6

ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....8

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618.....8

องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544.....9

องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซิลิก้าฟูมและสมบัติของวัสดุ.....15

3.1 อัตราส่วนผสมของการหาค่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า.....20

# สารบัญรูป


รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะของซิลิกาฟูม....5

2.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์....7

3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ....10

3.2 กล่องเก็บปูนซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น....10

3.3 ทรายที่เตรียมไว้....11

3.4 ทรายเปียก....11

3.5 การการนำทรายมากตากไว้ในที่ร่ม....11

3.6 ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง....11

3.7 ทำการร่อนทรายด้วยตระแกรงเบอร์14 ....12

3.8 การเก็บตัวอย่างทรายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น....12

3.9 ถ่านครัวเรือน....13

3.10 ถ่านกัมมันต์ C2 ....13

3.11 ถ่านกัมมันต์ C1 ....13

3.12 การตำถ่านให้ให้ละเอียด....13

3.13 ร่อนถ่านด้วยตระแกรงเบอร์ 200....13

3.14 การปรับความชื้นถ่าน....14

3.15 การชั่งน้ำหนักถ่าน....14

3.16 การเก็บรักษาถ่านที่ปรับความชื้นแล้ว....14

3.17 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของถ่าน....14

3.18 ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา....15

3.19 ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume )....16

3.20 ซิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume)....16

3.21 อนุภาคของเถ้าลอย....17

3.22 เถ้าลอยชนิด c แม่เมาะ....17

3.23 การเตรียมวัสดุที่จะผสม....18

3.24 การคลุกเคล้าส่วนผสม....18

3.25 การเทส่วนผสม....18

3.26 การเทน้ำลงไปในส่วนผสม....18

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.27 การผสมมือเป็นเวลา 15 วินาที....19

3.28 นำซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเสร็จมาใส่แบบ....19

3.29 การสั่นซีเมนต์เพื่อไล่ฟองอากาศ....19

3.30 การปิดห่อแบบหล่อด้วยพลาสติก....19

3.31 การบ่มก้อนมอร์ต้าตลอด 28 วัน....19

3.32 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง....21

3.33 วัดขนาดด้วยเวเนียร์....21

3.34 เครื่องทดสอบกำลังอัด....22

3.35 ขณะทำการกดก้อนตัวอย่าง....22

3.36 ก้อนตัวอย่างหลังการอัด....22

4.1 กราฟแสดงผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนมอร์ต้า....23

4.2 กราฟแสดงผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า....25

4.3 กราฟแสดงผลของถ่านที่มีความพรุนต่างกันต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า....27

# บทที่ 1

# บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายโดย เนื่องด้วยมีจุดเด่นในหลายๆด้านไม่ว่าจะเป็น วัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน ง่ายต่อการขึ้นรูป อีกทั้งมีวางจำหน่ายตามท้องตลาด ซึ่งทำให้คนทุกระดับสามารถซื้อได้ในราคาที่ไม่แพงมากนัก คอนกรีตจึงเจาะตลาดและได้รับความนิยมสูงมาก ในระยะเวลาเพียงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้การผลิตปูนซีเมนต์นั้นเพิ่มขึ้นตามความต้องการไปด้วยซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นยังส่งผลกระทบต่อทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในระดับหนึ่งซึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกจึงทำให้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงเพื่อเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ดังที่กล่าวมาขั้นต้นการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์และธรรมชาติจึงได้นำไปสู่การศึกษาและค้นคว้าเพื่อหาวัสดุของเสียจากธรรมชาติหรือกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำเอาวัสดุเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืนและลดปัญหามลพิษ โดยการศึกษาจะนำเอากากของเสียมาใช้เพื่อพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ 1) ถ่านซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ 2) ซิลิกาฟูมมาศึกษาด้วยโดยซิลิกาฟูมซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม ในการศึกษาจะทำการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า โดยส่วนผสมจะทำการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้ได้มากที่สุด จากการแทนที่ด้วยวัสดุจากกากของเสียในขั้นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ถ่าน เถ้าลอย และซิลิกาฟูม

## 1.3 ประโยชน์ที่ควาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ช่วยให้ให้ทราบการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วย ถ่าน เถ้าลอย และซิลิกาฟูม

1.3.2 สามารถนำความรู้ที่ได้เป็นแนวทางในการนำกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

## 1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

การศึกษาในโครงงานจะศึกษาถึงผลของกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าโดยมีความแตกต่างกันของคุณสมบัติพื้นผิวและความพรุนของวัสดุผสมเพิ่ม วัสดุที่เลือกทดสอบ คือ ซิลิกาฟูม ถ่านกัมมันต์ และเถ้าลอยโดยได้มีการกำหนดขอบเขตการทำโครงงานไว้ดังนี้

1.4.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสาน (w/b = 0.35)

1.4.2 ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (r = 20-50%)

1.4.3 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม (Si = 8-20%)

1.4.4 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมชนิดไฮโดรฟิลิก (SiHL = 0-2%)

1.4.5 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมชนิดไฮโดรโฟรบิก (SiHB = 0-2%)

1.4.6 ปริมาณการแทนที่ด้วยถ่านกัมมันต์ (AC = 20-50%)

1.4.7 ทดสอบที่อุณหภูมิ 28 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

| เดือน / กิจกรรม | พฤศจิกายน | | | | ธันวาคม | | | | มกราคม | | | | กุมภาพันธ์ | | | | มีนาคม | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. การศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. เตรียมวัสดุ การทดลอง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. ทำการทดลองและบันทึกผล | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. จัดทำรายงานวิจัยและนำเสนอ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

## 1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. | ค่าวัสดุสำนักงาน | 1,000 | บาท |
| 2. | ค่าวัสดุสนาม/ในห้องปฏิบัติการ | 1,000 | บาท |
| 3. | ค่าถ่ายเอกสารและเข้ารูปเล่ม | 1,000 | บาท |
| | **รวมเป็นเงิน** | **3,000** | **บาท (สามพันบาทถ้วน)** |

**หมายเหตุ**

# บทที่ 2
# หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

จากอดีตกาลที่ผ่านมาจะพอทราบกันดีอยู่แล้วว่ามีการนำคอนกรีตมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ นานา ทั้งที่เห็นเป็นโบราณสถานปรากฏและไม่ปรากฏ พอที่จะทำให้เราทราบดีว่า บรรพบุรุษของมนุษย์เป็นเผ่าพันธุ์ที่ฉลาดมาก ที่มีการคิดค้นและสังเกตสิ่งรอบข้าง แล้วนำมาดัดแปลงและประยุกต์เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ทำให้มีความเจริญก้าวหน้าอันส่งผลต่อความสะดวกสบายในการดำเนินชีวิตของเรา สังเกตได้จากพัฒนาการของการในงานคอนกรีตจากอดีตสู่ปัจจุบัน มีการพัฒนาเพื่อให้เกิดการใช้งานวัสดุที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อให้เกิดความคุมค่าและประโยชน์อันสูงสุดต่อไป

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าด้วยหลายๆปัจจัย บนโลกนี้มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางด้านลบเมื่อเปรียบเทียบกับอดีต จึงมีนักวิจัยหลายหลายท่านเล็งเห็นความสำคัญของการใช้วัสดุที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยให้ความสนใจและคิดค้นเพื่อเปลี่ยนแปลงการใช้งานเพื่อที่จะทำให้เกิดความคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด จึงมีการคิดค้นที่จะนำวัสดุจากกากของเสียนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง จากแนวความคิดดังกล่าวทีมร่วมวิจัยจึงตะหนักและให้ความสำคัญ โดยทำการนำวัสดุจากกากของเสียมาทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อต่อยอดการศึกษาสู่การนำกากของเสียทั้ง ถ่านและซิลิก้าฟูมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างโดยศึกษาการใช้ร่วมกับซีเมนต์มอร์ต้าส่วนรายละเอียดจะกล่าวในบทต่อไป

## 2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นสารประกอบหลายๆตัวที่ถูกนำไปเผาและถูกบดให้ละเอียดในอัตราส่วนที่เหมาะสม จนสามารถนำมาใช้งานได้อย่างง่ายดาย เมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และหากทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการแข็งตัวมีลักษณะคล้ายหินด้วยเหตุนี้จึงถูกนำมาใช้งานกันอย่างแผ่หลาย ปูนซีเมนต์สามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด ตามมาตรฐาน มอก. 15 แบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามการใช้งาน อันประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เร่งกำลังอัด ความร้อนต่ำ และทนซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งจะมีส่วนผสมที่ใช้แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของงานที่ใช้

## 2.2 วัสดุผสมเพิ่ม

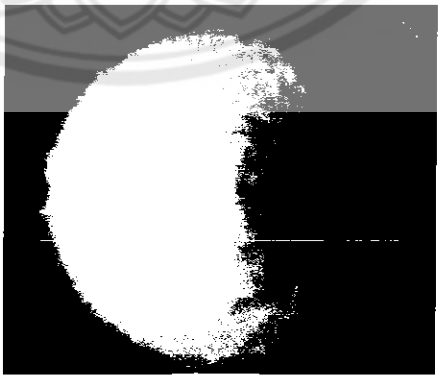
วัสดุผสมเพิ่มส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการให้กับซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า หรือคอนกรีต มีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญคือ ซิลิกา($SiO_2$) และอลูมิน่า($Al_2O_3$) อันเป็นคุณสมบัติเด่นของวัสดุประเภทนี้ โดยสารประกอบเหล่านี้มีส่วนในทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพอีกด้วย

ในการทดสอบมุ่งศึกษาสมบัติของวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิก้าฟูม (Silica Fume), เถ้าลอย (Fly Ash) และ ถ่าน (Carbon) ต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

**2.2.1 ซิลิกาฟูม**

ซิลิกาฟูมจัดว่าเป็นแร่ผสมเพิ่ม เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metalและ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 °C ทำให้เกิดไอของ SiO ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ และกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำและถูกดักจับไว้เพื่อนำไปใช้งานต่อไป ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงที่มีความละเอียดสูงมาก อาจจะมีขนาดเล็กในระดับ ไมโครเมตร หรือนาโนเมตรก็เป็นไปได้

การใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างไปนิยมใช้งานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต ดังเช่น การปรับปรุงสมบัติการทึบน้ำ การเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้น และอีกต่างๆมากมาย เต่ในปัจจุบันได้มีการนำซิลิก้าฟูมมาใช้ในงานคอนกรีตมากที่จะเพิ่มสูงขึ้นอีกในอนาคต แต่ในอุตหากรรมการผลิตและจำหน่ายซิลิก้าฟูมก็ไม่หยุดยั้งและปรับปรุงสินค้าไว้เพี่ยงเท่านี้โดยมีการพัฒนาซิลิก้าฟูมในรูปแบบต่างๆเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานของลูกค้า ดังตัวอย่างสินค้าของซิลิก้าฟูมที่มีความแตกต่างทางปริมาณของสารประกอบ ความแตกต่างทางขนาดและความละเอียดเป็นต้น แต่ในการศึกษาเลือกใช้ซิลิก้าฟูมที่มีความแตกต่างทางพื้นผิว ประกอบด้วย ซิลิก้าที่ปรับปรุงเคมีพื้นผิวให้มีความชอบน้ำและเคมีพื้นผิวไม่ไม่ชอบสัมผัสกัยบน้ำ ซึ่งเรียกว่า ซิลิก้าฟูมเคมีพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume) พื้นผิวนั้นจะชอบที่จะสัมผัสกับน้ำ มีมุมการสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา ซิลิก้าฟูมเคมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume) จะมีลักษณะจะหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ โดยจะพยายามสัมผัสน้ำให้น้อยที่สุด สังเกตจากเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำ มุมของการสัมผัสระหว่างซิลิก้าฟูมกับน้ำจะมีค่ามากกว่า 90 องศา อาจเห็นได้จากปรากฏการณ์ น้ำกลิ้งบนใบบอน



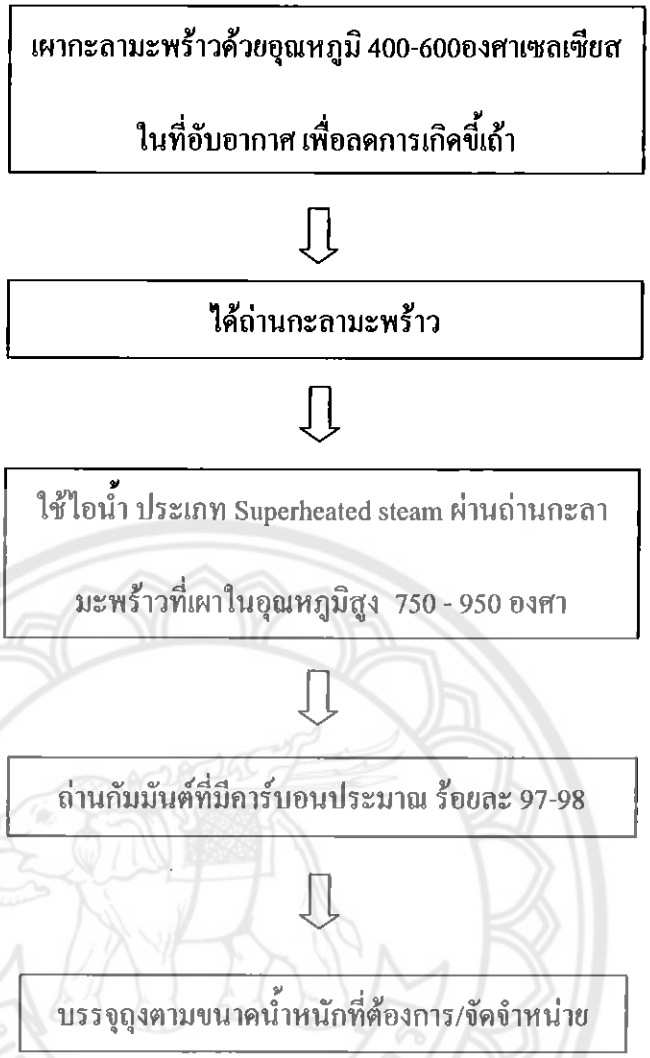
**รูปที่ 2.1 ลักษณะของซิลิกาฟูม**

**2.2.2 ถ่าน (Carbon)**

ถ่าน โดยปกติแล้วเราจะพบเห็นมากในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง องค์ประกอบหลักๆของถ่านก็จะประกอบด้วย ธาตุคาร์บอนเป็นหลัก ในการศึกษาเลือกใช้ถ่าน 2 ชนิด ที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันมาใช้ในการศึกษาคือ ถ่านก้นครัวหรือถ่านที่พบได้ทั่วไปตามตลาดทั่วๆไป และถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เนื่องด้วยมีความแตกต่างทางกรรมวิธีและกระบวนการผลิต ผลลัพธ์คือถ่านที่ได้จากการเผาและอัดแรงดันที่อุณหภูมิสูงๆความพรุนสูงมากกว่า

**ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, เถ้าลอย และซิลิกาฟูม**

| ออกไซด์ | ปูนซีเมนต์ประเภท I | เถ้าลอย | ซิลิกาฟูม |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 20 | 48 | 92 |
| $Al_2O_3$ | 5 | 26 | 0.7 |
| $Fe_2O_3$ | 3 | 10 | 1.2 |
| CaO | 60 | 5 | 0.2 |
| MgO | 1.1 | 2 | 0.2 |
| $SO_3$ | 2.4 | 1.7 | - |
| ออกไซด์อื่นๆ | 1.5 | 1.3 | 2.6 |
| LOI. | 2 | 3 | - |




**รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์**

**2.2.3 เถ้าลอย (Fly Ash)**

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ในกระบวนการนี้จะใช้ถ่านหินที่บดละเอียดและผสมในอัตราส่วนที่ต้องการ ก่อนจะถูกเผาเพื่อต้มน้ำและหมุนไดนาโมทำให้ได้กระแสไฟฟ้า ผลผลิตจากกระบวนการผลิตกระเสไฟฟ้าจะเรียกว่ากากของเสีย แบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ เถ้าก้นเตา(Bottom ash) และเถ้าลอย(Fly ash) แต่ในที่นี้กล่าวถึงเถ้าลอย(Fly ash) คือส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย หลังจากนั้นจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน อันจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบๆบริเวณโรงไฟฟ้า

**2.2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย**

เถ้าลอยออกเป็น 3 ชนิด

1. ชนิด N (Class N) เถ้าลอยหรือวัสดุปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ไม่ต้องปรับปรุงหรือไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพก็ได้ เช่น หินพัมมิไซด์ (Pumicite) หินโอปอลไลด์ (Opaline) หินเชิร์ท(Cherts) และหินเชลล์ (Shale) และเถ้าภูเขาไฟ สารปอซโซลานธรรมชาติบางชนิดเมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 500-1,100 องศาเซลเซียส จะทำให้ความไวในกาเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

2. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซด์ และบิทูมินัสปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, $SiO_2$) อลูมินา (Alumina, $Al_2O_3$ ) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide, $Fe_2O_3$) มากว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.5-2.6 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311

**ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618**

| ข้อกำหนดทางเคมี | ชนิด | | |
|---|---|---|---|
| | N | F | C |
| $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ อย่างต่ำร้อยละ | 70.0 | 70.0 | 50.0 |
| $SiO_3$ อย่างสูง, ร้อยละ | 4.0 | 5.0 | 5.0 |
| ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), สูงสุดร้อยละ | 10.0 | 6.0 | 6.0 |

หมายเหตุ สารปอซโซลานชนิด N (Class N) เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

**ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618**

| ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม | ชนิด | | |
|---|---|---|---|
| | N | F | C |
| ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na2O, ร้อยละ | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

หมายเหตุ ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลไม่เกินกำหนด

3. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับ $Al_2O_3$ มาจากดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี $Al_2O_3$ ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากจะมี $SiO_2$ ต่ำแล้วยังมี $Al_2O_3$ ต่ำด้วย ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยสามารถทำการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C188

**ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544**

| ปี พ.ศ. | องค์ประกอบทางเคมี, % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $SO_3$ | LOI |
| 2528 | 12.0 | 5.9 | 17.3 | 39.5 | 4.6 | 2.0 | 0.8 | 11.5 | 6.3 |
| 2533 | 37.8 | 20.5 | 14.2 | 17.4 | 3.3 | 0.9 | 2.1 | 3.9 | 0.8 |
| 2535 | 40.3 | 24.0 | 15.0 | 11.2 | 2.8 | 1.0 | 2.6 | 3.1 | 0.5 |
| 2540 | 41.5 | 28.1 | 12.3 | 10.0 | 1.2 | 0.6 | 3.3 | 2.0 | 0.8 |
| 2544 | 39.9 | 18.1 | 13.6 | 17.2 | 2.4 | 1.3 | 2.7 | 1.5 | 0.1 |

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2$ + $Al_2O_3$ + $Fe_2O_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80 – 90 ดังนั้น จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ $SiO_2$ และ $Al_2O_3$ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน

## 2.3 กำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า

กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า คือความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าโดยมีหลายๆ ปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องดังเช่น ส่วนผสม สภาพแวดล้อมการบ่มเป็นต้น แต่มีหลายการศึกษาได้กล่าวไว้ว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม เนื่องจากน้ำทำให้เพิ่มความพรุนในเนื้อของซีเมนต์มอร์ต้า(Abrahum) นั่นเอง โดยที่ปัจจัยเหล่านี้ดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นหากสามารถลดตัวแปรได้ก็จะสามารถทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นได้

ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลทำให้กำลังอัดลดลง

1.ความสะอาดของน้ำที่ใช้ในการผสม

2.ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/b) สูง

3.ปูนซีเมนต์เสื่อมสภาพ

4.มวลรวมไม่สะอาด เป็นต้น

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินโครงการ

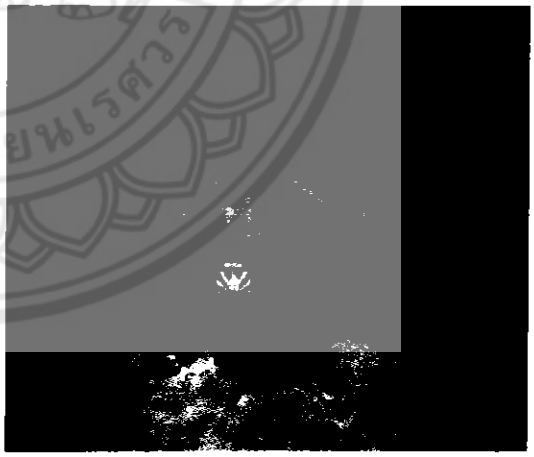
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและวิธีการดำเนินโครงการของการศึกษาผลของกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย ถ่าน และซิลิกาฟูม โดยจะแบ่งรายละเอียดของการดำเนินโครงการออกเป็นหัวข้อดังนี้ การดำเนินงานด้านการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา การดำเนินงานด้านการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ และการดำเนินงานด้านวิธีการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

## 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(ตราช้าง)ดังรูปที่ [3.1] ผลิตโดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด(ลำปาง) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 151 เล่ม 2547 และตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C150 TYPE 1 ทำการเก็บรักษาโดยนำปูนซีเมนต์มาเก็บใส่ไว้ในกล่องพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นดังรูปที่ [3.2]

**รูปที่ 3.1** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

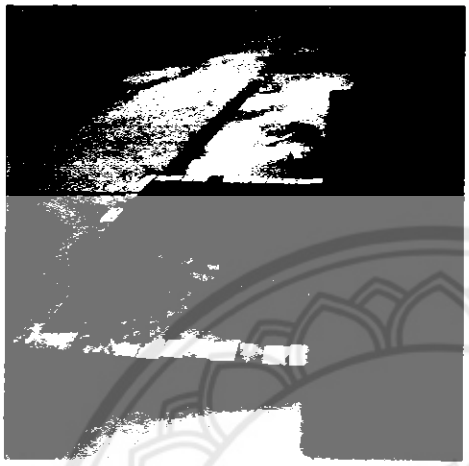


**รูปที่ 3.2** กล่องเก็บปูนซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น

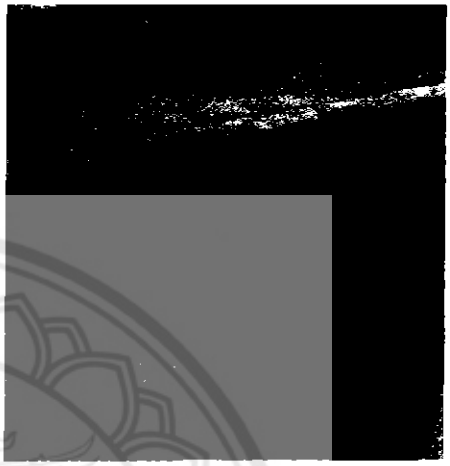
### 3.1.2 ทราย

ทรายที่ใช้ในการศึกษาและทดลองเป็นทรายแม่น้ำ จากอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ทำการทดสอบคุณสมบัติ เช่น การหาโมดูลัสความละเอียด ขนาดคละ และค่าการดูดซึมน้ำ เป็นต้น แต่ก่อนนำให้

งานต้องมีการปรับความชื้นก่อนนำไปใช้งานโดยนำทรายพึ่งในร่ม(กรณีทรายเปียก) หรือเติมน้ำ(กรณีทรายแห้ง)เพื่อให้ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง อาจตรวจเช็กค์ขั้นต้นการคั่วด้วยไฟ และตรวจสอบอีกครั้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเก็บรักษาความชื้นในถังปิด โดยค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จากการทดสอบคือ 2.56 (ภาคผนวก ก.)



รูปที่ 3.3 ทรายที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.4 ทรายเปียก

**รูปที่ 3.5** การนำทรายมากตากไว้ในที่ร่ม

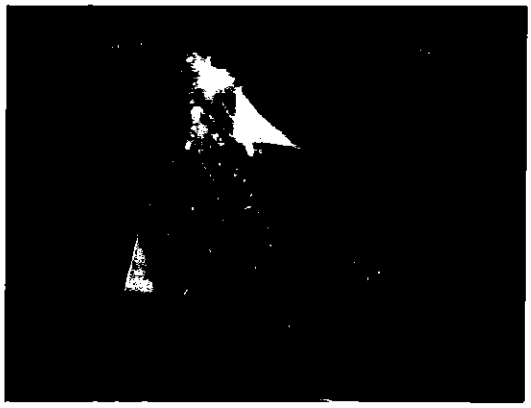
**รูปที่ 3.6** ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

รูปที่ 3.7 ทำการร่อนทรายด้วยตระแกรงเบอร์14

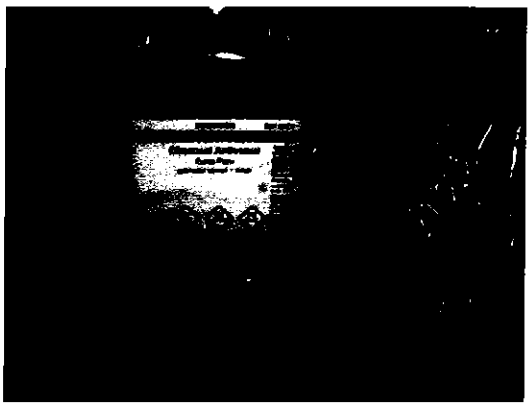
รูปที่ 3.8 การเก็บตัวอย่างทรายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

**3.1.3 ถ่าน (Activated Carbon)**

ในการศึกษาเราจะใช้ถ่านที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ประกอบด้วยถ่านที่ใช้ในครัวเรือน ถ่านกัมมันต์ C1 และ ถ่านกำมันต์ C2 เนื่องจากถ่านที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในลักษณะเป็นก้อนจึงจะต้องทำให้เป็นถ่านมีลักษณะเป็นผงโดยนำถ่านมาตำให้ละเอียดโดยใช้ครกประมาณ 3-5 นาที หลังจากนั้นนำถ่านที่ตำละเอียดมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 แล้วทำการปรับความชื้นพร้อมทำการปรับความชื้นให้ถ่านโดยการฉีดพรมน้ำให้ชุ่มและทำการชั่งน้ำหนักวันต่อวันจนค่าน้ำหนักคงที่เพื่อให้ถ่านอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งแล้วจึงเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นก่อนการนำไปใช้งานต่อไป



**รูปที่ 3.9** ถ่านครัวเรือน

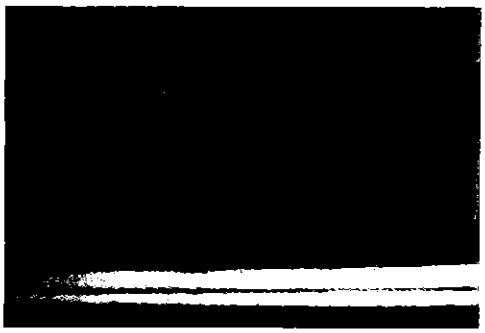


**รูปที่ 3.10** ถ่านกัมมันต์ชนิด C2

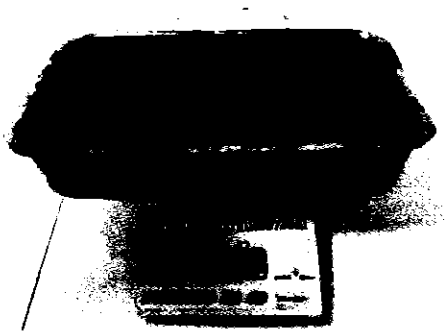
**รูปที่ 3.11** ถ่านกัมมันต์ชนิด C1

**รูปที่ 3.12** การตำถ่านให้ให้ละเอียด

**รูปที่ 3.13** ร่อนถ่านด้วยตระแกรงเบอร์ 200

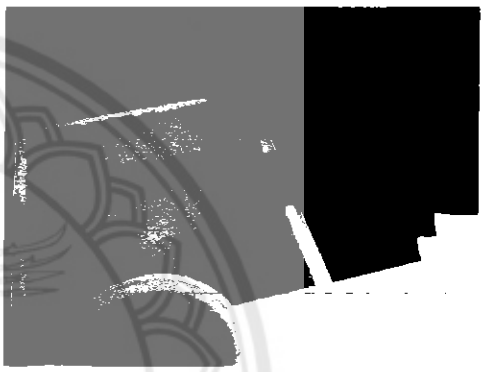


**รูปที่ 3.14** การปรับความชื้นถ่าน



**รูปที่ 3.15** การชั่งน้ำหนักถ่าน

**รูปที่ 3.16** การเก็บรักษาถ่านที่ปรับความชื้นแล้ว



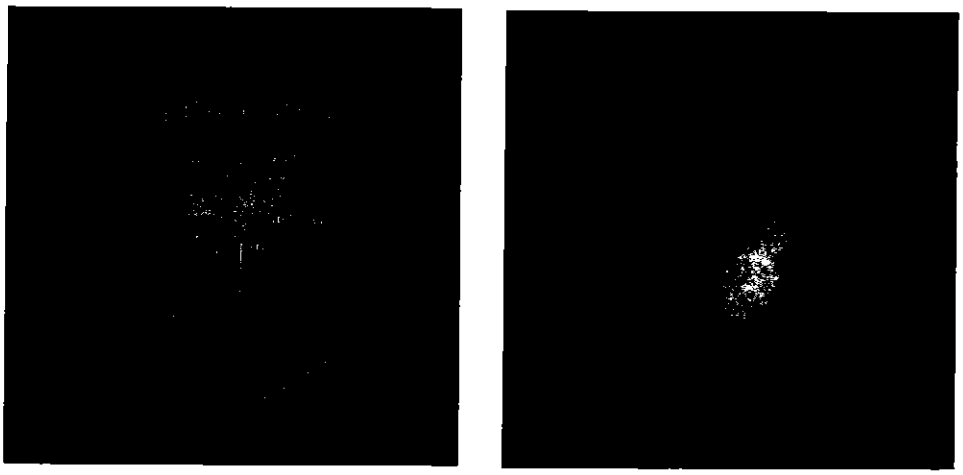
**รูปที่ 3.17** การหาค่าความถ่วงจำเพาะของถ่าน

### 3.1.4 ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

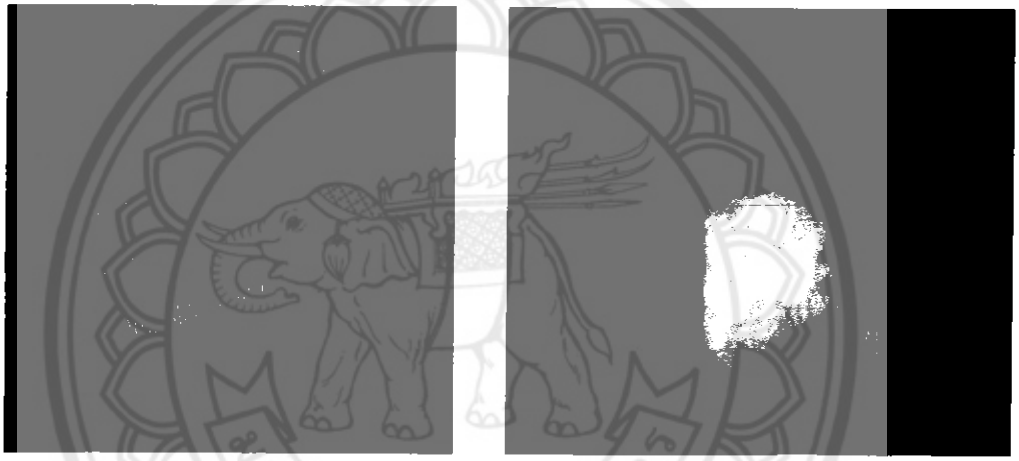
ซิลิกาฟูมที่ใช้ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ชนิดคือ ซิลิกาฟูมแบบธรรมดาซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีเทา ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume) มีลักษณะเป็นเม็ดฝุ่นสีขาวและ ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume) ลักษณะเป็นเม็ดฝุ่นสีขาว ซิลิก้าฟูมสองชนิดหลังมีขนาดเล็กมาก ถึงกับระดับนาโนเมตร สมบัติของวัสดุ แสดงในตารางด้านล่างนี้ ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่ายังเป็นวัสดุที่ใหม่สำหรับการใช้งานในคอนกรีต ซึ่งต้องมีการศึกษาและค้นคว้ากันต่อไป เพื่อนำไปสู่การใช้งานในอนาคต

| Properties,Unit | r200(SiHL) | R975(SiHB) |
|---|---|---|
| Specific surface area (BET) m2/g | 200 ± 25 | 110 ± 20 |
| Carbon content wt. % | 0.6 – 1.2 | 0.6 – 1.2 |
| Average primary particle size | nm 12 | nm 16 |
| Tapped density* g/l<br>(approx. value) acc.to DIN EN ISO 787/11,<br>Aug. 1983 | approx. 50 | approx. 50 |
| Moisture * wt. %<br>2 hours at 105 °C | ≤ 1.5 | ≤ 0.5 |
| Ignition loss, 2 hours at 1000 °C, based wt. %<br>on material dried for 2 hours at 105 °C | ≤ 1.0 | ≤ 2.0 |
| pH in 4% dispersion | 3.7 - 4.7 | 3.6 – 4.4 |
| SiO2-content wt. %<br>based on ignited material | ≥ 99.8 | ≥ 99.8 |

**รูปที่ 3.18** ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา



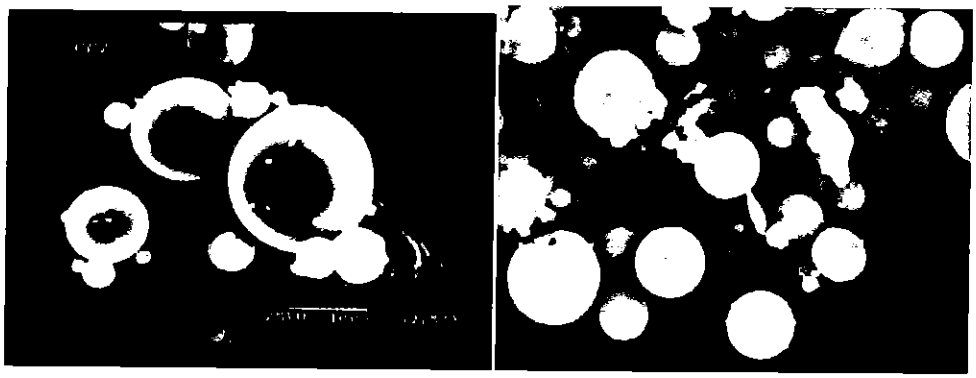
รูปที่ 3.19 ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume )



รูปที่ 3.20 ซิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume)

**3.1.5 เถ้าลอย (FlyAsh)**

เถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบได้มาจากแหล่ง โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นเถ้าลอยชนิด C คือมีปริมาณแคลเซียมสูง องค์ประกอบหลัก $SiO_2$ เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิด ส่วนคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 2.1 ลักษณะภายนอกเป็นผงละเอียด สีส้ม ลักษณะรูปร่างภายนอกเป็นทรงกลม เป็นส่วนใหญ่ การเก็บรักษาไว้ในถุงปิดสนิทเพื่อป้องกันความชื้น



**รูปที่ 3.21** อนุภาคของเท่าลอย

ที่มา: http://www.technologymedia.co.th/articledetail.asp?arid=539&pid=74

**รูปที่ 3.22** เถ้าลอยชนิดC แม่เมาะ

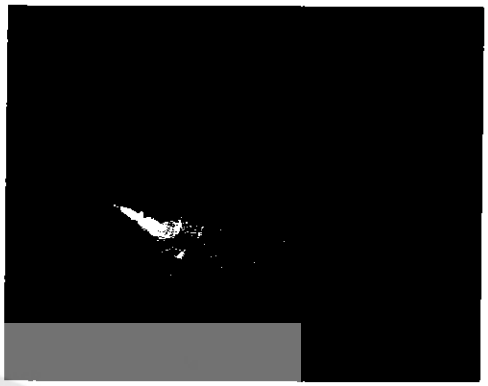
## 3.2 การเตรียมการทดสอบ

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบค่ากำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า

การเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า ใช้ก้อนตัวอย่างทรงลูกบาตร ขนาด 5*5*5 เซนติเมตร มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ0.50 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยของซิลิกาฟูมที่ 1% 2% ของถ่านกับเถ้าลอยที่ 20% ดังตารางที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่างอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C305(การเตียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า) ASTM C109 (การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า) ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เริ่มจากชั่งส่วนผสมในอัตราส่วนที่ได้กำหนดโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำสะอาด วัสดุผสมเพิ่ม และมวลรวมละเอียด(ทราย) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.23 เตรียมวัสดุก่อนการผสม

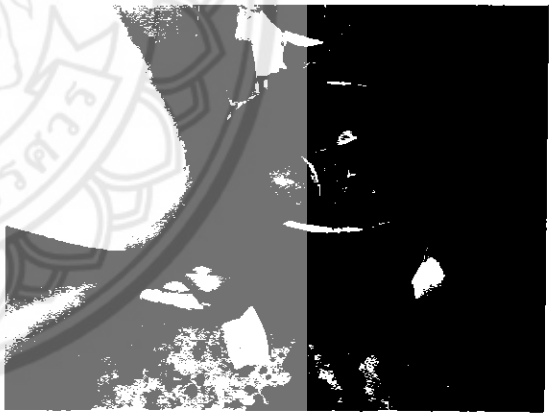


รูปที่ 3.24 ผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุประสาน

2. เมื่อเตรียมส่วนผสมครบแล้ว ทำการผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุผสมเพิ่มให้คลุกเค้าโดยทั่ว เมื่อเห็นว่าปูนซีเมนต์เข้ากับวัสดุผสมเพิ่มแล้ว นำไปใส่หม้อผสมที่เช็ดด้วยผ้าสะอาดที่เปียกพอหมาด เทน้ำลงไป เปิดเครื่อง พ้อมกับเททรายให้หมด จนครบเวลา 30วินาที

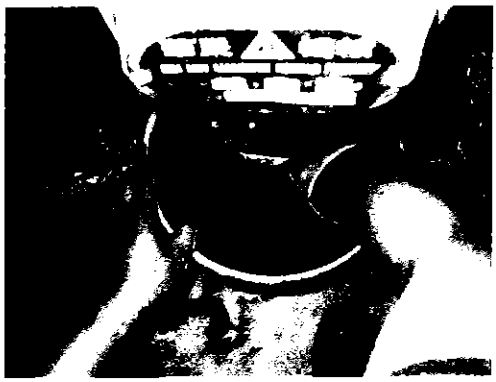
3.

รูปที่ 3.25 การเทส่วนผสม



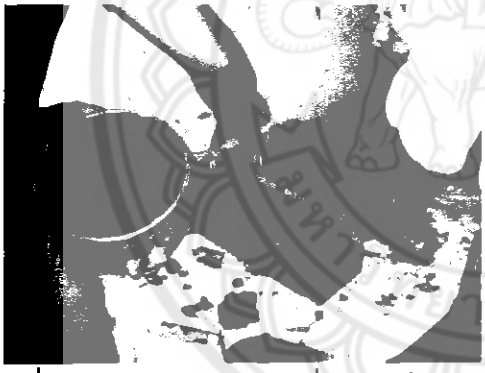
รูปที่ 3.26 การเทน้ำลงไปในส่วนผสม

4. เมื่อครบ 30วินาที เปลี่ยนความเร็วพร้อมจับเวลาอีก 30วินาที หลังจากนั้นจึงปิดเครื่องพร้อมทำการผสมมืออีก 15วินาที แล้วปิดด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหย จนครบ 1.30 นาที



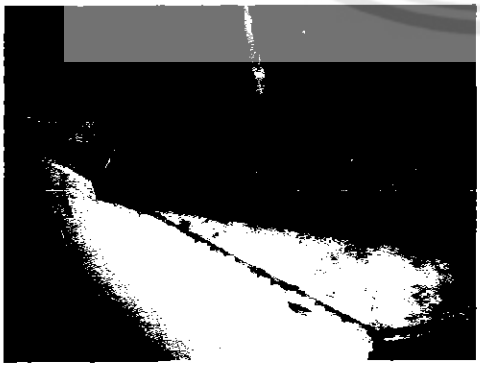
**รูปที่ 3.27 ผสมด้วยมือเป็นเวลา 15 วินาที**

5. เมื่อเปิดเครื่องผสมต่อไปจนครบเวลาอีก 1นาที แล้วให้นำส่วนผสมทั้งหมดเทเข้าแบบ โดยแบ่งเป็น 3ชั้น เพื่อกำจัดฟองอากาศ
6. ปิดด้วยพลาสติกห่ออาหาร ก่อนนำไปเก็บเพื่อรอการแกะแบบต่อไป
7. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบ และบ่ม ก้อนตัวอย่าง เพื่อรอการทดสอบ

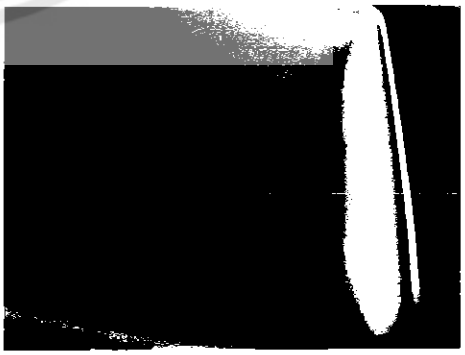


**รูปที่ 3.28** นำซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเสร็จเข้าแบบ

**รูปที่ 3.29** ขณะทำการสั่นซีเมนต์มอร์ต้า



**รูปที่ 3.30** ปิดห่อแบบหล่อเพื่อไม่ให้สูญเสียน้ำ



**รูปที่ 3.31** บ่มก้อนมอร์ต้าในน้ำตลอด 28วัน

**ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของการหาค่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า**

| ส่วนผสมที่ | ชื่อส่วนผสม | จำนวนที่ผสม (ลิตร) | ซีเมนต์ (กรัม) | แร่ผสมเพิ่ม (กรัม) | น้ำ (กรัม) | ทราย (กรัม) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LW35ro | 2.5 | 1,906 | - | 650 | 2,877 | ควบคุม |
| 2 | LW35r20 | 2 | 1,201 | 300 | 512 | 2,265 | |
| 3 | LW35Si20 | 2 | 1.195 | 299 | 509 | 2,254 | |
| 4 | LW35AC20 | 3.03 | 1,750 | 440 | 749 | 3,318 | |
| 5 | LW35SiHB1 | 2 | 1,509 | 15 | 520 | 2,301 | |
| 6 | LW35SiHL1 | 2 | 1,509 | 15 | 520 | 2,301 | |
| 7 | LW35SiHB2 | 2 | 1,491 | 30 | 519 | 2,297 | |
| 8 | LW35SiHL2 | 2 | 1,491 | 30 | 519 | 2,297 | |
| 9 | LW35ACV20 | 2 | 1,164 | 291 | 496 | 2.195 | |

***หมายเหตุ** การทดสอบนี้ได้กำหนดน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35%

W = อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน

r = เถ้าลอย

Si = ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา

SiHL = ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ

SiHB = ซิลิกาที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ

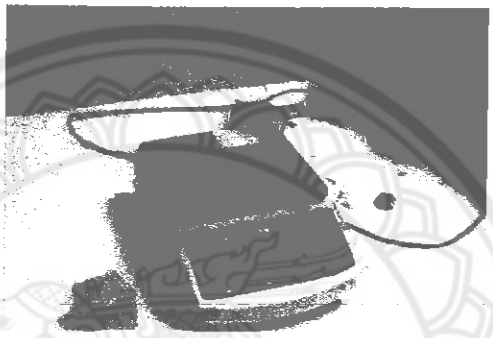
Ac = ถ่านกัมมันต์ C1

ACV = ถ่านกัมมันต์ C2

## 3.3 การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า

โดยในขั้นตอนการการทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า ทำการทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 7วัน 14วัน 28วัน และ90วัน โดยตัวอย่างจะต้องบ่มในน้ำตลอด 28 วัน เมื่อครบ 28วันจึงนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำเพื่อรอการทดสอบหาค่ากำลังอัด การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 109 มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการชั่งก้อนตัวอย่างพร้อมทำการจดบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้



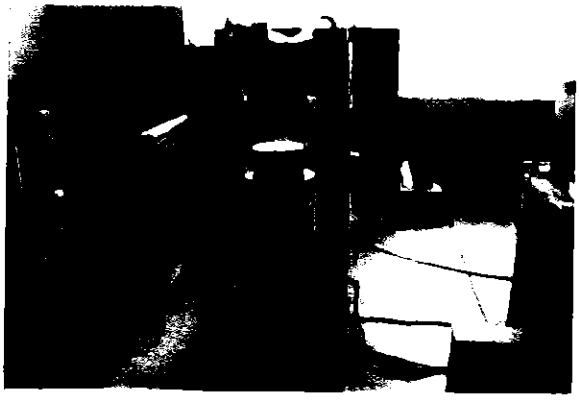
รูปที่ 3.32 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง

2. ทำการวัดค่า ความกว้าง ความยาว ความสูง ของก้อนตัวอย่างพร้อมจดบันทึกค่า

**รูปที่ 3.33** วัดขนาดโดยใช่เวเนียร์

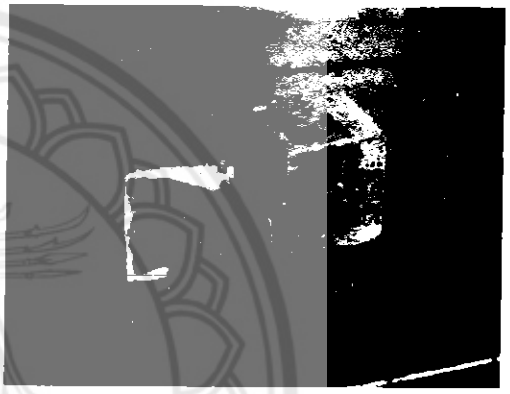
3. ทำการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบ (Compaction Strength) แล้วทำการจดบันทึกค่า

***หมายเหตุ** หากก้อนตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันมากเกิน 10 ksc. ให้ทำการทดสอบด้วยก้อนใหม่เพิ่มเพื่อหาค่าใกล้เคียงที่สุด



**รูปที่ 3.34** เครื่องทดสอบกำลังอัด

**รูปที่ 3.35** ขณะทำการกดอัดก้อนตัวอย่าง



**รูปที่ 3.36** ก้อนตัวอย่างหลังการอัด

# บทที่ 4

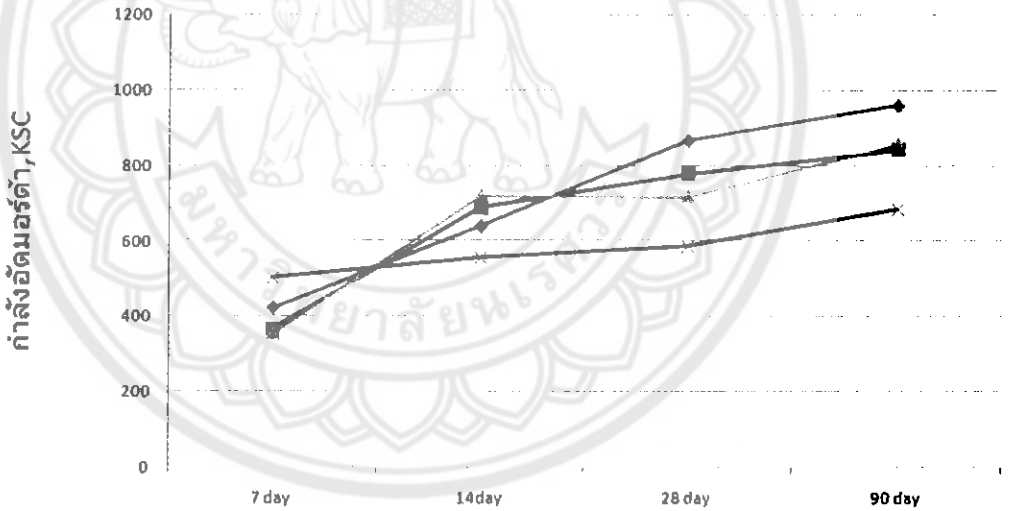
# ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

## 4.1 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

ในการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุผสมเพิ่ม โดยมีปัจจัยการศึกษาออกเป็น 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้ ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า และผลความพรุนของถ่านต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า จากการทดสอบได้ผลดังนี้

### 4.1.1 ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนมอร์ต้า

จากการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย(Fly Ash),ซิลิกาฟูม(Silica Fume),ถ่านกัมมันต์(Activated Carbon) ในอัตราการแทนที่ 20% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ อายุซีเมนต์มอร์ต้าที่ 7วัน 14วัน 28วัน และ 90วัน แสดงดังกราฟดังต่อไปนี้




| | 7 day | 14day | 28 day | 90 day |
|---|---|---|---|---|
| mix1 LW35ro | 422.63 | 639.58 | 868.09 | 961.4 |
| mix2 LW35ro20 | 368.38 | 690.59 | 779.76 | 843.13 |
| mix3 LW35Si20 | 354.02 | 721.49 | 720.13 | 858.66 |
| mix4 LW35Ac20 | 503.69 | 557.26 | 587.6 | 685.14 |

**รูปที่ 4.1** กราฟแสดงกำลังอัด(กก/ซม$^2$)และช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล(วัน)

จากกราฟด้านบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แกนตั้งคือค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า (กก/ซม$^2$) และแกนนอน คืออายุการทดสอบกำลังอัด (วัน) มีส่วนผสมควบคุม(LW35r0) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (LW35ro20) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม

(LW35Si20) และส่วนผสมที่มีที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) เป็นส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาในปัจจัยนี้

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 7วันจะพบว่าส่วนผสมที่ใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (LW35r20) ซิลิกาฟูม(LW35Si20) และถ่านกัมมันต์(LW35Ac20) มีค่ากำลังอัดเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากค่าน้อยไปมากดังนี้ ส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูม(LW35Si20)เท่ากับ 354.02 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย(LW35ro20)เท่ากับ 368.38 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 422.63 กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่มีถ่านกัมมันต์(LW35Ac20)เท่ากับ 503.69 กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 14วันจะพบว่าส่วนผสมที่ใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) จะมีค่ากำลังอัดที่ด้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากค่าน้อยไปมากดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) เท่ากับ 557.26 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) เท่ากับ 639.58 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (LW35ro20) เท่ากับ 690.59 กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (LW35Si20) เท่ากับ 721.49 กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 28วันจะพบว่าส่วนผสมที่ใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) ยังคงมีค่ากำลังอัดที่ด้วยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากค่าน้อยไปมากดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) เท่ากับ 587.60 กก/ซม$^2$ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (LW35Si20) เท่ากับ 720.13 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (LW35ro20) เท่ากับ 779.76 กก/ซม$^2$ และส่วนผสมควบคุม (LW35r0) เท่ากับ 868.09 กก/ซม$^2$

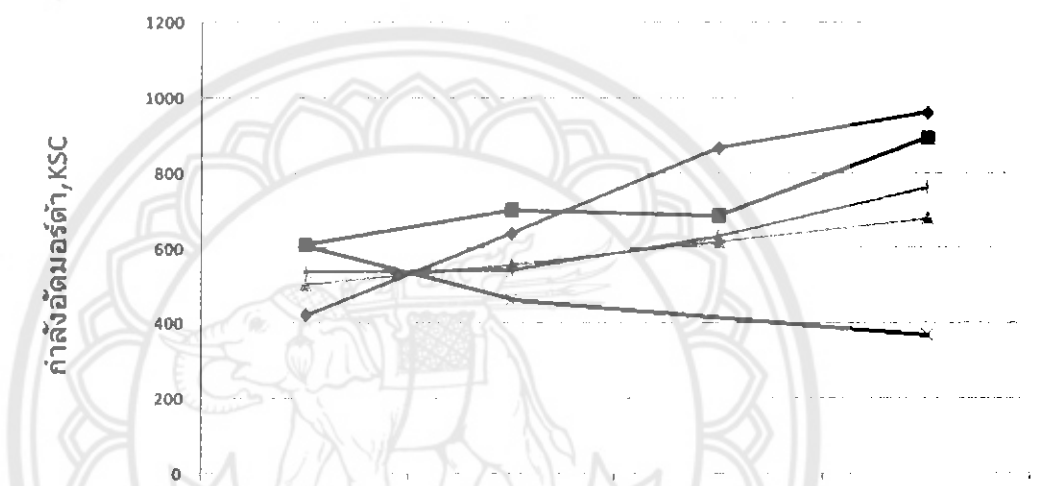
ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 90วันจะพบว่าส่วนผสมที่ใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) ยังคงมีค่ากำลังอัดที่ด้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากค่าน้อยไปมากดังนี้ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) เท่ากับ 685.14 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย (LW35ro20) เท่ากับ 843.13 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (LW35Si20) เท่ากับ 858.66 กก/ซม$^2$ และส่วนผสมควบคุม (LW35r0) เท่ากับ 961.44 กก/ซม$^2$

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20)มีกำลังอัดช่วงต้นต้น มีค่าเท่ากับ 503.69 กก/ม$^2$และตัวอย่างที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม(LW35Si20)มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 354.02 กก/ซม$^2$ แต่ในช่วงระยะเวลาที่ 90วันพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์(LW35Ac20)กับมีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุด เท่ากับ 685.14 กก/ซม$^2$ และส่วนผสมควบคุม(LW35r0) มีค่ากำลังอัดที่มากที่สุด เท่ากับ 961.44 กก/ซม$^2$ โดยส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์(LW35Ac20)นั่นจะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่ว่าถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายกับมวลรวม(Inert) ซึ่งเมื่อผสมเข้า

ไปแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นเป็นผลทำให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดลดต่ำลง

**4.1.2 ผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า**

การศึกษาผลของซิลิก้าที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการฟูมที่มีเคมีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (SiHB) และซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (SiHL) โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ 1% กับ 2% ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่อายุ 7วัน 14วัน 28วัน และ 90วัน แสดงดังกราฟดังต่อไปนี้




| | 7 day | 14day | 28 day | 90 day |
|---|---|---|---|---|
| mix1 LW35ro | 422.63 | 639.58 | 868.09 | 961.4 |
| mix7 LW35SiHB1 | 611.19 | 703.55 | 687.85 | 894.04 |
| mix8 LW35SiHL1 | 503.69 | 557.26 | 617.17 | 678.54 |
| mix9 LW35SiHB2 | 608.01 | 466 | 0 | 370.44 |
| mix10 LW35SiHL2 | 539.46 | 543.39 | 633.73 | 762.61 |

**รูปที่ 4.2** กราฟแสดงกำลังอัด(กก/ซม$^2$)และช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล(วัน)

จากกราฟด้านบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนตั้งคือค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า(กก/ซม$^2$)และแกนนอนคืออายุการทดสอบกำลังอัด(วัน)โดยมี ส่วนผสมควบคุม(LW35r0) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (SiHB) และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ(SiHL)

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 7วันจะพบว่าส่วนผสมควบคุม(LW35r0)จะมีค่ากำลังอัดเริ่มต้นที่น้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ422.62กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ 1%(SiHL1)เท่ากับ 503.69กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ 2%(SiHL2)เท่ากับ 539.46กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยมีซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ

2%(SiHB2)เท่ากับ 608.01กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ1%(SiHB1)เท่ากับ 611.19กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 14วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)เท่ากับ 466.00กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ2%(SiHL2)เท่ากับ 543.39กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ1%(SiHL1)เท่ากับ 557.26กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 639.58กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ1%(SiHB1)เท่ากับ 703.55กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 28วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ1%(LW35SiHL1)จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมพื้นผิวแบบชอบน้ำ1%(LW35SiHL1)เท่ากับ 617.17 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ2%(LW35SiHl2)เท่ากับ 633.73กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ1%(LW35SiHB1) เท่ากับ 687.85กก/ซม$^2$ และส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 868.09กก/ซม$^2$

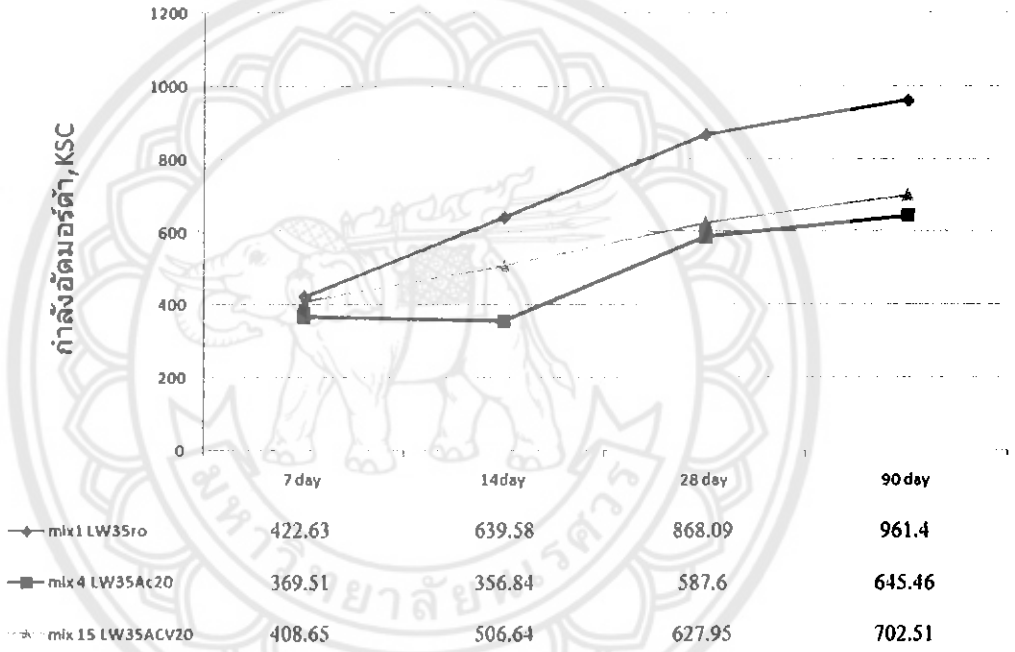
ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 90วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)เท่ากับ 370.44กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ1%(SiHL1)เท่ากับ 678.54กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำ2%(SiHL2)เท่ากับ 762.61กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ1%(SiHB1)เท่ากับ 894.04กก/ซม$^2$ และส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 961.40กก/ซม$^2$

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดช่วงต้นน้อยที่สุดคือส่วนผสมควบคุม(LW35r0)มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 422.62กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดช่วงต้นสูงที่สุดคือส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ1%(SiHB1)มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 611.19กก/ซม$^2$แต่ในช่วงอายุที่ 90วันส่วนผสมควบคุม(LW35r0)กับให้ค่ากำลังอัดที่มากที่สุดเท่ากับ 961.40กก/ซม$^2$ และในส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดคือส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 370.44กก/ซม$^2$ โดยจากการสันนิฐานพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ1%(SiHB1)นั้นจะมีการแยกตัวของซิลิกาฟูมออกจากน้ำอย่างสิ้นเชิงทำให้ซิลิกาฟูมสามารถเข้าไปแทรกตัวตามชช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์(Micro filler Effect)ทำให้ซีเมนต์มอร์ต้ามีความทึบแน่นมากขึ้นจึงส่งผลให้สามารถรับแรงอัดได้ดีในช่วงอายุต้นแต่ในช่วงอายุ 90 วันกำลังอัดของ

ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ2%(SiHB2)นั้นอาจเกิดจากการที่ซิลิกาฟูมทำให้ปูนซีเมนต์และน้ำทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ยากขึ้นจนเกิดความพรุนและทำให้ค่ากำลังอัดลดลงจากเดิมจึงสรุปได้ว่าสาเหตุอาจมาจากปฏิกิริยาเคมี หรือ คุณสมบัติทางกล ของซิลิกาฟูมที่มีต่อซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

**4.1.3 ผลของถ่านที่มีความพรุนต่างกันต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า**

การศึกษาผลของถ่านที่มีความแตกต่างกันต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20) และถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20) โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ 20% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ อายุ 7วัน 14วัน 28วัน และ 90วัน แสดงดังกราฟดังต่อไปนี้




**รูปที่4.3 กราฟแสดงกำลังอัด(กก/ซม$^2$)และช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล(วัน)**

จากกราฟด้านบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนตั้งคือค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า(กก/ซม$^2$)และแกนนอนคืออายุการทดสอบกำลังอัด(วัน)โดยมี ส่วนผสมควบคุม(LW35r0) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20) และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20) โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2ชนิดจะมีความพรุนที่แตกต่างกันโดยที่ถ่านกัมมันต์C1 จะเป็นส่วนผสมที่มีความพรุนสูงที่สุด และถ่านกัมมันต์C2 จะเป็นส่วนผสมที่มีความพรุนน้อยมาก เป็นส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาในปัจจัยนี้

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 7วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)จะมีค่ากำลังอัดเริ่มต้นที่น้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเริ่มต้นเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)เท่ากับ369.51กก/

ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20)เท่ากับ 408.65กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 422.63กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 14วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1(LW35Ac20)จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)เท่ากับ 356.84กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20)เท่ากับ 506.64กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 639.58กก/ซม$^2$

ที่อายุการทดสอบที่ 28วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1(LW35Ac20)จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)เท่ากับ 587.60กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20)เท่ากับ 627.95กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 868.09กก/ซม$^2$

ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 90วันจะพบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1(LW35Ac20)จะมีค่ากำลังอัดสุดท้ายที่น้อยกว่าทุกส่วนผสมโดยมีค่ากำลังสุดท้ายอัดเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)เท่ากับ 645.46 กก/ซม$^2$ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C2(LW35ACV20)เท่ากับ702.51กก/ซม$^2$ ส่วนผสมควบคุม(LW35r0)เท่ากับ 961.40กก/ซม$^2$

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดช่วงต้นน้อยที่สุดคือส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1(LW35Ac20)มีค่าเท่ากับ 369.51กก/ซม$^2$ และส่วนผสมที่ให้กำลังอัดช่วงต้นสูงที่สุดคือส่วนผสมควบคุม(LW35r0)มีค่าเท่ากับ 422.63กก/ซม$^2$ และจากกราฟผลการทดลองที่ระยะเวลา90วัน ส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดคือส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1(LW35Ac20)มีค่าเท่ากับ 645.46กก/ซม$^2$และส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุดยังคงเป็นส่วนผสมควบคุม มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 961.40กก/ซม$^2$ อาจสันนิฐานได้ว่าถ่านกัมมันต์นั่นมีคุณสมบัติที่คล้ายกับวัสดุมวลรวม (Inert) จึงทำหน้าที่คล้ายมวลรวมละเอียดประกอบกับโครงสร้างของถ่านกัมมันต์C2 นั่นมีความพรุนตัวที่น้อยกว่า ถ่านกัมมันต์C1 จึงทำให้มี

ความแข็งแรงของโครงสร้างถ่านมากกว่าเป็นผลทำให้มีการถ่ายน้ำหนักภายในโครงสร้างมอร์ต้าได้ดีกว่า จึงทำให้มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดีกว่า

# บทที่ 5
# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผล

### 5.1.1 ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม

จากการศึกษาและทำการทดลองจะได้ข้อสรุปที่ว่า

ที่อายุการทดสอบ 7วัน ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยมีซิลิกาฟูม (LW35Si20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 14วัน ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (LW35Si20) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 28วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 90วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

### 5.1.2 ผลของเคมีพื้นผิวของซิลิก้าฟูม

จากการศึกษาและทำการทดลองได้ข้อสรุปที่ว่า

ที่อายุการทดสอบ 7วัน ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ 1% (SiHB1) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 14วัน ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ 1% (SiHB1) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2% (SiHB2) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 28วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมพื้นผิวแบบชอบน้ำ1% (LW35SiHL1) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 90วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ2% (SiHB2) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

**5.1.3 ผลของถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน**

จากการศึกษาและทำการทดลองได้ข้อสรุปที่ว่า

ที่อายุการทดสอบ 7วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1 (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 14วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1 (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 28วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1 (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

ที่อายุการทดสอบ 90วัน ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) มีกำลังอัดมากที่สุด และส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์C1 (LW35Ac20) มีกำลังอัดน้อยที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการศึกษามีการใช้ซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวและถ่านกัมมันต์จึงควรมีการศึกษาถึงผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวและถ่านกัมมันต์เพื่อจะหาสัดส่วนในการผสมที่ดีที่สุดเพื่อศึกษาในด้านของกำลังอัด

2. เนื่องจากการศึกษามีการใช้ซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวให้มีลักษณะไม่ชอบ น้ำ นั้นเวลาทำการผสมทำได้ยากมากจึงต้องใช้ปริมาณที่เหมาะสม เทคนิคพิเศษในการผสม มิเช่นนั่นซิลิกาฟูมจะเกิดการแยกตัวออกจากน้ำได้

# บรรณานุกรม


[1] จิรภัทร ขำญาติ. 2003. วิจัยเถ้าลอยฯ ประโยชน์สู่ภาคอุตสาหกรรม. สืบค้นเมื่อ วันที่ 17 มีนาคม 2555, http://www.technologymedia.co.th

[2] ธีรวัฒน์ สินศิริ. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2009). ผลกระทบของนาโนซิลิกาจากเถ้าแกลบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 1-21.

[3] ชัชวาล เศรษฐบุตร. (1993). คอนกรีต เทคโนโลยี. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง, 4-14.

[4] Civil Engineering, General. 2010. วิธีการบ่มคอนกรีต. สืบค้นเมื่อ วันที่ 10 มีนาคม 2555, http://www.civilclub.net

[5] ชัย จาตุร พิทักษ์กุล. 2007. ซิลิกาฟูม. สืบค้นเมื่อ วันที่ 10 มีนาคม 2555, http://www.thaitca.or.th

[6] Maximum learning. 2110. ถ่านกัมมันต์คืออะไร. สืบค้นเมื่อ วันที่ 1 มีนาคม 2555, http://www.baanmaha.com

[7] ชินพงศ์ เลศวิไลรัตน์. นิกร กว้างปาละ. สุพัฒน์ชัย ใจช่วย. 2552. การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 4-11.

[8] ชุมพล จันทรสม. (2528). การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[9] Rukzon, S., Chindaprasirt, P., (2007). Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar, Computers and Concrete, 5, 1-14

[10] นิศากร สุทธวทิน และ สุทธิพงศ์ พรหมสาขา ณ สกลนคร. (2009). พฤติกรรมของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าฟางข้าวและสารแคลเซียมคลอไรด์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 1-173.

[11] American Society for Testing and materials, 2001, ASTM C188-95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 4, Philadelphia, 179-180.

[12] American Society for Testing and Materials, 1998, ASTM C109/C109M-98: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standards, 4, Philadelphia, 71-75.

[13] American Society for Testing and Materials, 1998, ASTM C191-99: Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Annual Book of ASTM Standards, 4, Philadelphia, 164-166.

[14] American Society for Testing and Materials, 2002, ASTM C 305: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compressive, Annual Book of ASTM Standard, PA, USA, 4, Philadelphia, 2.

[15] American Society for Testing and Materials, 2001, ASTM C128-97: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, 4, Philadelphia, 69-73.

[16] ปริญญานิพนธ์ ชื่อหัวข้อโครงงาน อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์

# ภาคผนวก

## คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

**ตารางที่ ก1** การหาค่าความถ่างจำเพราะมวลรวมละเอียด มาตรฐาน ASTM C128 [15]

| รายการ | ผลการทดสอบ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 1. น้ำหนักของกระบอกตวง, กรัม | 130.90 | 132.10 |
| 2. น้ำหนักของทรายอิ่มตัวผิวแห้ง, กรัม (S) | 500.00 | 500.00 |
| 3. น้ำหนักของกระบอกตวงที่ใส่น้ำและทราย, กรัม (C) | 923.50 | 925.30 |
| 4. น้ำหนักของกระบอกตวงที่ใส่น้ำ, กรัม (B) | 621.70 | 622.90 |
| 5. น้ำหนักของทรายแห้งด้วยเตาอบ, กรัม (A) | 495.50 | 495.30 |
| 6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ (Bulk specific gravity) | 2.50 | 2.51 |
| 7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity at SSD) | 2.52 | 2.53 |
| 8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) | 2.56 | 2.57 |
| 9. ร้อยละของการดูดซึม | 0.91 | 0.95 |

| | |
|---|---|
| ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ | 2.50 |
| ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาวะ SSD | 2.53 |
| **ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ** | 2.56 |
| **ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึม** | 0.93 |

**ตารางที่ ก2** การหาค่าความถ่างจำเพาะของปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | ผลการทดสอบ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 1. ขีดของน้ำมันก๊าดครั้งแรก | 0.30 | 0.30 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 3. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก, กรัม | 329.30 | 268.80 |
| 4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง | 19.50 | 20.00 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 6. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, กรัม | 268.80 | 205.80 |
| 7. น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้, กรัม (3)-(6) | 60.50 | 63.00 |
| 8 .ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. (4)-(1) | 19.20 | 20.00 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8) | 3.15 | 3.15 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 3.15 | |

**ตารางที่ ก3** การหาค่าความถ่างจำเพาะของเถ้าลอย (Fly Ash) มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | ผลการทดสอบ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 1. ขีดของน้ำมันก๊าดครั้งแรก | 0.30 | 0.30 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 3. น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งแรก, กรัม | 405.30 | 356.40 |
| 4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง | 23.90 | 23.20 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 6. น้ำหนักเถ้าลอยและถาดครั้งหลัง, กรัม | 356.40 | 308.60 |
| 7. น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้, กรัม (3)-(6) | 48.90 | 47.80 |
| 8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. (4)-(1) | 23.60 | 22.90 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะ, (7)/(8) | 2.07 | 2.09 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 2.08 | |

**ตารางที่ ก4** การหาค่าความถ่างจำเพาะของซิลิกาฟูม (Silica Fume) มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | ผลการทดสอบ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 1. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mm. | 1.00 | 1.00 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 3. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก, กรัม | 243.80 | 201.60 |
| 4.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mm. | 20.10 | 19.70 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 6. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, กรัม | 201.60 | 160.60 |
| 7. น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้, กรัม (3-6) | 42.20 | 41.00 |
| 8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. (4-1) | 19.10 | 18.70 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะ (7/8) | 2.21 | 2.19 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 2.20 | |

**ตารางที่ ก5** การหาค่าความถ่างจำเพาะของถ่านก้นเตา (Carbon) มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | การทดลองครั้งที่ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่1 | ครั้งที่2 |
| 1. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mm. | 0.50 | 0.20 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 19.00 | 19.00 |
| 3. น้ำหนักถ่านและถาดครั้งแรก, กรัม | 253.20 | 201.40 |
| 4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัก, mm. | 20.30 | 19.90 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 6. น้ำหนักถ่านและถาดครั้งหลัง, กรัม | 223.30 | 171.40 |
| 7. น้ำหนักของถ่านที่ใช้, กรัม | 29.90 | 30.00 |
| 8. ปริมาตรน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. | 19.80 | 19.70 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะของถ่าน | 1.51 | 1.52 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 1.52 | |

**ตารางที่ ก6** การหาค่าความถ่างจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จากบริษัท Sigma มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | ผลการทดสอบ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 1. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mm. | 0.60 | 0.40 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 3. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก, กรัม | 285.40 | 256.80 |
| 4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mm. | 18.70 | 18.00 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 20.00 | 20.00 |
| 6. น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, กรัม | 251.80 | 224.50 |
| 7. น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้, กรัม (3-6) | 33.60 | 32.30 |
| 8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. (4-1) | 18.10 | 17.60 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะ (7/8) | 1.86 | 1.84 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 1.85 | |

**ตารางที่ ก7** การหาค่าความถ่างจำเพาะของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จากบริษัท Lobachemie มาตรฐาน ASTM C188 [11]

| รายการ | การทดลองครั้งที่ | |
|---|---|---|
| | ครั้งที่1 | ครั้งที่2 |
| 1. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mm. | 1.20 | 0.60 |
| 2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, $^0$C | 19.00 | 19.00 |
| 3. น้ำหนักถ่านและถาดครั้งแรก, กรัม | 230.80 | 293.40 |
| 4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัก, mm. | 19.60 | 19.50 |
| 5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, $^0$C | 19.00 | 19.00 |
| 6. น้ำหนักถ่านและถาดครั้งหลัง, กรัม | 201.50 | 263.30 |
| 7. น้ำหนักของถ่านที่ใช้, กรัม | 29.30 | 30.10 |
| 8. ปริมาตรน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mm. | 18.40 | 18.90 |
| 9. ความถ่วงจำเพาะของถ่าน | 1.59 | 1.59 |
| 10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย | 1.59 | |