อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรงพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์

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

นายจิรพงศ์ ฉิมไทย รหัส 51380040

นายสุทธิศักดิ์ สุวัฒน์ รหัส 51380316

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 1606939
เลขเรียกหนังสือ ปร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร 9 ส930 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายจิรพงศ์ ฉิมไทย รหัส 51380040
	นายสุทธิศักดิ์ สุวัฒน์ รหัส 51380316
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์
	ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2554

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์)

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

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ภัคพงศ์ หอมเนียม)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายจิรพงศ์ ฉิมไทย รหัส 51380040
	นายสุทธิศักดิ์ สุวัฒน์ รหัส 51380316
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์
	ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2554

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาผลของกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูม และซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งส่วนแรก เป็นการศึกษาผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม ที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาฟูม และถ่านกัมมันต์ และเถ้าลอยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้มีน้ำทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผมให้มีการก่อตัวที่ช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านกัมมันต์น่าจะมีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุมวลรวม (Inert) ซึ่งเมื่อไปแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดลดลง ในส่วนที่สอง เป็นการศึกษาโดยใช้ซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว พบว่า ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำจะให้กำลังอัดที่สุดในช่วงแรก และจะมีพฤติกรรมในการรับกำลังอัดลดลงซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจและควรจะมีการศึกษาหาข้อมูลต่อไป นอกจากนี้ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำยังมีการก่อตัวที่ช้ากว่าซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ ซึ่งมีการดูดซับน้ำได้ดี ทำให้มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นมีน้อยลง จึงเกิดการก่อตัวที่เร็วกว่า และในส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านครัวเรือน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนตัวต่ำจะให้กำลังอัดได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนตัวสูง และยังพบว่าถ่านกัมมันต์จะมีการก่อตัวที่เร็วกว่าถ่านครัวเรือน เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความพรุนตัวสูงกว่าถ่านครัวเรือน ทำให้มีการดูดน้ำไว้ที่ผิวมาก ส่งผลให้เกิดการก่อตัวที่เร็วมากกว่า

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. Jirapong Chimthai ID. 51380040
	Mr. Suttisak Suwat ID. 51380316
Project advisor	Asst. Prof.Dr.saranagon Hemavibool
	Dr. thanapon phenrat
Major	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Academic year	2011

.....

Abstract

This project evaluates the effect of fly ash, activated carbon particles, silica fume, and surface modified silica fume on compressive strength and setting time of cement paste and mortar. This study comprises of three parts. First, we evaluated the effect of the types of admixtures including fly ash, activated carbon particles, and silica fume on compressive strength of mortar. At 28 days, fly ash yielded the highest compressive strength but was still lower than the control, i.e. mortar without any admixture. Presumably, at this early age, the pozzolanic reaction by fly ash was not effective yet. Thus, relatively, the additive of fly ash reduced the amount of cement and the extent of hydration. Similarly, activated carbon is a chemically inert admixture. It would not participate in hydration reaction. Consequently, the addition of activated carbon reduced the amount of cement and the extent of hydration, resulting in the even lower compressive strength. Secondly, we evaluated the effect of surface chemistry of silica fume (i.e. hydrophobicity and hydrophilicity) on the compressive strength of the mortar and the setting time of the cement paste. Interestingly, hydrophobic silica fume enhanced the compressive strength of the mortar at the early age (7-14 days). However, at the middle age (28 days), the compressive strength of the mortar with the hydrophobic silica fume decreased dramatically. A further study is needed to explain this interesting behavior. In addition, the setting time of hydrophobic silica fume was greater than hydrophilic silica fume. Presumably, hydrophilic silica fume could adsorb water to its hydrophilic surface, decreasing the amount of free water for hydration in the system and

accelerate the setting of the paste. Third, we investigated the effect of porosity of activated carbon on the compressive strength of the mortar and the setting behavior of cement paste. The activated carbon with low porosity yielded the greater compressive strength than the one with higher porosity. Nevertheless, the activated carbon with high porosity set faster than the one with low porosity. Presumably, water was absorbed into the pore of the carbon, resulting in the enhanced setting.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรม ผศ.ดร.สรัณกร เหมะวิบูลย์ และ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ ที่ปรึกษาโครงงานที่ท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินโครงการ ตลอดจนจัดหาเครื่องมือปฏิบัติงานต่างๆและสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงงานให้คณะผู้จัดทำโครงงาน พร้อมทั้งเสียสละเวลาของท่านมาควบคุมดูแลให้คำแนะนำ สั่งสอน การปฏิบัติงานโครงงานของคณะผู้จัดทำอย่างดีเยี่ยม

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณครูช่างทุกท่าน ที่ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือทดสอบต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือดำเนินโครงงาน อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อการใช้สถานที่ในการปฏิบัติงานโครงงาน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อุปการคุณด้านการเงินและให้กำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆชาววิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้ยืมเครื่องมืออุปกรณ์ในการปฏิบัติงานบางอย่างและช่วยปฏิบัติงานโครงงานรวมถึงให้กำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จ

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายจิรพงศ์ ฉิมไทย
นายสุทธิศักดิ์ สุวัฒน์
เมษา 2555

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ค
กิตติกรรมประกาศ.....จ
สารบัญ.....ฉ
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญรูป.....ฌ

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 การก่อตัวและการแข็งตัว.....4
2.3 กำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า.....6
2.4 วัสดุผสมเพิ่ม.....7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....14

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน.....16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....16
3.2 การเตรียมการทดสอบ.....15
3.3 การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า.....34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....36
4.1 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังของซีเมนต์มอร์ต้า.....36
4.2 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์.....41

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....46
5.1 สรุปผล.....46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....47

เอกสารอ้างอิง.....48

ภาคผนวก ก.....50
ภาคผนวก ข.....54
ภาคผนวก ค.....62

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินการ 3

2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูม 8

2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 13

2.3 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618 13

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544 14

3.1 อัตราส่วนผสมของการหาค่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า 32

3.2 อัตราส่วนผสมของการหาค่าเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ 33

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต 5

2.2 ลักษณะของซิลิกาฟูม 8

2.3 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ 11

3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 16

3.2 กล่องเก็บปูนซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น 16

3.3 ทรายที่เตรียมไว้ 17

3.4 ทรายเปียก 17

3.5 การการนำทรายมากตากไว้ในที่ร่ม 18

3.6 ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง 18

3.7 ทำการร่อนทรายด้วยตระแกรงเบอร์14 18

3.8 การเก็บตัวอย่างทรายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น 18

3.9 ถ่านครัวเรือน 19

3.10 ถ่านกัมมันต์ C2 19

3.11 ถ่านกัมมันต์ C1 20

3.12 การตำถ่านให้ให้ละเอียด 20

3.13 ร่อนถ่านด้วยตระแกรงเบอร์ 200 20

3.14 การปรับความชื้นถ่าน 21

3.15 การชั่งน้ำหนักถ่าน 21

3.16 การเก็บรักษาถ่านที่ปรับความชื้นแล้ว 21

3.17 การปรับอุณหภูมิน้ำให้เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของถ่าน 22

3.18 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของถ่าน 22

3.19 ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา 23

3.20 ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume) 24

3.21 ซิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume) 24

3.22 เถ้าลอยชนิด c แม่เมาะ 25

3.23 การเตรียมวัสดุที่จะผสม 26

3.24 การคลุกเคล้าส่วนผสม 26

3.25 การเทส่วนผสม 26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.26 การเทน้ำลงไปในส่วนผสม ... 26

3.27 การผสมมือเป็นเวลา 15 วินาที ... 27

3.28 นำซีเมนต์มอร์ตาที่ผสมเสร็จมาใส่แบบ ... 27

3.29 การสั่นซีเมนต์เพื่อไล่ฟองอากาศ ... 27

3.30 การปิดห่อแบบหล่อด้วยพลาสติก ... 28

3.31 การบ่มก้อนมอร์ต้าตลอด 28 วัน ... 28

3.32 การเตรียมวัสดุส่วนผสม ... 28

3.33 การผสม1-2 นาที ... 29

3.34 การปั้นเพสต์เป็นก้อนกลม ... 29

3.35 การโยนไปมา 6 ครั้ง ... 29

3.36 นำก้อนตัวอย่างไปใส่กรวยวงใหญ่ ... 29

3.37 การปาดก้อนตัวอย่าง ... 29

3.38 นำวางบนแผ่นกระจก ... 30

3.39 นำไปเก็บไว้ในกล่องที่มีความชื้น ... 30

3.40 การทดสอบการก่อตัวด้วยชุดทดสอบไวแคต ... 30

3.41 การหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลาย ... 31

3.42 ซีเมนต์เพสต์มีการก่อตัวขั้นสุดท้ายจะเกิดรอยที่ผิวเพียงเล็กน้อย ... 31

3.43 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง ... 34

3.44 การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง ... 34

3.45 45 เครื่องทดสอบกำลังอัด ... 35

3.46 การกดอัดก้อนตัวอย่าง ... 35

3.47 ก้อนตัวอย่างหลังการอัด ... 35

4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกัน ... 36

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ... 38

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน ... 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.4 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกัน 41

4.5 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว 43

4.6 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน 44

บทที่ 1

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมทั้งหมด2ส่วนคือวัสดุประสานซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์กับน้ำผสมกับวัสดุผสมซึ่งได้แก่ทราย หิน กรวดเมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่งและจะเริ่มแข็งตัวเมื่อแข็งตัวเต็มที่จะสามารถรับน้ำหนักได้มากซึ่งจะแปรผันตามระยะเวลา

ในปัจจุบันคอนกรีตยังคงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากมีความแข็งแรงและราคาถูกและในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นมากทำให้เกิดงานก่อสร้างขึ้นมากมายตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการคอนกรีตในงานก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การผลิตปูนซีเมนต์นั้นเพิ่มขึ้นตามความต้องการไปด้วยและในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีผลกระทบต่อทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในระดับหนึ่งซึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกจึงทำให้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงเพื่อเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ดังที่กล่าวมาขั้นต้นการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์และธรรมชาติจึงได้นำไปสู่การศึกษาและค้นคว้าเพื่อหาวัสดุของเสียจากธรรมชาติหรือกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำเอาวัสดุเหล่านี้มาศึกษาผลของกำลังอัดและการก่อตัวโดยในโครงการได้นำถ่านซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติมาศึกษาโดยถ่านที่นำมาศึกษามี 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์และถ่านครัวเรือน นอกจากนี้ยังได้นำเอาซิลิกาฟูมมาศึกษาด้วยโดยซิลิกาฟูมที่นำมาศึกษามี 3 ชนิดคือ ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume) และซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume) โดยจะนำถ่านและซิลิกา

ฟูมมาทำการศึกษาด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาผลของกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสม ถ่าน เถ้าลอย ซิลิกาฟูมและซิลิการฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ ถ่าน เถ้าลอย ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทำให้ทราบถึงผลของกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าและคุณสมบัติการก่อตัวของซีเมนต์ที่ผสมถ่าน เถ้าลอย ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว เพื่อเป็นแนวทางแก้ผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

1.3.2 สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้เป็นแนวทางในการนำกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

โครงงานนี้เป็นการศึกษาถึงการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และผลของกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าที่มีความแตกต่างกันของคุณสมบัติพื้นผิวและความพรุนของวัสดุผสมเพิ่มโดยที่สารผสมเพิ่มที่จะใช้ในการศึกษาคือซิลิกาฟูม,ถ่านกัมมันต์และเถ้าลอยโดยได้มีการกำหนดขอบเขตการทำโครงงานไว้ดังนี้

1.4.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสาน (w/b = 0.35)

1.4.2 ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (r = 20-50%)

1.4.3 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม (Si = 20-35%)

1.4.4 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมชนิดไฮโดรฟิลิก (SiHL = 0-50%)

1.4.5 ปริมาณการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมซนิดไฮโดรโฟรบิก (SiHB = 0-50%)

1.4.6 ปริมาณการแทนที่ด้วยถ่านกัมมันต์ (AC = 20-50%)

1.4.7 ทดสอบที่อุณหภูมิ 22 ± 1-2 °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)

<u>หมายเหตุ</u> ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ซีเมนต์เพส ซีเมนต์มอร์ต้า หรือคอนกรีต ล้วนแต่มีส่วนผสมของน้ำและปูนซีเมนต์เสมอ เมื่อนำน้ำและปูนซีเมนต์มาผสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้วระยะหนึ่ง ซีเมนต์เพส มอร์ต้า หรือคอนกรีตจะเริ่มการก่อตัวและแข็งตัวขึ้น จนสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยตามมาตรฐาน มอก. 15 มีหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทจะเหมาะกับงานที่แตกต่างกันออกไป ในการเลือกใช้ปูนซีเมนต์นั้น ในโครงการนี้จะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่เหมาะกับงานคอนกรีตทั่วๆไป ในที่นี้จะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เนื่องจากเป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะกับงานก่อสร้าง งานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วๆไป งานที่เหมาะสมกับกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน สนามบิน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงประเภทต่างๆ

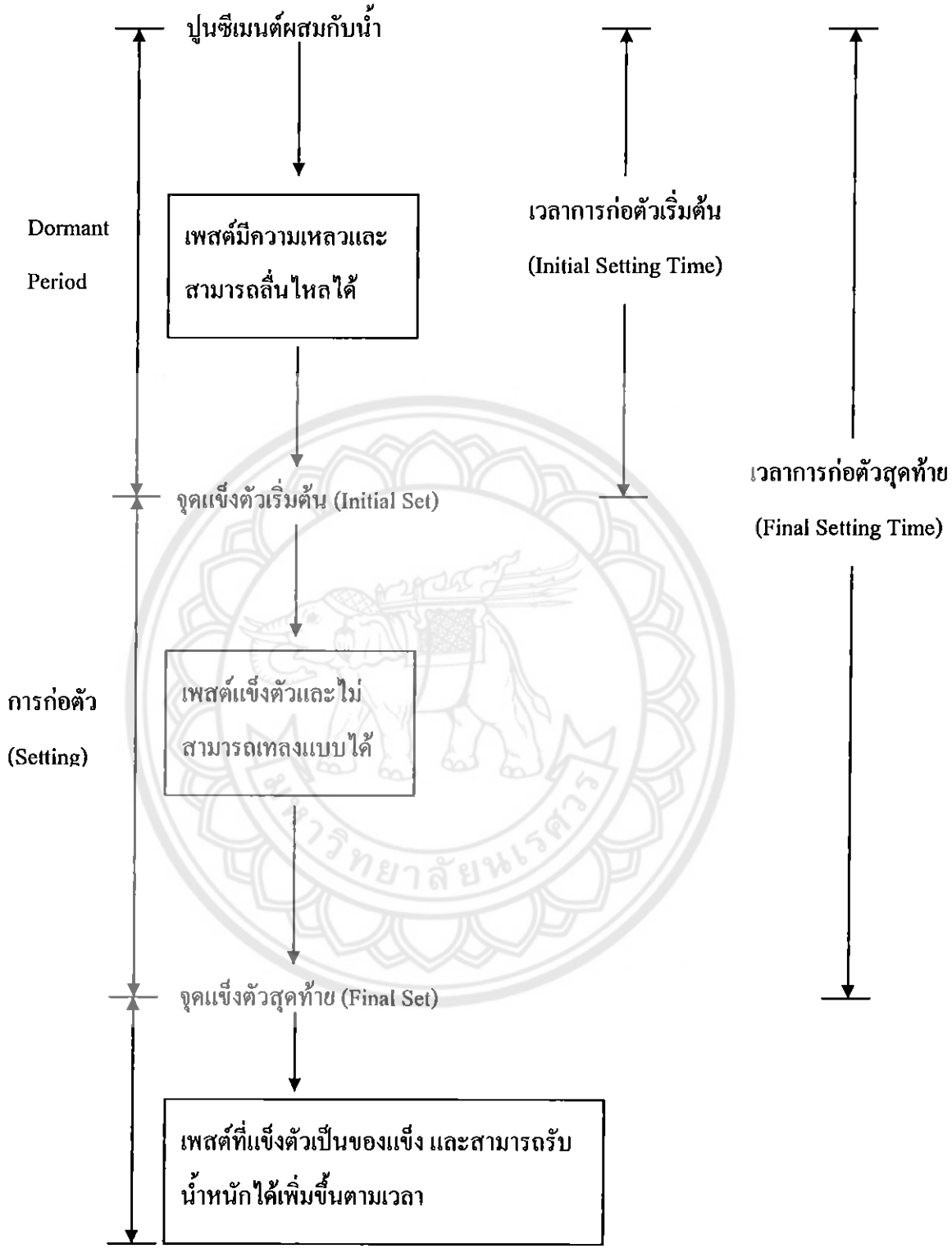
\

2.2 การก่อตัวและการแข็งตัว [3]

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า "จุดแข็งตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ "จุดแข็งตัวสุดท้าย" (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เรา เรียกว่า "การแข็งตัว" (Hardening) ขั้นตอนต่างๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูป 2.2

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัว

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัว เมื่ออัตราน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ ชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ วัสดุผสมเพิ่ม และน้ำยาผสมคอนกรีตก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวด้วยเช่นกัน



รูป 2.1 ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต [3]

2.3 กำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า

กำลังอัดของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังอัดของมอร์ต้าจะขึ้นอยู่กับ วัสดุเพิ่ม อัตราน้ำต่อซีเมนต์ มวลรวม แต่ถ้าหากมีการควบคุมอัตราน้ำต่อซีเมนต์และมวลรวม ก็จะสามารถรู้ได้ว่า วัสดุผสมเพิ่มนั้น มีผลอย่างไรต่อกำลังอัดของมอร์ต้า นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า เช่น การบ่ม ความพรุนในมอร์ต้า เป็นต้น

2.3.1 การบ่ม [4]

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลทำให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการบ่มอาจทำโดยการให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวแล้ว

การบ่ม เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้น หลังจากที่ผิวหน้าคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ปูนซีเมนต์ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ

วัตถุประสงค์ของการบ่ม คือ

1. เพื่อให้คอนกรีตมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตโดยเฉพาะในช่วงอายุเริ่มแรกโดยการรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

สิ่งที่ควรหลีกเหลี่ยง เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตได้รับความเสียหายในขณะที่บ่มอยู่ เช่น การสั่งสะเทือน การกระแทก การรับน้ำหนักมากเกินไป และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างมากในเวลาสั้นๆ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุสั้นๆ ของคอนกรีต

2.3.2 ความพรุน

ความพรุน คือ ช่องว่างที่อยู่ในเนื้อของมอร์ต้า ซึ่งช่องว่างในเนื้อมอร์ต้านั้น อาจมีหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่าง เช่น การจี้เขย่าที่ไม่ดีพอ หรือ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เป็นต้น กำลังอัดของมอร์ต้าจะแปรผกผันกับความพรุนของมอร์ต้า กล่าวคือ ถ้ามอร์ต้ามีความพรุนน้อย กำลังอัดของมอร์ต้าก็จะมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน ถ้าความพรุนมาก กำลังอัดของมอร์ต้าก็จะลดลง

ความพรุน ขององค์ประกอบของคอนกรีตทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ มวลรวม และรอยต่อถ่ายแรงระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม คือ ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีตกำลังสูงมากที่สุด กล่าวคือ กำลงของคอนกรีตมีผลขนาดใหญ่ที่ถูกกักในคอนกรีต โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) โพรงเจล (Ged Pores) และอากาศที่ถูกกักกระจายในคอนกรีต (Entrained Air)

2.4 วัสดุผสมเพิ่ม

ของเสียหรือวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรม ที่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีต และเป็นที่รู้จักกันดี ก็คือ วัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญเหมือนปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกา (SiO_2) และ อลูมิน่า (Al_2O_3) เป็นต้น การศึกษาในโครงการนี้จะเน้นการศึกษาวัสดุผสมเพิ่ม 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash), ซิลิก้าฟูม (Silica Fume) และ ถ่าน (Carbon)

2.4.1 ซิลิกาฟูม หรือ ไมโครซิลิกา [5]

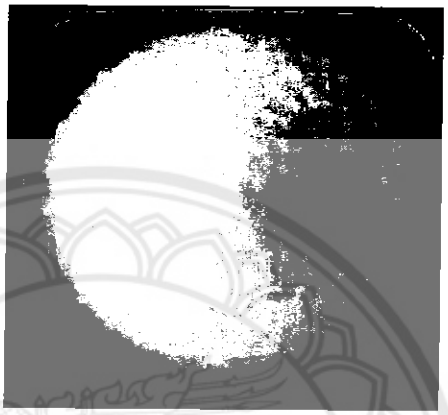
ซิลิกาฟูม (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของการผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็น กระบวนการรีดักชั่นจากควอร์ค (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธีการหลอมด้วยเตาไฟฟ้า (electric arc) ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก ซิลิกาฟูมจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้

ซิลิกาฟูมที่นำมาศึกษานี้ มี 3 ชนิดคือ ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface)

2.4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3,

Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟูมมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตาราง 2.1



รูปที่ 2.2 ลักษณะของซิลิกาฟูม

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูม

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหิน	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	-

2.4.1.1 ซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะทั่วไปของพื้นผิวของซิลิกาฟูมชอบน้ำอยู่แล้ว ซึ่งในการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาเพื่อให้มีลักษณะผิวไม่ชอบน้ำ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ เพื่อช่วยในการผสมกับน้ำยางธรรมชาติ จากการสืบค้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา แต่การปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานคอนกรีต เท่าที่ผู้ศึกษาสำรวจ ยังไม่มีงานวิจัยที่นำเอาซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งในการปรับปรุงผิวของซิลิกา เพื่อให้ได้พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำนั้น จะใช้กระบวนการแอดไมเซลลาร์ พอลิเมอไรเซชัน หรือการปรับปรุงหมู่ฟังชันก์ของซิลิกาโดยปฏิกิริยาซิลิเลชัน เป็นต้น

พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะมีลักษณะของผิว ซึ่งจะมีสารบางชนิดที่ไม่ยอมจับกับน้ำ บริเวณพื้นผิวด้านนอก ทำให้พื้นผิวนั้นไม่เกิดการเปียกเมื่อโดนน้ำ อาจเห็นได้จากปรากฏการณ์ น้ำกลิ้งบนใบบอน

พื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) พื้นผิวนั้น จะสามารถดูดน้ำได้สูงและเปียกเมื่อสัมผัสกับน้ำ หรือแม่แต่ความชื้นในอากาศ ซึ่งจะทำให้พื้นผิวนั้นจับตัวกันเป็นก้อน

2.4.2 ถ่าน (Carbon)

ถ่าน คือ วัตถุดิบ ที่ใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง สามารถให้ความร้อนได้ หลายระดับ ตามชนิดขององค์ประกอบ มีองค์ประกอบพื้นฐานด้วย ธาตุคาร์บอน ซึ่งในโครงงานนี้จะนำเอาถ่าน (Carbon) ที่นำมาศึกษาอยู่ 2 ชนิดคือ ถ่านก้นครัว และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

2.4.2.1 ถ่านก้นครัว

ถ่านก้นครัวส่วนใหญ่จะใช้ไม้เป็นวัสดุหลัก และเมื่อไม้ได้รับความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงถึง 300 °C จะลุกไหม้จนเกิดก๊าซ เกิดถ่าน ซึ่งถ้าเป็นการเผาไหม้ในอากาศเปิด การเผาไหม้จะดำเนินไปจนถึงที่สุด กล่าวคือ จนกระทั่งเหลือแต่ขี้เถ้า แต่ถ้าถูกเผาในสภาพอากาศปิดหรือจำกัดอากาศ ไม้จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นถ่าน

2.4.2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) คือถ่านที่ได้จากการนำไม้หรือวัสดุใกล้เคียงอื่นๆ เช่นกะลามะพร้าว มาผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์ โดยการเผาและอัดแรงดันที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นถ่านซึ่งมีความพรุนสูงมาก มีการใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่นในการใช้ดูดซับสารต่างๆ การกำจัดคลอรีน เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง เพราะมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะและเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างได้อย่างดี ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้หมดแล้ว อาจทำให้กลับมามีความสามารถในการดูดสี กลิ่น และก๊าซ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยการ Regenerate

ขั้นตอนและกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีวิธีการผลิตอยู่ 2 กรรมวิธี ดังนี้

1) วิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) คือการนำกะลามะพร้าวมาผสมกับสารเคมีเช่น ซิงค์คลอไรด์หรือโปแตสเซียมคาร์บอเนต แล้วนำไปเผาในที่อับอากาศ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ล้างเพื่อเอาสารเคมีออกให้หมด และนำมาผึ่งแดดให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการผลิตสูง และอาจมีสารเคมีตกค้าง ซึ่งการผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น ตัวกระตุ้นจะแทรกเข้าไปในเนื้อถ่านโดยจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่

2) วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) คือ การนำถ่านมากระตุ้นด้วยสารที่เหมาะสม ส่วนใหญ่เป็นก๊าซและไอ เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำต้องใช้ ไอน้ำประเภท Superheated steam ผ่านเข้าไปในถ่านซึ่งเผาในอุณหภูมิสูง 750-950 องศาเซลเซียส ในที่อับอากาศหรือมีอากาศเข้าไปน้อยที่สุด โดยใช้เวลาและความดันที่เหมาะสม ในขณะที่ถ่านสัมผัสกับไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังนี้ $C + H_2O = H_2 + CO - 31$ kcal โดยมีกลไก

(mechanism) ดังนี้

$$C + H_2O \rightleftharpoons C(H_2O)$$

$$C(H_2O) \longrightarrow H_2 + C(O)$$

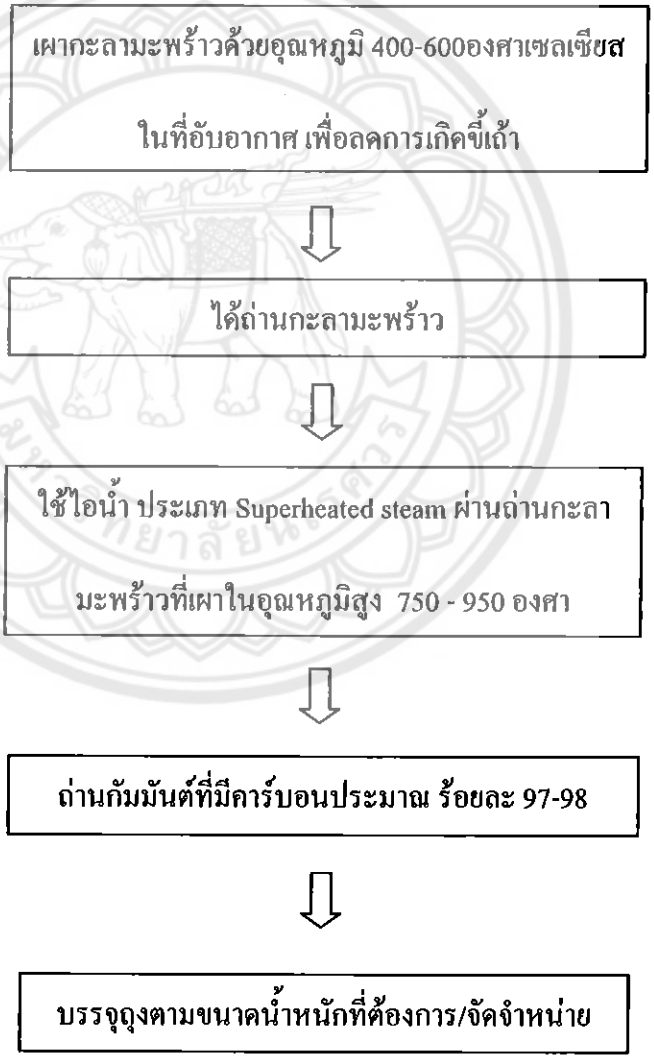
$$C(O) \longrightarrow CO$$

H_2 และ CO ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะหลุดออกไปทำให้เกิดรูพรุน แต่ CO ส่วนหนึ่งจะทำ ปฏิกิริยาให้ CO_2 และ C ตามสมการ

$$CO + C(O) \rightleftharpoons CO_2 + C$$

วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เป็นวิธีการผลิตที่มีต้นทุนต่ำกว่าการผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากลดขั้นตอนการล้างสารเคมีออกจากถ่าน และนอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้

ขึ้นกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำ (low density) เช่น กะลามะพร้าว จะมีคุณสมบัติดูดซับก๊าซและสีได้ดีกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงทั้งนี้วิธีการเผาถ่านกะลามะพร้าวเพื่อใช้สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ ต้องเผาในที่อับอากาศโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ในเตาเผาแบบที่ใช้ในการกลั่นทำลาย(destructive distillation) ซึ่งการใช้เตาเผาชนิดนี้จะได้ปริมาณถ่านมากกว่าวิธีการที่ชาวบ้านนิยมใช้ เช่น การเผาในถังน้ำมัน 200 ลิตร ซึ่งเป็นวิธีที่เกิดขี้เถ้าในปริมาณมากทำให้ได้ปริมาณถ่านต่ำโดยได้แสดงขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.4.3 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนเถ้าถ่านที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา(Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย หลังจากนั้นจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบๆบริเวณโรงไฟฟ้า เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำใช้คอนกรีตได้

ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแหล่ง ได้แก่ ที่แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ และแม่ตีบ อำเภองาว จังหวัดลำปาง ที่บ้านปูและบ้านป่าคา อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน และที่เหมืองกระบี่ บ้านปูดำ จังหวัดกระบี่ โดยเฉพาะที่แม่เมาะมีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และเป็นแหล่งผลิตเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ

2.4.3.1 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) เป็นถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซด์ 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 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีการเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซด์และบิทูมินัส มีรีดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

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 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากจะมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยสามารถทำการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C188

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.7 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น และจากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

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

SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80 – 90 ดังนั้น จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ SiO_2 และ Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1985 ชุมพล [6] พบว่า มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบร้อยละ 40 จะให้กำลังรับแรงอัดดีที่สุดที่อายุก่อน 28 วัน แต่ที่อายุตั้ง 28 วันขึ้นไปมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 20 จะมีกำลังแรงอัดดีที่สุดแต่มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 60 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดระยะแรกสูง แต่จะไม่เพิ่มขึ้นในระยะปลายแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

ในปี ค.ศ. 2009 นิศากร สุทธวทิน และ สุทธิพงค์ พรหมสาขา ณ สกลนคร [7] ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าฟางข้าว คุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าฟางข้าวและสารแคลเซียมคลอไรด์ เพื่อหาปริมาณเถ้าฟางข้าวและปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสม นำไปเป็นอัตราส่วนผสมเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง พบว่า อัตราส่วนของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าฟางข้าวที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้เถ้าฟางข้าวทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 และผสมสารแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณร้อยละ 1.5 จะทำให้สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับการใช้มอร์ต้าซีเมนต์ล้วน

งานวิจัยที่นำเอาซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ มาใช้ในงานคอนกรีต เท่าที่ผู้ศึกษาได้สำรวจ ค้นหาดู ยังไม่พบงานวิจัยไหน ที่นำเอาซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมาใช้ในงานคอนกรีต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

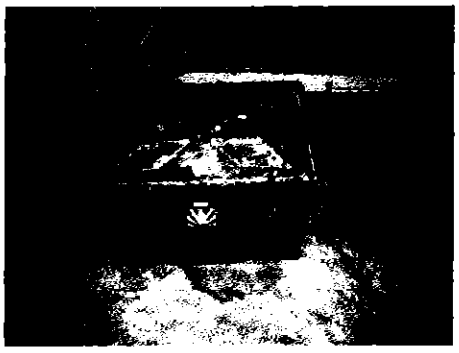
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและวิธีการดำเนินโครงการที่เกี่ยวข้องกับ อิทธิพลของ เถ้าลอย ถ่าน ซิลิกาฟูมและซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าและการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา การเตรียมการทดสอบและวิธีการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) ผลิตโดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (ลำปาง) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 151 เล่ม 2547 และตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM C150 TYPE 1 น้ำหนักต่อถุงคือ 50 กิโลกรัม ในปูนซีเมนต์ 1 ถุง มีองค์ประกอบทางเคมีดังตาราง 3.1

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หาได้จากการทดสอบการหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.15(ภาคผนวก ก) ส่วนการจัดเก็บปูนซีเมนต์นั้นจะนำปูนซีเมนต์มาเก็บใส่ไว้ในกล่องพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นดังรูปที่ [3.2]



รูปที่ 3,1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 **รูปที่ 3.2** กล่องเก็บปูนซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น

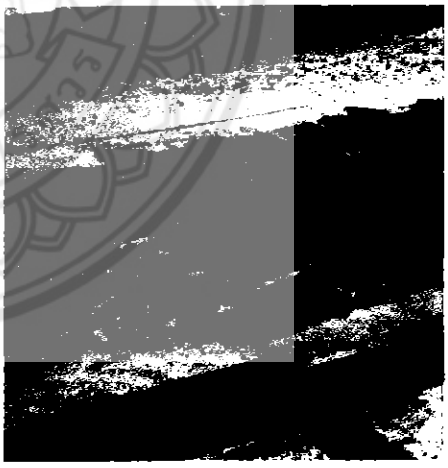
3.1.2 ทราย

ทรายที่ใช้ในการศึกษานั้นเป็นทรายแม่น้ำมีแหล่งที่มาจาก อำเภอ บางระกำ จังหวัด พิษณุโลก [รูปที่ 3.3]

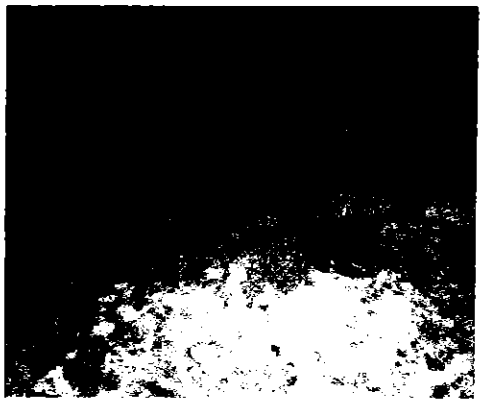
การเตรียมตัวอย่างทรายที่จะใช้ในการทดสอบนั้นจะนำทรายที่เตรียมไว้มาเกลี่ยให้กระจายตัว แล้วทำการฉีดน้ำเพื่อให้ทรายอยู่ในสภาวะที่เปียก จากนั้นนำทรายที่เปียกมาตากไว้ในที่ร่มประมาณ 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ดังรูปที่ [3.4-3.5] แล้วนำทรายมาร่อนด้วยตระแกรงเบอร์14 และนำทรายที่ผ่านการร่อนมาเก็บใส่ถังพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นของทราย ดังรูปที่[3.6-3.8]

นำตัวอย่างทรายจากถังเก็บมาหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 188 เพื่อนำค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้ไปใช้ในการออกแบบส่วนผสม ค่าความถ่างจำเพาะที่ได้จากการทดสอบคือ 2.56 (ภาคผนวก ก.)

รูปที่ 3.3 ทรายที่เตรียมไว้



รูปที่3.4 ทรายเปียก



รูปที่ 3.5 การนำทรายมากตากไว้ในที่ร่ม

รูปที่ 3.6 ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

รูปที่ 3.7 ทำการร่อนทรายด้วยตระแกรงเบอร์14

รูปที่ 3.8 การเก็บตัวอย่างทรายเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

3.1.3 ถ่าน (Activated Carbon)

ถ่านที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ชนิด ดังรูป [3.9-3.11] ประกอบด้วยถ่านที่ใช้ในครัวเรือน ถ่านกัมมันต์ C1 และ ถ่านกำมันต์ C2 โดยที่ถ่านกัมมันต์ C1 จะมีความพรุนสูงที่สุดรองลงมาคือถ่านกัมมันต์ C2 และถ่านครัวเรือนจะมีความพรุนต่ำที่สุด

การเตรียมตัวอย่างถ่านที่จะใช้ในการทดสอบโดยนำถ่านทั้ง 3 ชนิดมาตำให้ละเอียดโดยใช้ครกประมาณ 3-5 นาทีดังรูปที่ [3.12] จากนั้นนำถ่านที่ตำละเอียดมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ดังรูปที่ [3.13]และนำถ่านที่ผ่านการร่อนมาปรับความชื้นโดยนำถ่านไปฉีดพรมน้ำให้เปียกแล้วนำไปเก็บไว้ในกล่องที่มีความชื้นและทำการชั่งน้ำหนักวันต่อวันจนค่าน้ำหนักคงที่ซึ่งจะได้ถ่านที่มีสภาพอิ่มตัวผิวแห้งแล้วจึงเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นดังรูป [3.14-3.16]

นำตัวอย่างที่ผ่านการร่อนมาหาค่าความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C188 ดังรูป [3.17-3.18] สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะได้ดังนี้ สำหรับถ่านที่ใช้ตามครัวเรือนมีค่าเท่ากับ 1.52 , ถ่านกัมมันต์ C2 มีค่าเท่ากับ 1.59 , ถ่านกัมมันต์ C1 มีค่าเท่ากับ 1.85 (ภาคผนวก ก)

รูปที่ 3.9 ถ่านครัวเรือน

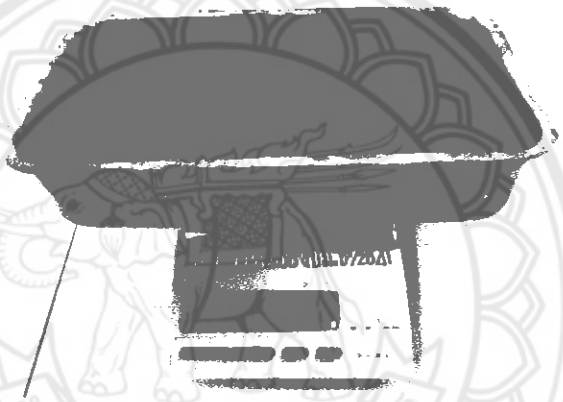
รูปที่ 3.10 ถ่านกัมมันต์ C2

รูปที่ 3.11 ถ่านกัมมันต์ C1

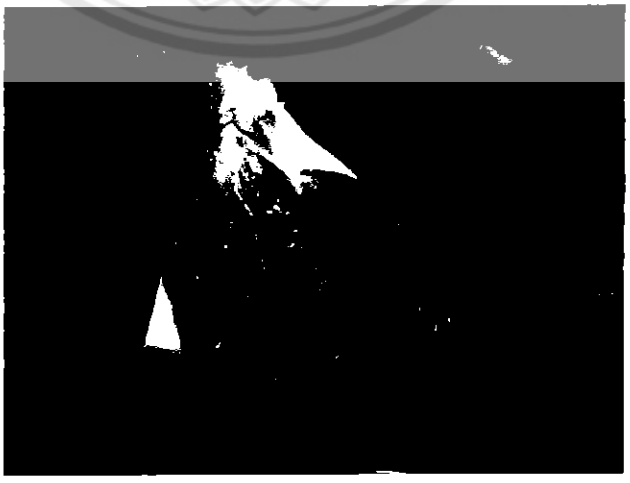
รูปที่ 3.12 การตำถ่านให้ให้ละเอียด

รูปที่ 3.13 ร่อนถ่านด้วยตระแกรงเบอร์ 200

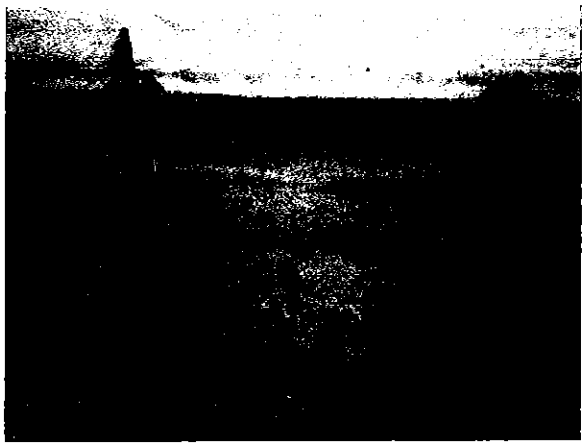
รูปที่ 3.14 การปรับความชื้นถ่าน



รูปที่ 3.15 การชั่งน้ำหนักถ่าน



รูปที่ 3.16 การเก็บรักษาถ่านที่ปรับความชื้นแล้ว



รูปที่ 3.17 การปรับอุณหภูมิน้ำให้เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของถ่าน

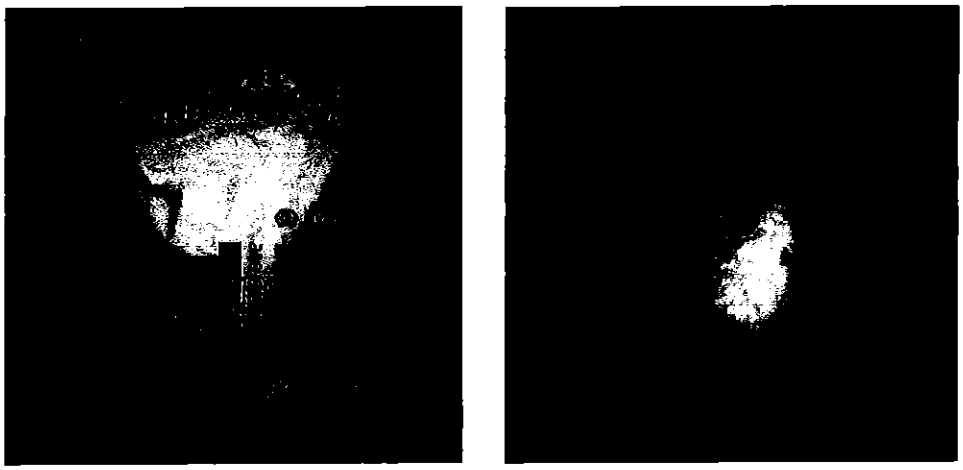
รูปที่ 3.18 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของถ่าน

3.1.4 ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

ซิลิกาเป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตหรือลดการเยิ้มตัวและการแยกตัวของคอนกรีตสด ซิลิกาฟูมที่นำมาศึกษามี 3 ชนิดคือ ซิลิกาฟูมแบบธรรมดาซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีเทาดังรูปที่ [3.19] ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume) มีลักษณะเป็นเม็ดฝุ่นสีขาวดังรูปที่ [3.20] และ ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume)ลักษณะเป็นเม็ดฝุ่นสีขาวดังรูปที่ [3.21]

ค่าความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C188 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.20 (ภาคผนวก ก) โดยค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้นี้คือค่าความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมแบบธรรมดา (สามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะนี้ไปใช้กับซิลิกาฟูมอีกสองชนิดได้)

รูปที่ 3.19 ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา

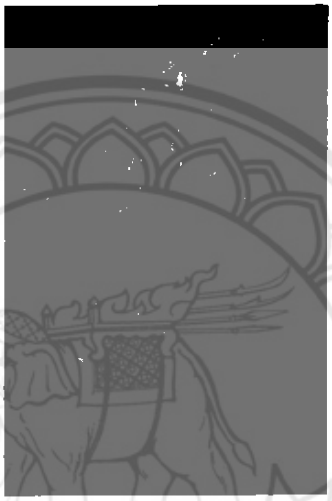


รูปที่ 3.20 ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic Silica Fume)

รูปที่ 3.21 ซิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume)

3.1.5 เถ้าลอย (FlyAsh)

เถ้าลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้เป็นเถ้าลอยชนิด C มีแหล่งที่มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ดังรูป [3.22] สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยที่นำมาศึกษานี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 188 (ภาคผนวก ก) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.08 สำหรับอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยกับซีเมนต์ได้แสดงใน ตารางที่ 3.2และ3.3



รูปที่ 3.22 เถ้าลอยชนิด c แม่เมาะ

3.2 การเตรียมการทดสอบ

ในการศึกษานี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ ด้านกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า และด้านเวลาในการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ซึ่งการเตรียมการทดสอบจึงแบ่งได้ดังนี้

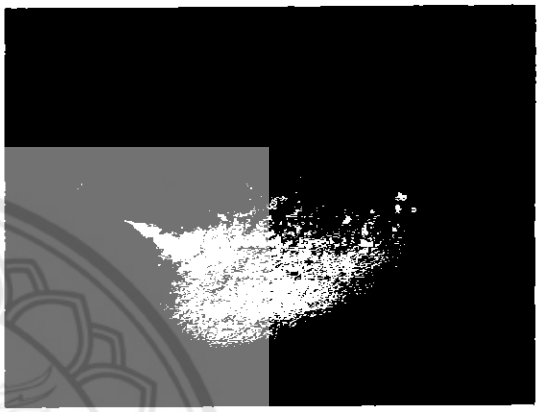
3.2.1การเตรียมตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้า

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้านี้ได้มีการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 35%และ50% อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ของซิลิกาฟูมที่ 1% 2% 5% ของถ่านกับเถ้าลอยที่ 20% ดังตารางที่ 3.2 การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109และC305 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมในอัตราส่วนที่ได้กำหนดโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำสะอาด วัสดุประสานและทรายที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งดังแสดงใน ตารางที่ 3.1

2. นำปูนซีเมนต์และวัสดุประสานมาคลุกเคล้าให้เข้ากันจากนั้นนำไปใส่ในเครื่องผสม [รูปที่3.23-3.24]

รูปที่ 3.23 การเตรียมวัสดุที่จะผสม



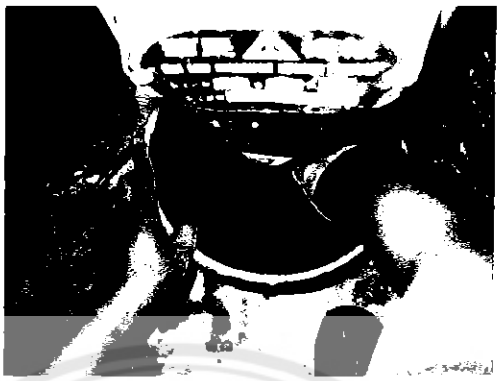
รูปที่ 3.24 การคลุกเคล้าส่วนผสม

3. นำน้ำสะอาดที่เตรียมไว้เทใส่เครื่องผสมทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วรอบต่ำพร้อมเททรายลงไป ทำการผสมเป็นเวลา 30 วินาที่ [รูปที่3.25-3.26]

รูปที่ 3.25 การเทส่วนผสม

รูปที่ 3.26 การเทน้ำลงไปในส่วนผสม

4. ปิดเครื่องผสมและทำการผสมด้วยมือประมาณ 15 วินาทีจากนั้นเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วรอบสูงเป็นเวลา 1 นาทีแล้วจึงปิดเครื่องผสม [รูปที่3.27]

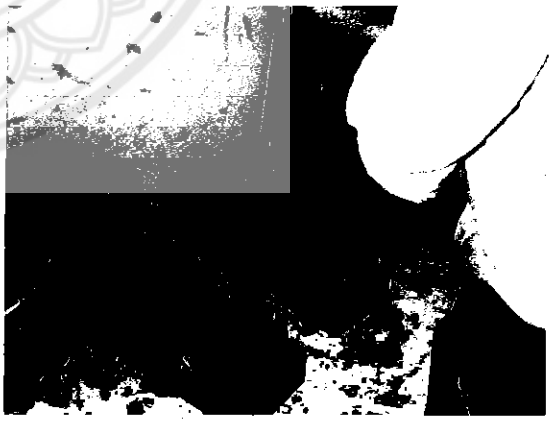


รูปที่ 3.27 การผสมมือเป็นเวลา 15 วินาที

5. นำซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเสร็จมาเทลงในแบบหล่อ แล้วนำไปวางบนเครื่องสั่นคอนกรีต ทำการสั่นประมาณ 3-5นาทีจากนั้นปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วปิดผิวหน้าด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แกะแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปบ่มในน้ำ [รูปที่3.28-3.31]

6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 จนครบทุกชุดการทดสอบตามตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.28 นำซีเมนต์มอร์ตาที่ผสมเสร็จมาใส่แบบ



รูปที่ 3.29 การสั่นซีเมนต์เพื่อไล่ฟองอากาศ

รูปที่ 3.30 การปิดห่อแบบหล่อด้วยพลาสติก

รูปที่ 3.31 การบ่มก้อนมอร์ต้าตลอด 28 วัน

3.2.2การเตรียมตัวอย่างการทดสอบหาค่าเวลาก่อตัวในซีเมนต์เพสต์

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบหาค่าการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์นี้ได้มีการกำหนดอัตราอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 35%และ50% อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ของซิลิกาฟูมที่ 1% 2% 5% ของถ่านกับเถ้าลอยที่ 35% ดังตารางที่ 3.3 การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C191 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมในอัตราส่วนที่ได้กำหนดไว้โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับวัสดุประสานดังแสดงในตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.32 การเตรียมวัสดุส่วนผสม

2. นำส่วนผสมที่ได้เตรียมไว้ไปผสมในเครื่องผสมเป็นเวลา 1-2นาที [รูปที่ 3.33]

รูปที่ 3.33 การผสม1-2 นาที

3. นำซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากเครื่องผสมมาปั้นเป็นก้อนกลมโดยเร็วและโยนไปมา 6 ครั้งให้สองมือห่างกันประมาณ 2 ฝ่ามือ [รูปที่3.34-3.35]

รูปที่ 3.34 ทำการปั้นเพสต์เป็นก้อนกลม

รูปที่ 3.35 การโยนไปมา 6 ครั้ง

4. นำซีเมนต์เพสต์ไปกดใส่กรวยทางวงใหญ่ด้วยมือและปาดให้เรียบแล้ววางบนแผ่นกระจกแล้วใช้เกรียงปาดกรวยทางวงเล็กให้เรียบให้เรียบแล้วนำไปเก็บไว้ในกล่องที่มีความชื้นเป็นเวลา 30 นาที [รูปที่3.36-3.39]

รูปที่ 3.36 นำก้อนตัวอย่างไปใส่กรวยวงใหญ่

รูปที่ 3.37 การปาดก้อนตัวอย่าง

รูปที่ 3.38 นำวางบนแผ่นกระจก

รูปที่ 3.39 นำไปเก็บไว้ในกล่องที่มีความชื้น

5. นำกรวยพร้อมแผ่นกระจกมาทดสอบด้วยชุดทดสอบไวแคตโดยปรับเข็มสเกลแตะกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ แล้วปรับเข็มทดสอบมาตรฐานที่บอกระยะจมที่แผ่นสเกลให้ลงเป็นเลข (0) ปล่อยเข็มมาตรฐานให้จมลงไปในซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาทีแล้วอ่านค่าระยะเข็มจมบนเข็มสเกล [รูปที่3.40]

(a) (b)

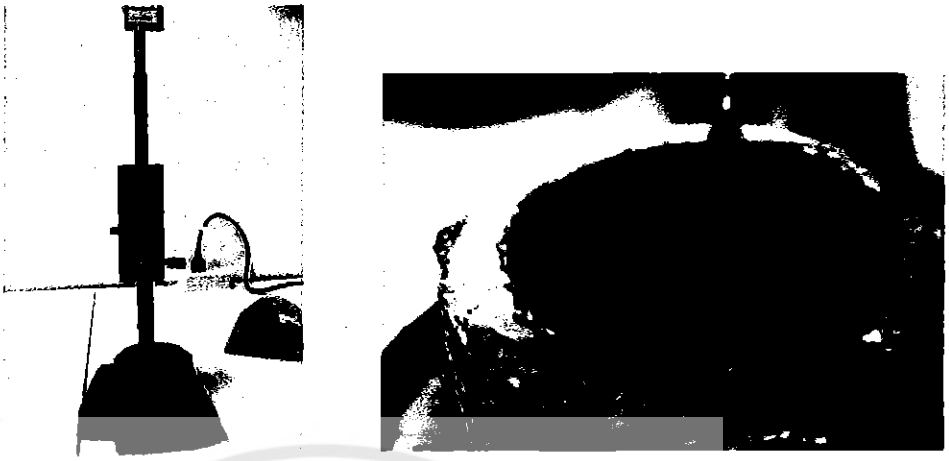
รูปที่ 3.40 การทดสอบการก่อตัวด้วยชุดทดสอบไวแคต

(a)นำแผ่นกระจกและตัวอย่างมาทำการทดสอบ (b) ปรับเข็มสเกลให้เป็นเลขศูนย์

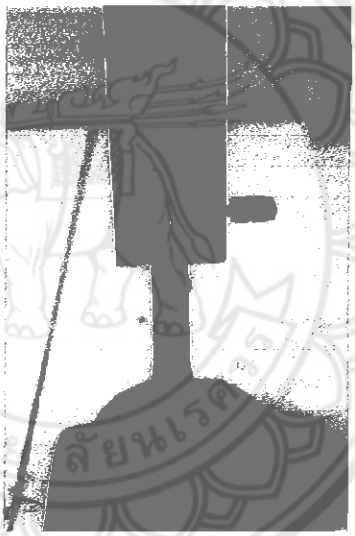
6. ทิ้งไว้ 30 นาทีแล้วนำมาทดสอบเช่นนี้อีก ตามข้อ 4และ5 พร้อมกับบันทึกระยะเข็มจม ทำเช่นนี้จนได้ระยะจม 25 มม. ค่าที่ได้จะรวมเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงระยะจม 25 มมเรียกว่าระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น

7. การหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลายนี้จะเปลี่ยนมาใช้เข็มไวแคตทำการปล่อยเข็มลงบนผิวแล้วมีเพียงรอยที่ผิวซีเมนต์เท่านั้นรวมเวลาเริ่มผสมจนถึงเวลานี้คือระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลาย [รูปที่3.41-3.42]

8. ทำการทดสอบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 จนครบทุกชุดการทดสอบ



รูปที่ 3.41 การหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลาย



รูปที่ 3.42 ซีเมนต์เพสต์มีการก่อตัวขั้นสุดท้ายจะเกิดรอยที่ผิวเพียงเล็กน้อย

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

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของการหาค่าเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์

ส่วนผสมที่	ชื่อส่วนผสม (กรัม)	ปูน (กรัม)	วัสดุประสาน (กรัม)	น้ำ (กรัม)	หมายเหตุ
1	LW35r0	1,000	-	350	
2	LW35r35	650	350	350	
3	LW35Si35	650	350	350	
4	LW35AC35	650	350	350	
5	LW35SiHB1	990	10	350	
6	LW35SiHL1	990	10	350	
7	LW35SiHB2	980	20	350	
8	LW35SiHL2	980	350	350	
9	LW35ACV35	650	350	350	
10	LW35ACC35	650	350	350	

หมายเหตุ การทดสอบนี้ได้กำหนดน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35%

W = อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน

r = เถ้าลอย

Si = ซิลิกาฟูมแบบธรรมดา

SiHL = ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ

SiHB = ซิลิกาที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ

Ac = ถ่านกัมมันต์จากบริษัท A

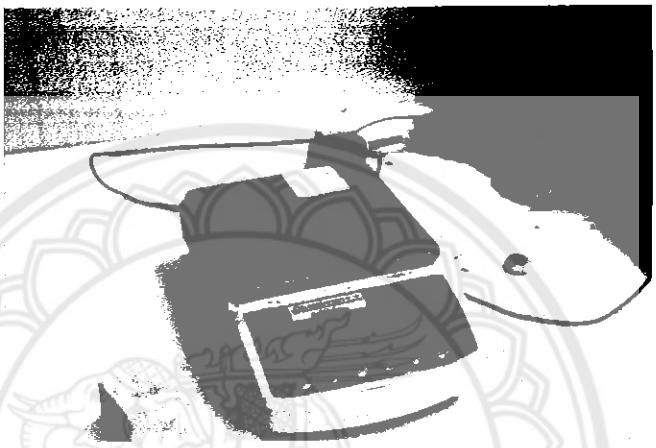
ACV = ถ่านกัมมันต์จากบริษัท B

ACC = ถ่านครัวเรือน

3.3 การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบที่ 7 14และ28วัน โดยบ่มในน้ำตลอด 28 วัน การทดสอบหาค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 305มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1.นำก้อนตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จำนวน 2 ก้อนไปชั่งน้ำหนักละจดบันทึกค่าน้ำหนัก [รูปที่ 3.43]

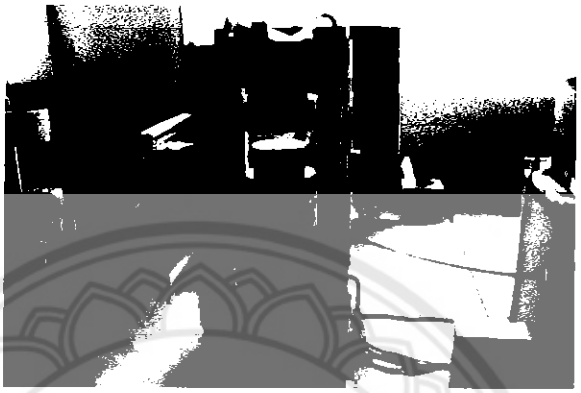


รูปที่ 3.43 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง

2.นำก้อนตัวอย่างไปทำการวัดขนาดหน้าตัด กว้าง ยาว สูง และบันทึกค่าขนาดหน้าตัด [รูปที่3.44]

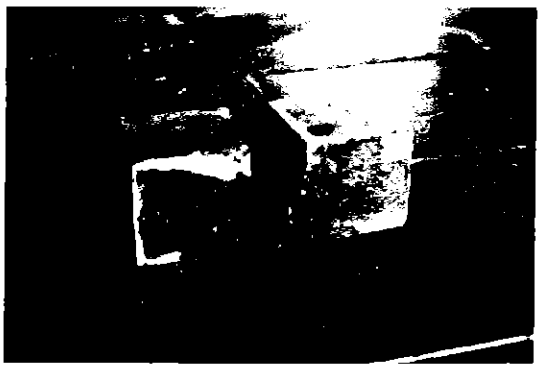
รูปที่ 3.44 การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง

3.นำก้อนตัวอย่างไปกดทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบ (Compaction Strength)แล้วทำการจดบันทึกค่า (หากก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังอัดที่ต่างกันมากเกินไปให้กดทดสอบเพิ่มอีกก้อนเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ได้) [รูปที่3.45-3.47]



รูปที่ 3.45 เครื่องทดสอบกำลังอัด

รูปที่ 3.46 การกดอัดก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.47 ก้อนตัวอย่างหลังการอัด

บทที่ 4

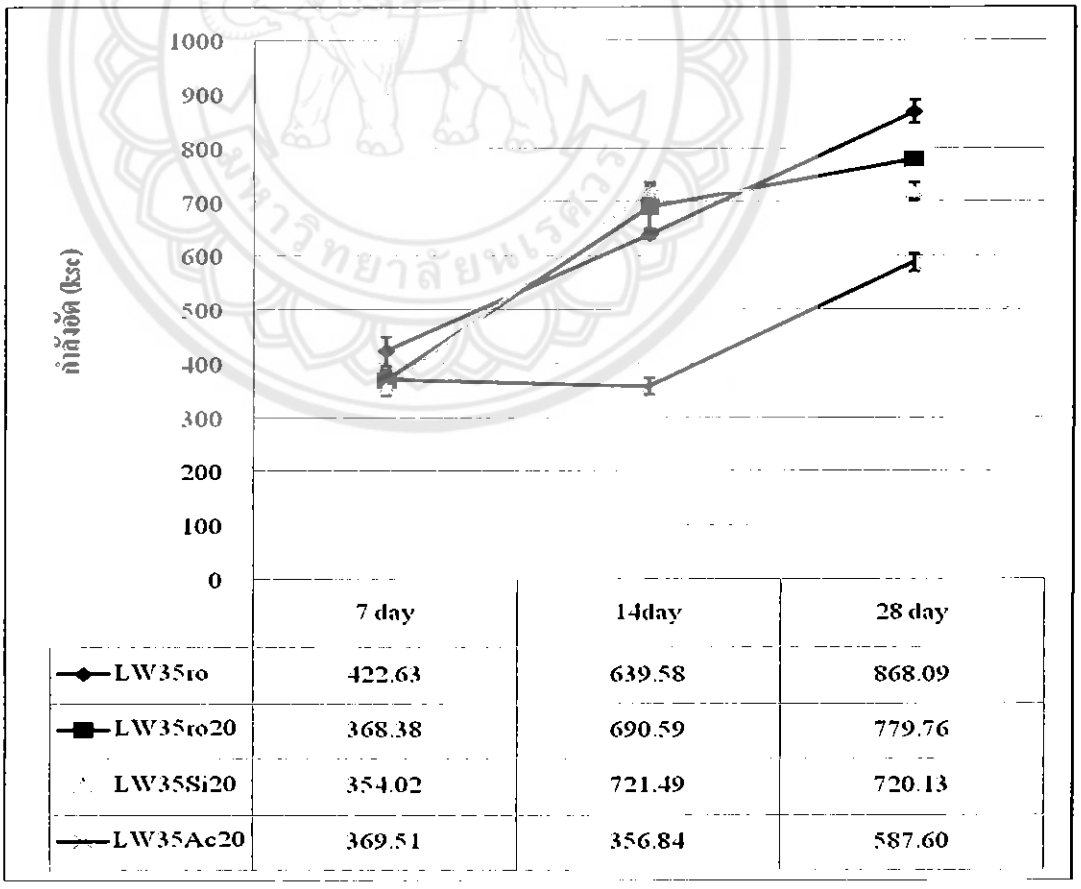
ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

ในการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าจะมีปัจจัยที่ศึกษาอยู่ 3 ประการ คือ ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม ผลของการปรับปรุงพื้นผิวและ ผลของความพรุน โดยผลของการปรับปรุงพื้นผิวนั้นจะศึกษาโดยการเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมและผลของความพรุนนั้นจะศึกษาโดยเปรียบเทียบกับถ่านที่มีความพรุนต่างกัน

4.1.1 ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของซีเมนมอร์ต้า

วัสดุที่นำมาผสมเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash), ซิลิกาฟูม (Silica Fume), ถ่านกัมมันต์ C1 (Activated Carbon) เพื่อทดสอบว่าวัสดุชนิดใดให้กำลังอัดที่ดีที่สุดซึ่งในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่35% และอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก20% ซึ่งจะได้ผลของกำลังอัดดังรูปที่ 4.1



	7 day	14day	28 day
LW35ro	422.63	639.58	868.09
LW35ro20	368.38	690.59	779.76
LW35Si20	354.02	721.49	720.13
LW35Ac20	369.51	356.84	587.60

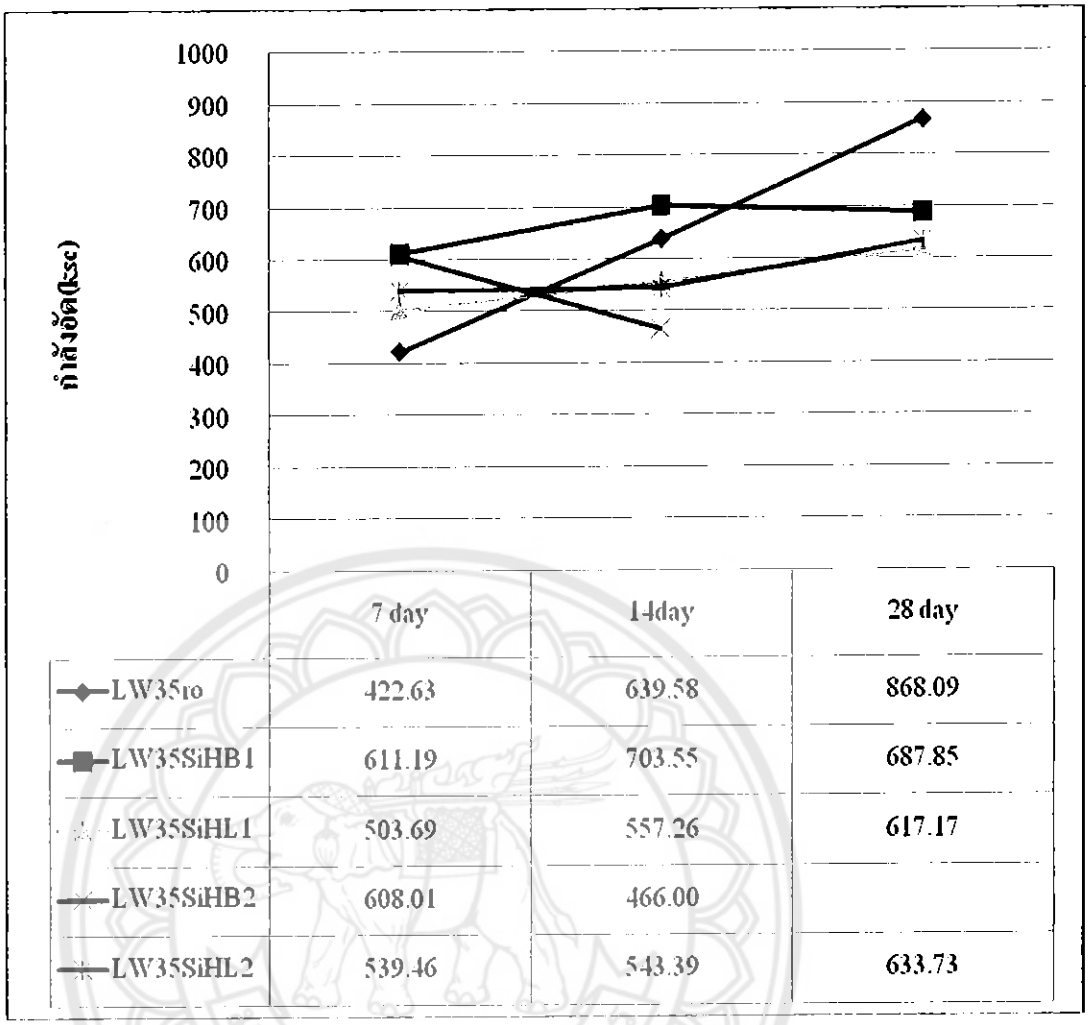
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกัน

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกันจากผลการทดลองพบว่า การทดสอบซีเมนต์มอร์ต้าที่อายุ 7วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย(LW35r20),ซิลิกาฟูม(LW35Si20)และถ่านกัมมันต์ (LW35Ac20)มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกันและมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าค่ากำลังอัดควบคุมเล็กน้อย ที่อายุการทดสอบ 14วันพบว่าการแทนที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมมีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 721.49 กก/ซม^{2}และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 356.84 กก/ซม^2 ที่อายุการทดสอบ 28วันพบว่าค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดสูงที่สุดแต่น้อยกว่าค่ากำลังอัดควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 779.76 กก/ซม^2 และค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์มีค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 587.60 กก/ซม^2

จากผลการทดลอง พบว่า ค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยมีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด และค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ มีค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายกับมวลรวม (Inert) ซึ่งเมื่อไปแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้มีค่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้น เป็นผลทำให้มีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดได้ต่ำลง

4.1.2 ผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

ในการศึกษาปัจจัย ผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35%และการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่1%และ2% ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว 2 ชนิดคือ ซิลิการฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (SiHB)และซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ(SiHL) ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



	7 day	14day	28 day
LW35ro	422.63	639.58	868.09
LW35SiHB1	611.19	703.55	687.85
LW35SiHL1	503.69	557.26	617.17
LW35SiHB2	608.01	466.00	
LW35SiHL2	539.46	543.39	633.73

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

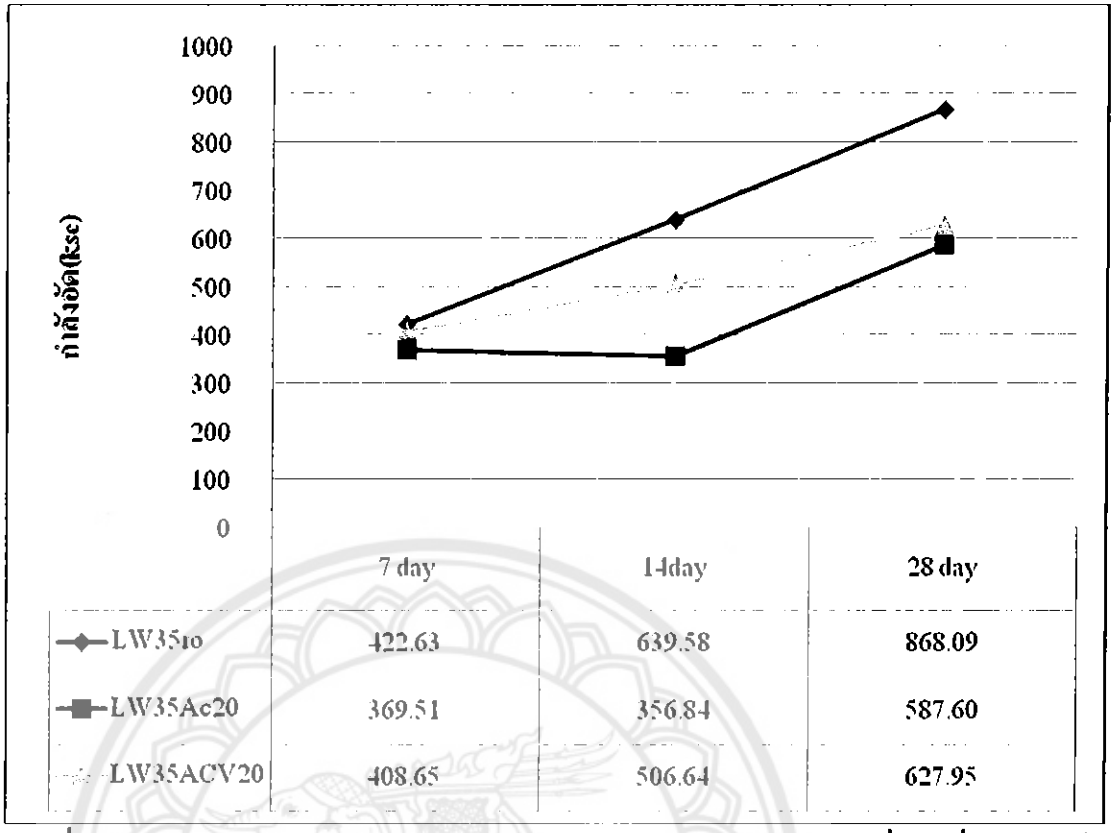
จากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจากผลการทดลอง ที่อายุการทดสอบ 7วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ 1% (LW35SiHB1)มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 611.19 กก/ซม^{2}และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ 1%(LW35SiHL1)มีค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุดซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 503.69 กก/ซม^2 ที่อายุการทดสอบกำลังอัด 14วันพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ 1%มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดและสูงกว่าค่ากำลังอัดควบคุม(LW35r0)ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 703.55 กก/ซม^{2}และการการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ 2%(LW35SiHB2)มีค่ากำลังอัดต่ำที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 466 กก/ซม^2 ที่อายุการทดสอบกำลังอัดที่ 28วันพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ1%ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดแต่น้อยกว่าค่า

กำลังอัดควบคุมโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 687.85 กก/ซม^{2}และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ1%มีค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 617.77 กก/ซม^2

จากผลการทดลองพบว่า ที่ 7 วัน ค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำที่ 1 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดที่สูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำนั้น มีการแยกตัวออกจากน้ำไปแทรกตัวอยู่บริเวณผิวและช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ (Micro filler Effect) ทำให้เนื้อซีเมนต์มอร์ต้ามีความทึบแน่นมากขึ้น ส่งผลให้สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น และที่ 14 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดมีการเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำเกาะอยู่บริเวณผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้ปูนซีเมนต์และน้ำทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ยากขึ้น จึงทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย ส่วนค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ 1 เปอร์เซ็นต์ และค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำ 2 เปอร์เซ็นจะเห็นว่าค่ากำลังอัดลดลงจากเดิม ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาเคมี หรือ คุณสมบัติทางกล ของซิลิกาฟูมที่มีต่อซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

4.1.3 ผลของถ่านที่มีความพรุนต่างกันต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35%และอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่ 20% และถ่านที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้มี 2 ตัวอย่าง คือ ถ่านกัมมันต์ C1 และถ่านกัมมันต์ C2 และที่ถ่านทั้ง 2 ตัวอย่างนี้ ถ่านกัมมันต์ C1 จะมีความพรุนตัวสูงที่สุดรองลงมาคือถ่านกัมมันต์ C2 จะมีความพรุนตัวน้อยกว่า C1 ซึ่งจากผลการทดลองจึงได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน จากผลการทดลองที่อายุการทดสอบ 7 วันพบว่าถ่านกัมมันต์ C2 (LW35ACV20) มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ C1 แต่ยังมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าค่ากำลังอัดควบคุม (LW35r0) ซึ่งถ่านกัมมันต์ C2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 408.65 กก/ซม^{2}และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 (LW35Ac20) มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ C2 โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 369.51 กก/ซม^2 ที่อายุการทดสอบ 14 วันพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C2 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าถ่านกัมมันต์ C1 แต่ยังน้อยกว่าค่ากำลังอัดควบคุมโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 506.64 กก/ซม^2 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 (LW35Ac20) ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดโดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 356.84 กก/ซม^{2}และที่อายุการทดสอบที่ 28 วัน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 และ C2 มีว่ากำลังอัดที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C2 จะมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 627.95 กก/ซม^2 ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านถัมมันต์ C1 จะมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 587.60 กก/ซม^2

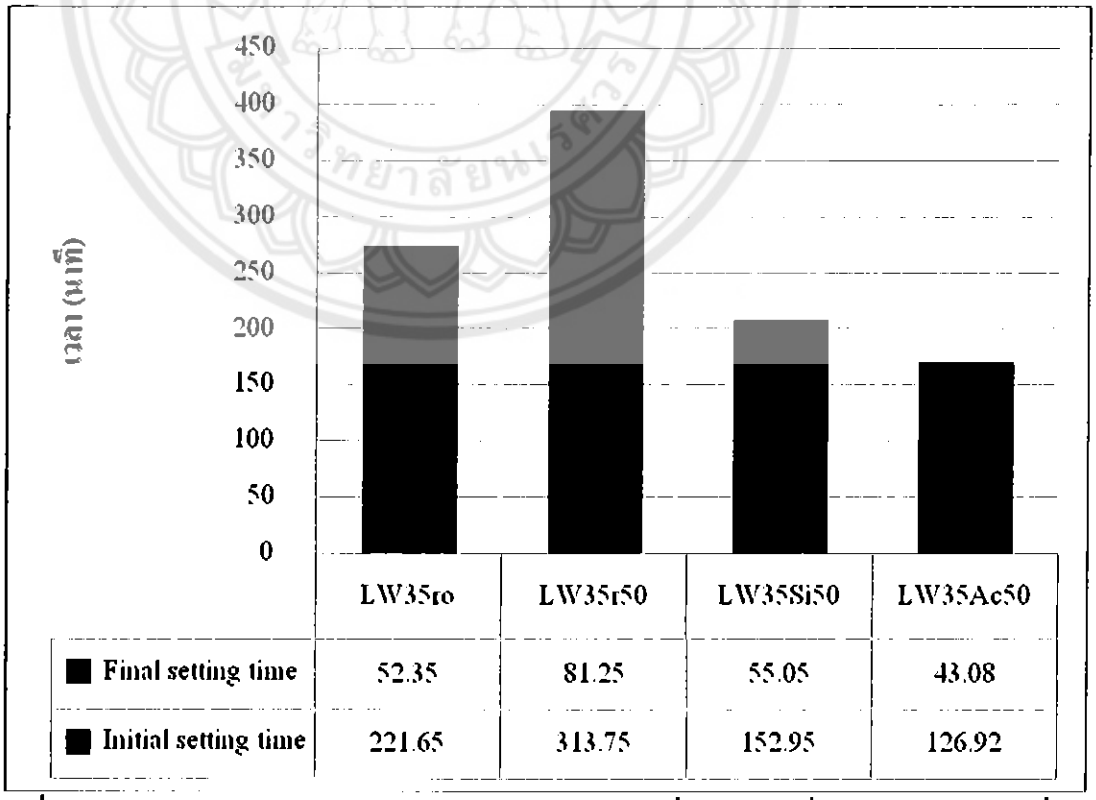
จากผลการทดลอง พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C2 มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุมวลรวม (Inert) จึงทำหน้าที่คล้ายมวลรวมละเอียด ประกอบกับโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ C2 มีความพรุนตัวน้อยกว่า ถ่านกัมมันต์ C1 ทำให้มีความแข็งแรงของโครงสร้างถ่านมากกว่า เป็นผลทำให้มีการถ่ายน้ำหนักภายในโครงสร้างมอร์ต้า จึงทำให้มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดีกว่า

4.2 ผลของวัสดุผสมเพิ่มต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ในการศึกษาผลของการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ จะมีปัจจัยที่ศึกษาอยู่ 3 ประการ คือ ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม ผลของการปรับปรุงพื้นผิวและ ผลของความพรุนโดยผลของการปรับปรุงพื้นผิวนั้น จะศึกษาโดยการเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมและผลของความพรุนนั้นจะศึกษาโดยเปรียบเทียบกับถ่านที่มีความพรุนต่างกัน

4.2.1 ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่มต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ในการศึกษาและทดลองนี้ได้มีการใช้วัสดุที่ต่างชนิดกันคือ เถ้าลอย (Fly Ash) ซิลิกาฟูม และถ่านกัมมันต์ C1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35% และอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ 35% เท่ากันหมดทุกส่วนผสมซึ่งจากการทดลองมีผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกัน

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกันจากผลการทดลอง ที่ระยะการก่อตัวขั้นต้นพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยด้วยถ่านกัมมันต์ C1 (LW35Ac50) มีการใช้ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นที่เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเท่ากับ 126.92 นาที ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (LW35r50) ใช้เวลาในการก่อตัวขั้นต้นนานที่สุดโดยใช้ระยะเวลาในการก่อตัวเท่ากับ 313.75 นาที และที่ระยะเวลาในการก่อตัวขั้นปลาย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะใช้เวลาในการก่อตัวขั้นปลายนานที่สุด เท่ากับ 81.25 นาที ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ จะใช้เวลาในการก่อตัวขั้นปลายได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเท่ากับ 43.08 นาที

จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์และซิลิกาฟูม จะใช้ระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นและขั้นปลายเร็วที่กว่า การใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นและขั้นปลายได้ช้าที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเถ้าลอยเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกซ์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดช้าลง เป็นผลทำให้ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวที่ช้าลง ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์และซิลิกาฟูมนั้น อาจจะมีการดูดซับน้ำไว้ที่ผิว เป็นผลทำให้มีน้ำทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเร็วขึ้น เป็นผลทำให้ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น

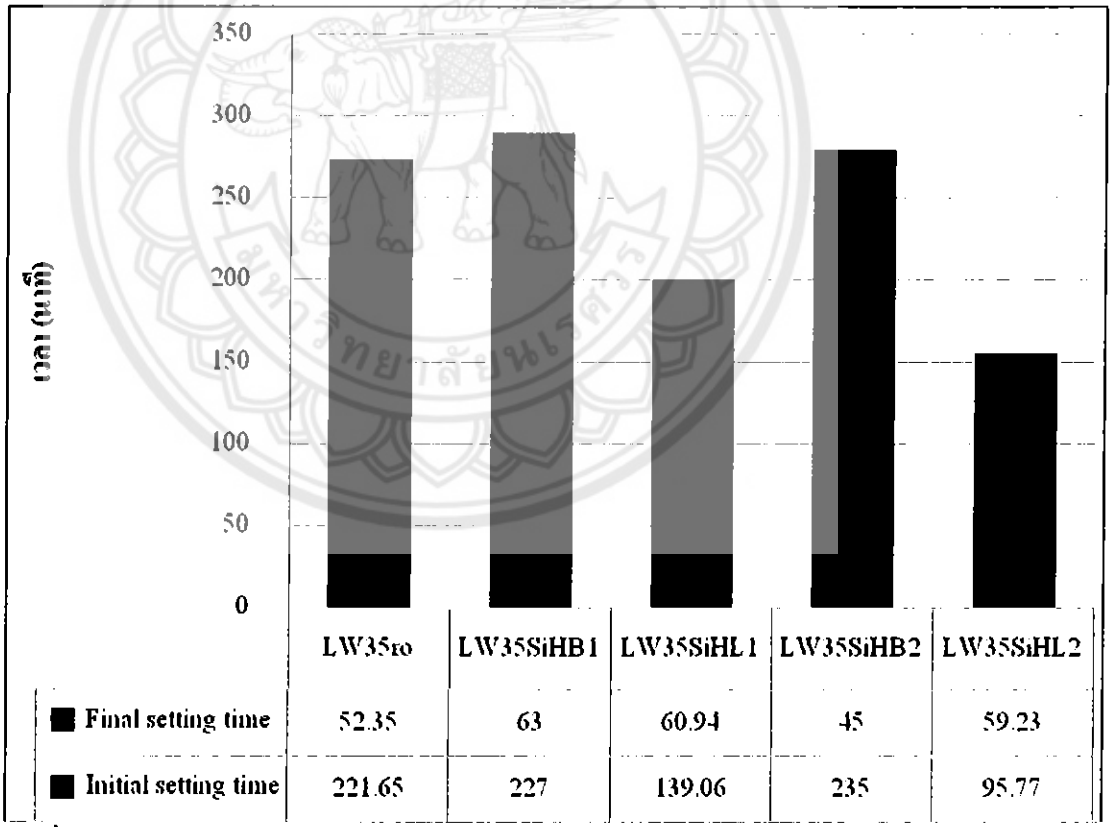
4.2.2 ผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ในการศึกษานี้ได้ใช้ซิลิกาฟูมซึ่งได้มีการปรับปรุงเคมีพื้นผิวซึ่งมี 2ชนิดคือซิลิกาฟูที่มีเคมีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Silica Fume)และซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำ(Hydrophilic Silica Fume) ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 35% และใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ 1% และ 2% ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำที่ 2%(LW35SiHL2)จะใช้เวลาในการก่อตัวขั้นต้นเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเท่ากับ 95.77นาทีส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำที่ 2%(LW35SiHB2)จะใช้ระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นได้นานที่สุดโดยใช้เวลาเท่ากับ 235นาทีและที่ระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลายพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำที่ 2%จะใช้

เวลาในการก่อตัวได้เร็วที่สุดซึ่งเท่ากับ 45นาทีส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำที่ 1%(LW35SiHB1)จะใช้เวลาในการก่อตัวนานที่สุดโดยใช้เวลาเท่ากับ 63นาที

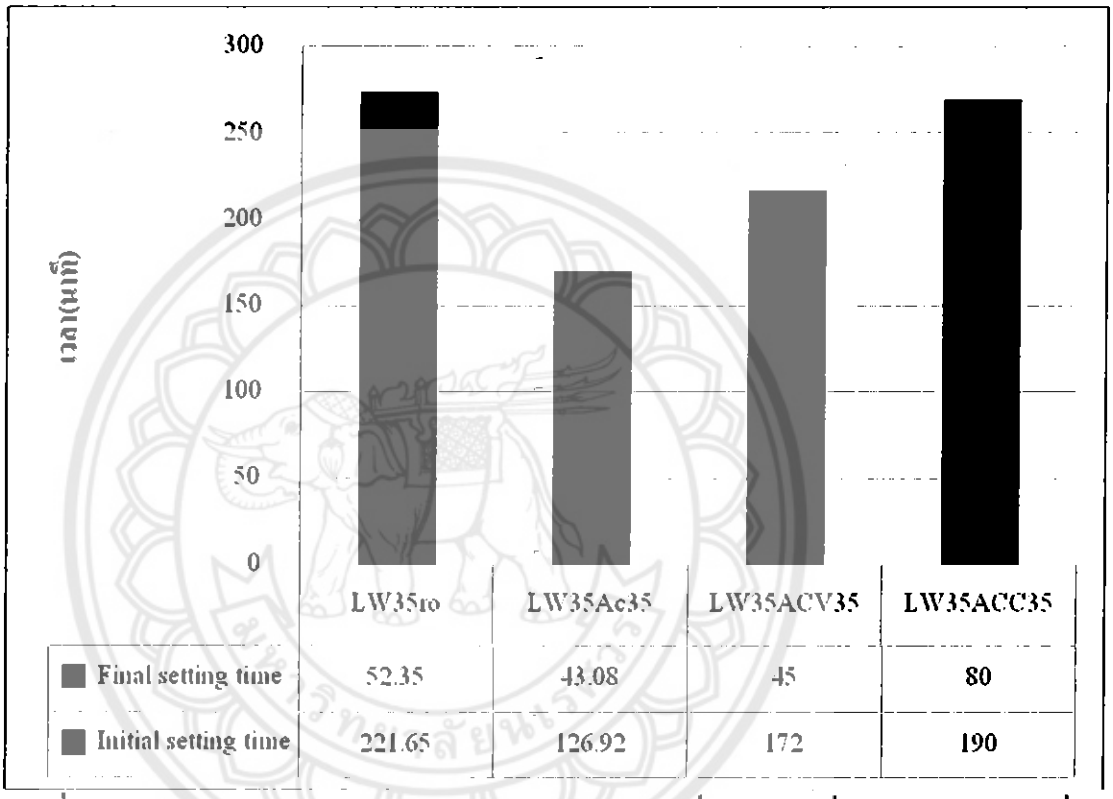
จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำจะใช้ระยะเวลาในการก่อตัวได้เร็วที่สุดและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำจะใช้เวลาในการก่อตัวได้ช้าที่สุดทั้งนี้อาจเพราะว่าซิลิกาฟูมแบบไม่ชอบน้ำเมื่อไปเกาะตามผิวซีเมนต์จะทำให้น้ำทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนั้นช้าลงทำให้มีการใช้ระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้นส่วนซิลิกาฟูมแบบชอบน้ำจะมีการดูดซับน้ำเอาเอาไว้ที่ผิวของซิลิกาฟูมทำให้มีน้ำที่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์น้อยลงเป็นผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนั้นเกิดเร็วขึ้นจึงส่งผลทำให้มีการใช้ระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

4.2.3 ผลของถ่านที่มีความพรุนต่างกันต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ในการศึกษาปัจจัยนี้ได้ใช้ถ่าน 2 ชนิดคือถ่านกัมมันต์ และถ่านครัวเรือน โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวอย่าง คือ ถ่านกัมมันต์ C1 และถ่านกัมมันต์ C2 ซึ่งถ่านแต่ละตัวจะมีความพรุนที่แตกต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์ C1 มีความพรุนสูงที่สุด รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ C2 และถ่านครัวเรือนตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่**ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านที่มี**ความพรุนแตกต่างกัน

จากผลการทดลอง พบว่า ที่ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 (LW35AC35) ใช้เวลาในการก่อตัวได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเท่ากับ 126.92 นาที ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่นานที่สุด คือ ส่วนผสมควบคุม (LW35r0) โดยใช้เวลาเท่ากับ 221.65 นาที และที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ C1 (LW35AC35) จะใช้เวลาในการก่อตัวเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเท่ากับ 43.08 นาที ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านครัวเรือนจะใช้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายนานที่สุด โดยใช้เวลาเท่ากับ 80 นาที

จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น การผสมถ่านครัวเรือน หรือถ่านกัมมันต์ จะใช้เวลาในการก่อตัวได้เร็วกว่าการไม่ใส่ถ่านลงในส่วนผสม ทั้งนี้เพราะว่า ถ่านกัมมันต์และถ่านครัวเรือนมีการดูดซับน้ำไว้ที่ตัวถ่านทำให้มีน้ำในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้น้อยลง ทำให้ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เร็วขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น และที่ระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลายการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านครัวเรือนจะใช้เวลานานที่สุดทั้งนี้อาจเพราะ ถ่านครัวเรือนมีการคายน้ำออกมา ทำให้ปูนซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยากับน้ำต่อ ทำให้การก่อตัวสุดท้ายนั้นช้าลง ซึ่งแตกต่างจากถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อดูดซับน้ำไปแล้วจะไม่มีการคายน้ำออกเป็นผลให้ไม่มีน้ำมาทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ จึงไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวสุดท้าย

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 ผลของชนิดของวัสดุผสมเพิ่ม

จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยจะให้กำลังอัดสูงสุด เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์และเถ้าลอยยังทำให้เกิดการก่อตัวได้ช้า เพราะเถ้าลอยไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมถ่านกัมมันต์จะให้กำลังอัดที่ต่ำที่สุด อาจเพราะว่าถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติคล้ายวัสดุมวลรวม (Inert) และยังมีความพรุนตัวสูงซึ่งอาจจะดูดน้ำมาไว้บริเวณผิวทำให้เกิดการก่อตัวที่เร็วขึ้น

5.1.2 ผลของการปรับปรุงพื้นผิว

จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ 1% ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดซึ่งอาจเป็นเพราะซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำไปแทรกตัวอยู่บริเวณช่องว่างและผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ (Micro filler Effect) เช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ 2% ซึ่งหลังจากนั้นจะเห็นว่า กำลังอัดมีค่าลดลงจากเดิม ซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไป ส่วนการก่อตัวจะเห็นว่าซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำจะเกิดการก่อตัวได้เร็วกว่าซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้เพราะ ซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบชอบน้ำมีการดูดซับน้ำ ทำให้มีการก่อตัวได้เร็วกว่าซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ

5.1.3 ผลของถ่านที่มีความพรุนแตกต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนน้อยจะทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่ดีกว่า การแทนที่ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนตัวสูง อาจเป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคล้ายกับมวลรวม (Inert) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนตัวน้อย จะมีโครงสร้างถ่านที่แข็งแรงกว่า ส่งผลให้มีการรับแรงและถ่านแรงได้ดีกว่า ทำให้สามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่า ส่วนในด้านการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่า การผสมถ่านและถ่านกัมมันต์แทนที่ปูนซีเมนต์มีผลต่อการก่อตัวที่เร็วขึ้น และยิ่งถ่านมีความพรุนตัวสูง ก็จะยิ่งทำให้มีการก่อตัวที่เร็วขึ้น เพราะว่า ถ่านที่มีความพรุนตัวสูง จะดูดซับน้ำไว้ในตัวถ่าน ทำให้มีน้ำที่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้น้อยลง เป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มีการก่อตัวที่เร็วขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเจาะจงในผลของซิลิกาฟูมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวและถ่านกัมมันต์ เพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดในด้านของกำลังอัด

2. ควรมีการศึกษาผลของการหดตัวโดยใช้วัสดุในโครงงานนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาคอนกรีตต่อไป

3. ในการผสมซิลิกาฟูมที่มีพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ ในแต่ละครั้งมีความยากมากต้องอาศัยเทคนิคและการผสมที่ละน้อย เพราะหากผสมรวดเดียว จะทำให้ปูนซีเมนต์ไม่สามารถจับตัวกับน้ำได้

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.

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก1 การหาค่าความถ่างจำเพาะมวลรวมละเอียด 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	

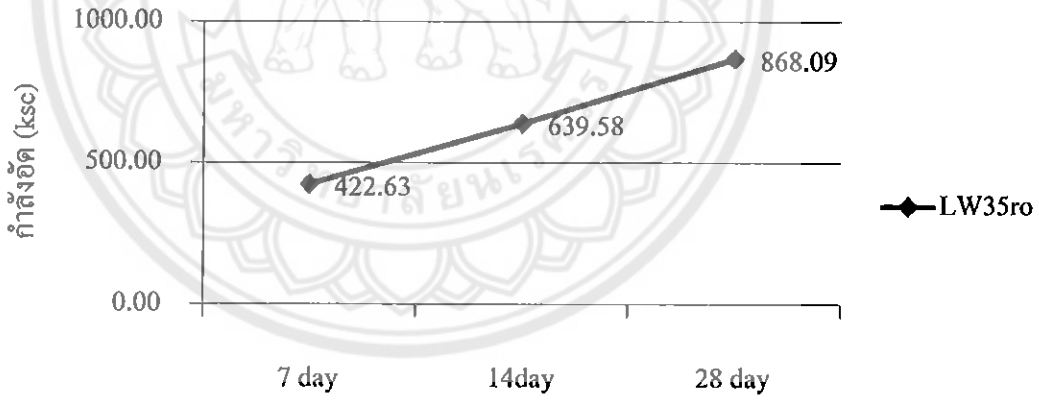
ภาคผนวก ข

ตารางและกราฟแสดงกำลังอัดของแต่ละส่วนผสม

ตารางที่ ข1 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35r0

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.00	5.10	5.10	5.03	101.00	111.00	403.75	441.52	422.63
14	5.00	5.10	5.07	5.03	163.00	157.00	651.60	627.56	639.58
28	5.10	5.07	5.00	5.09	224.00	213.00	883.08	853.10	868.09

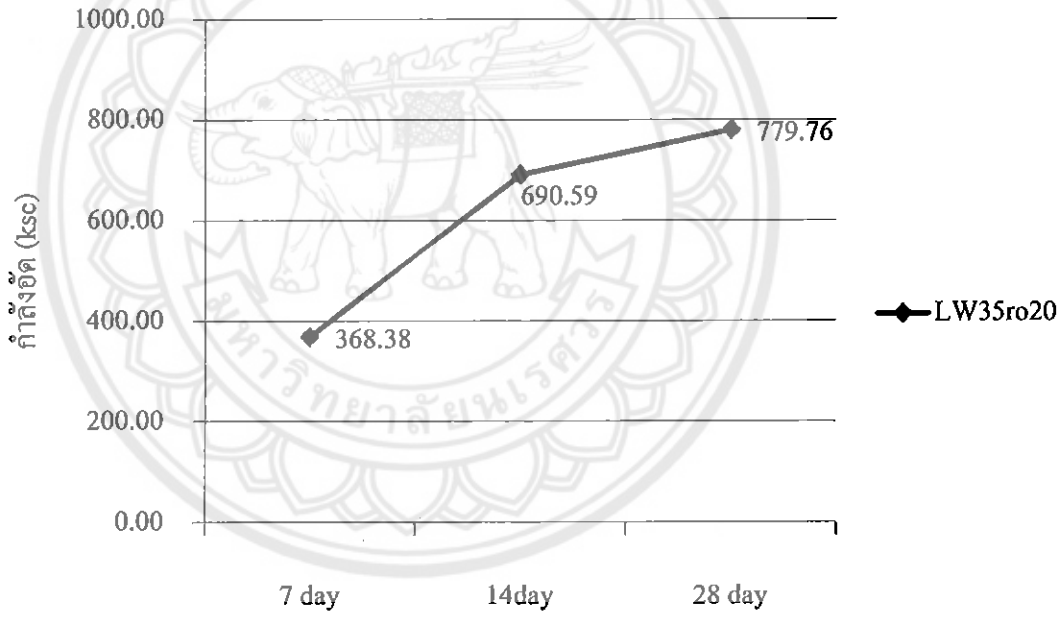
รูปที่ ข1 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35r0



ตารางที่ ข2 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35ro20

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.03	5.02	5.00	4.97	88.00	93.00	355.26	381.49	368.38
14	5.10	5.07	5.08	5.08	174.00	176.00	685.97	695.21	690.59
28	5.00	5.02	5.02	5.00	190.00	194.00	771.63	787.88	779.76

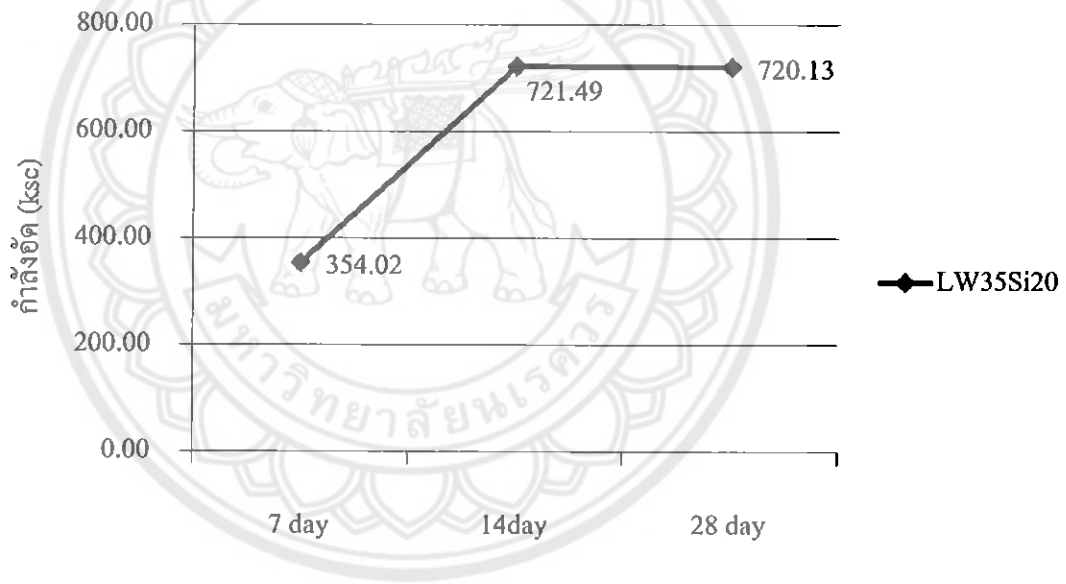
รูปที่ ข2 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35ro20



ตารางที่ ข3 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35Si20

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.10	5.00	5.00	5.04	85.00	91.00	339.79	368.25	354.02
14	5.07	5.07	5.10	5.07	173.00	192.00	686.06	756.93	721.49
28	5.07	5.05	5.03	5.07	172.00	189.00	684.79	755.47	720.13

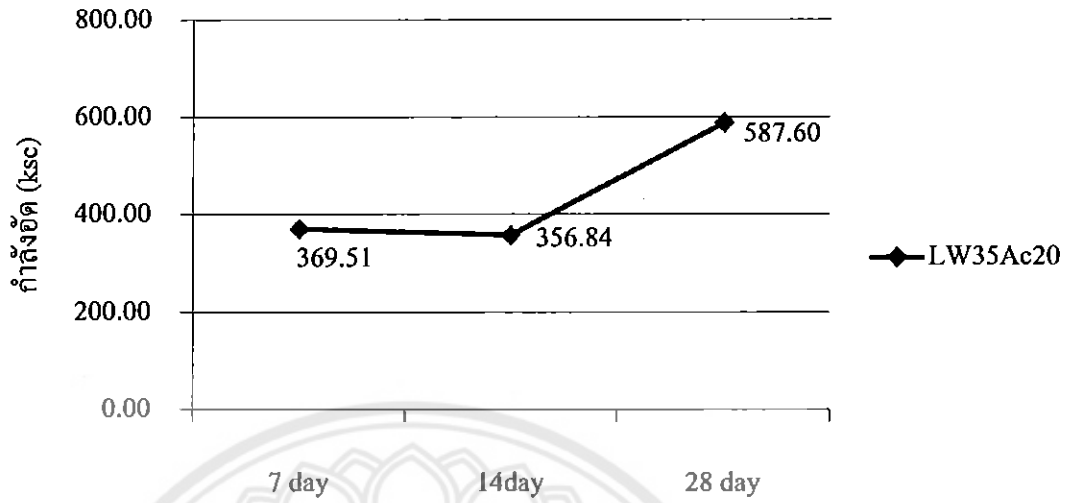
รูปที่ ข3 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35Si20



ตารางที่ ข4 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35Ac20

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.03	5.07	5.02	5.03	95.00	89.00	379.73	359.29	369.51
14	5.00	4.98	5.18	5.00	83.00	95.00	339.79	373.90	356.84
28	5.06	5.17	5.15	5.06	148.00	153.00	576.70	598.50	587.60

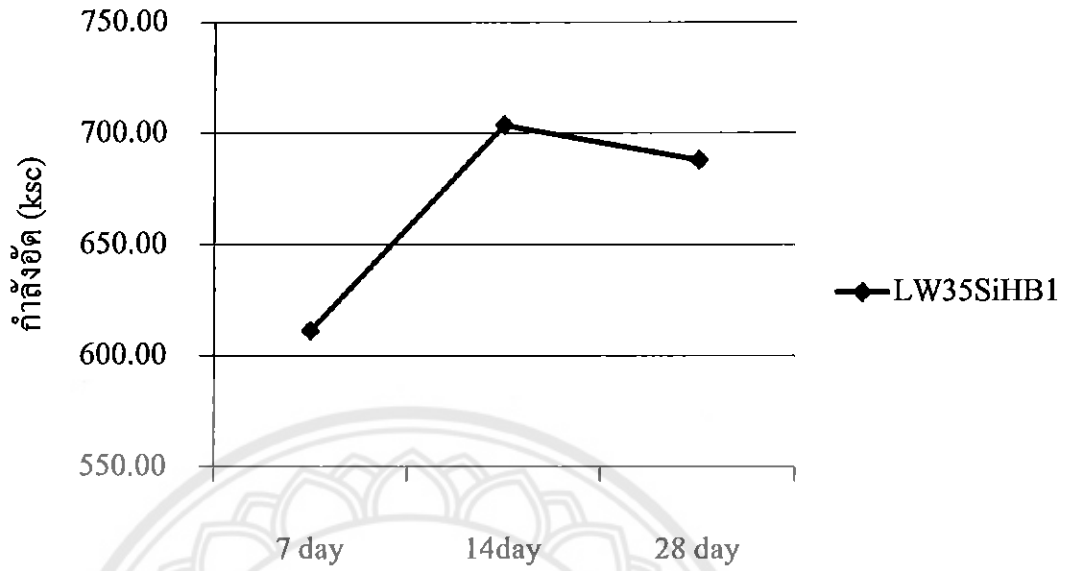
รูปที่ ข4 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35Ac20



ตารางที่ ข5 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHB1

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.00	5.12	5.00	5.05	162.00	143.00	645.07	577.31	611.19
14	5.00	5.10	5.00	5.07	183.00	168.00	731.55	675.56	703.55
28	5.17	5.00	5.02	5.10	168.00	179.00	663.00	712.71	687.85

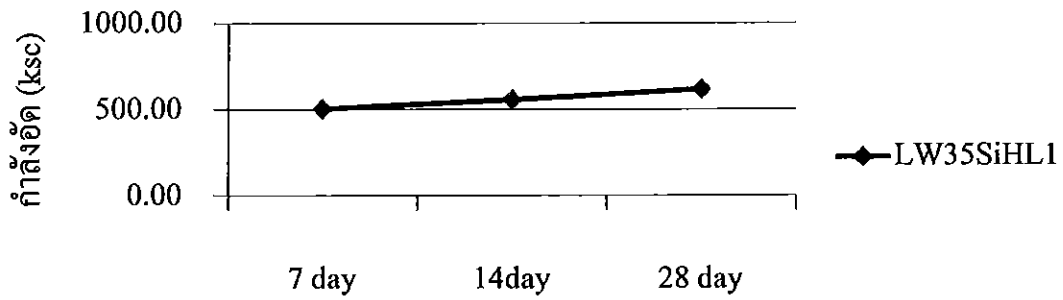
รูปที่ ข5 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHB1



ตารางที่ ข6 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHL1

ทดสอบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัด
ที่ (วัน)	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	เฉลี่ย (ksc)
7	5.10	5.00	5.10	5.00	132.00	120.00	527.67	479.70	503.69
14	5.00	5.07	5.00	5.10	136.00	142.00	546.88	567.65	557.26
28	5.04	5.15	5.06	5.22	161.00	156.00	632.29	602.05	617.17

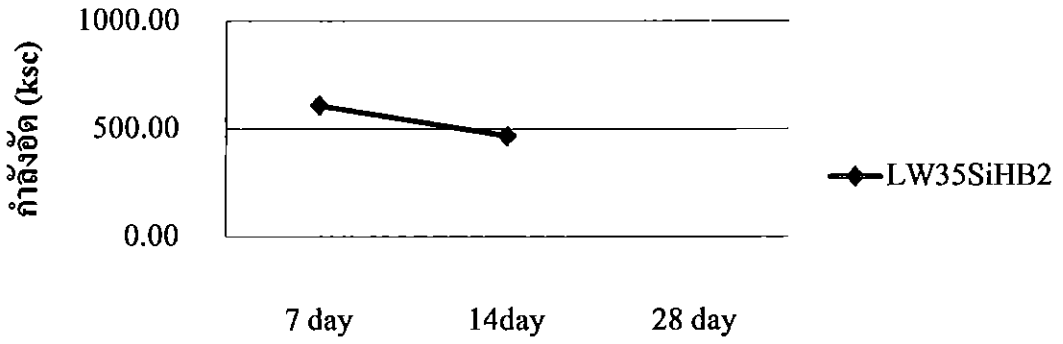
รูปที่ ข6 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHL1



ตารางที่ ข7 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHB2

ทดสอบ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัด
ที่ (วัน)	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	เฉลี่ย (ksc)
7	5.00	5.08	5.08	5.00	151.00	152.00	606.00	610.02	608.01
14	5.18	5.05	5.00	5.18	121.00	117.00	471.51	460.49	466.00
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-

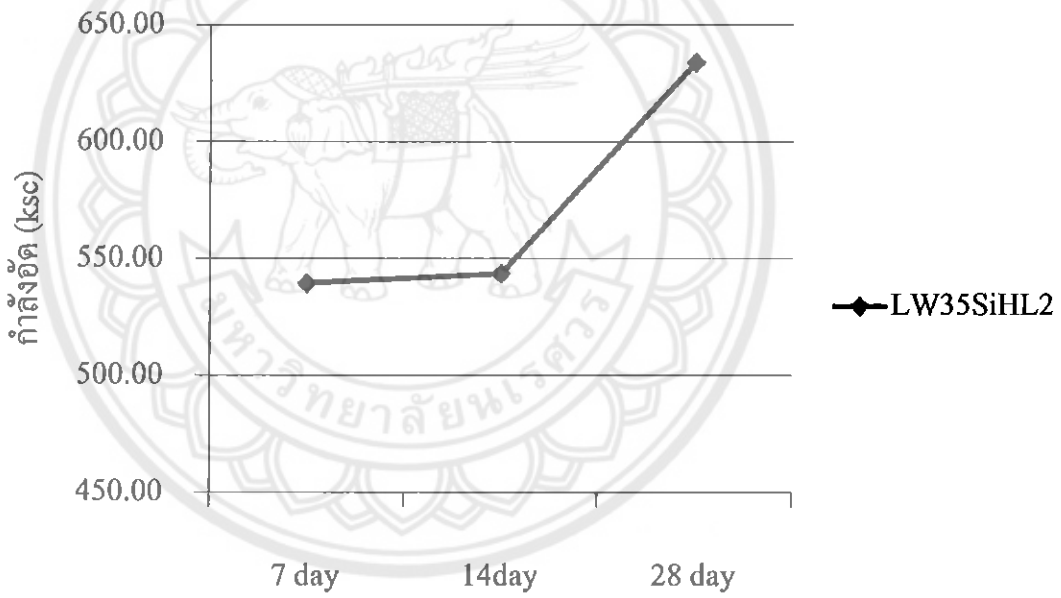
รูปที่ ข7 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHB2



ตารางที่ ข8 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHL2

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.00	5.05	5.07	5.20	137.00	136.00	553.08	525.85	539.46
14	5.07	5.07	5.07	5.03	141.00	132.00	559.16	527.63	543.39
28	5.05	5.27	5.10	5.19	164.00	166.00	628.16	639.30	633.73

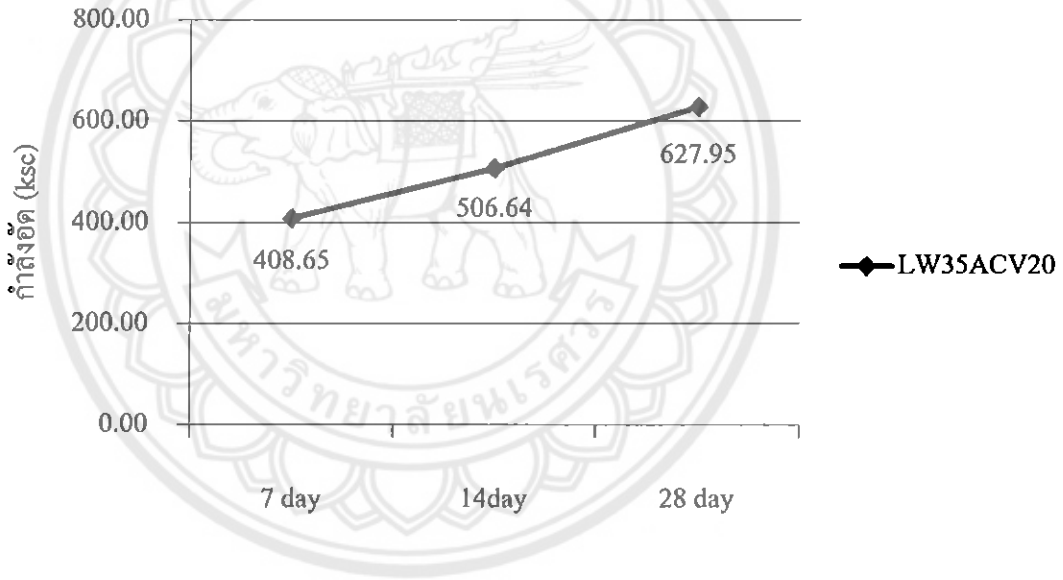
รูปที่ ข8 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35SiHL2



ตารางที่ ข9 การทดสอบกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35ACV20

ทดสอบที่ (วัน)	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		แรงกด (kN)		กำลังอัด (ksc)		กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)
	กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
7	5.14	5.12	5.05	5.26	111.00	101.00	429.70	387.59	408.65
14	5.06	5.14	5.25	5.05	131.00	130.00	513.44	499.83	506.64
28	5.14	5.20	5.08	5.19	160.00	167.00	610.22	645.68	627.95

รูปที่ ข9 กราฟแสดงกำลังอัดในซีเมนต์มอร์ต้าของส่วนผสม LW35ACV20



ภาคผนวก ค

ตารางและกราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของแต่ละส่วนผสม

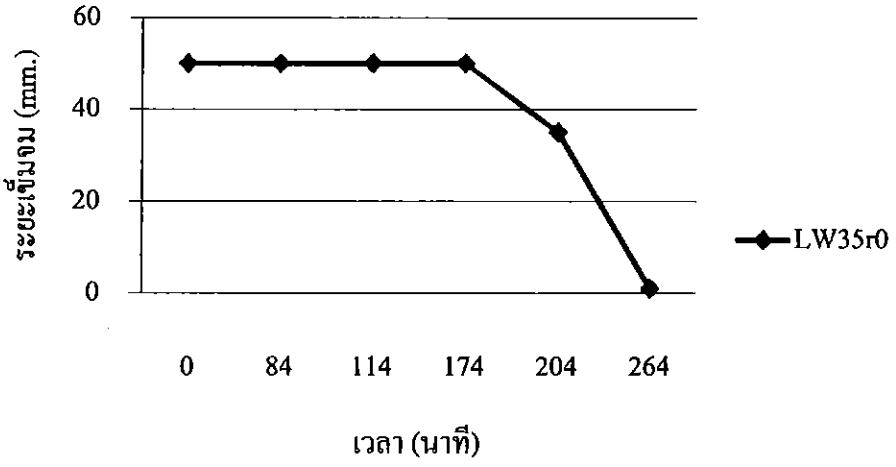
ตารางที่ ค1 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35r0

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
12:06	0	50	0
13:30	1:24	50	84
14:00	1:54	50	114
15:00	2:54	50	174
15:30	3:24	35	204
16:30	4:24	1	264
16:35	4:29	x	269
16:40	4:34	y	274
Initial setting time			221.65
Final setting time			274

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค1 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35r0



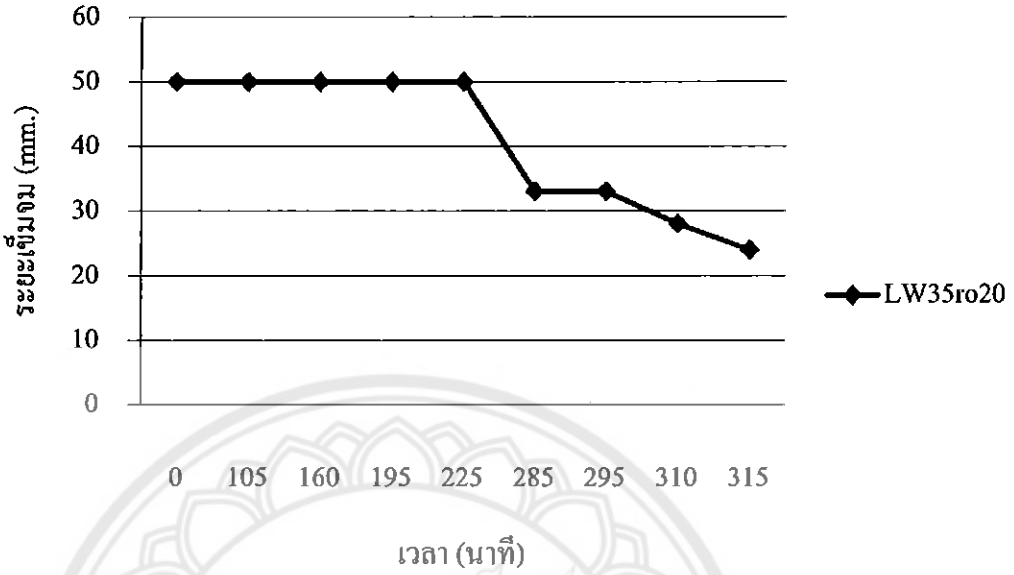
ตารางที่ ค2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ro20

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
11:45	0	50	0
13:30	1:45	50	105
14:25	2:40	50	160
15:00	3:15	50	195
15:30	3:45	50	225
16:30	4:45	33	285
16:40	4:55	33	295
16:55	5:10	28	310
17:00	5:15	24	315
17:10	5:25	x	325
17:20	5:35	x	335
17:40	5:55	x	355
18:00	6:15	x	375
18:10	6:25	x	385
18:20	6:35	y	395
Initial setting time			313.75
Final setting time			395

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค2 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ro20



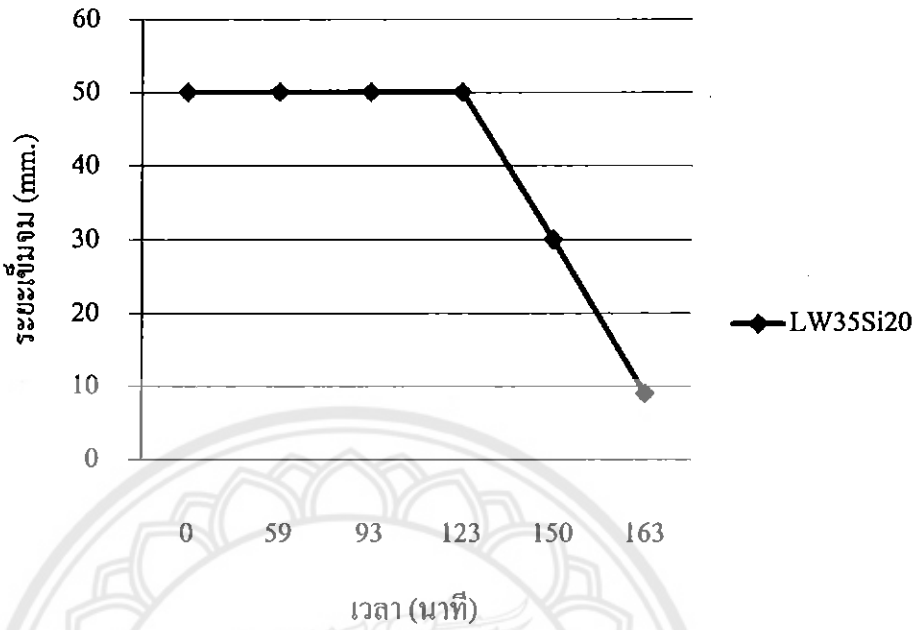
ตารางที่ ค3 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35Si20

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
11:57	0	50	0
12:56	0:59	50	59
13:30	1:33	50	93
14:00	2:03	50	123
14:27	2:30	30	150
14:40	2:43	9	163
14:50	2:53	x	173
15:00	3:03	x	183
15:25	3:28	y	208
Initial setting time			153.09
Final setting time			208

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค3 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35Si20



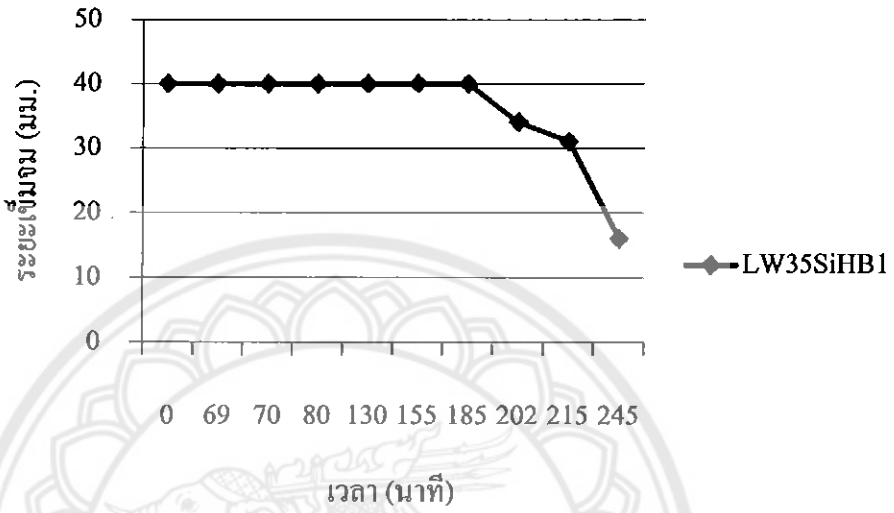
ตารางที่ ค4 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHB1

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
14:25	0	40	0
15:34	1:09	40	69
15:35	1:10	40	70
15:45	1:20	40	80
16:35	2:10	40	130
17:00	2:35	40	155
17:30	3:05	40	185
17:47	3:22	34	202
18:00	3:35	31	215
18:30	4:05	16	245
19:00	4:35	x	275
19:15	4:50	y	290
Initial setting time			227
Final setting time			290

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค4 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHB1



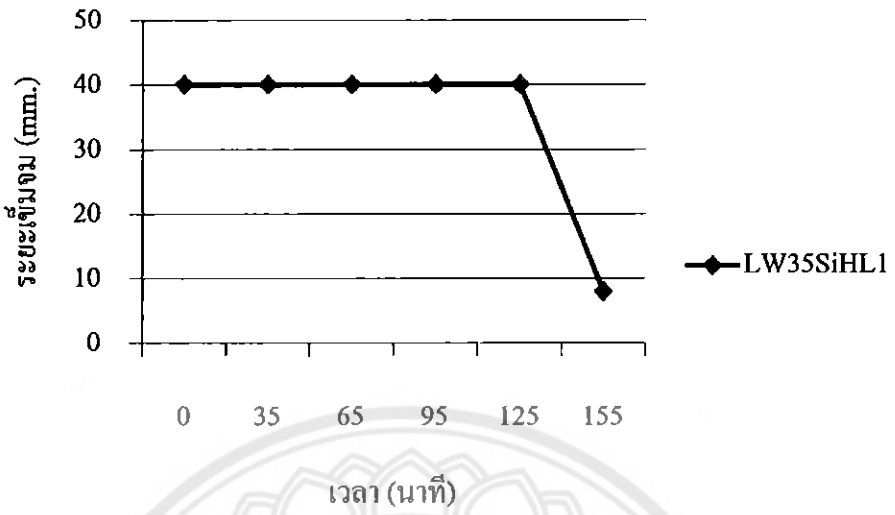
ตารางที่ ค5 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHL1

เวลา	ระยะเลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
21:05	0	40	0
21:40	35	40	35
22:10	30	40	65
22:40	30	40	95
23:10	30	40	125
23:40	30	8	155
0:00	20	x	175
0:15	15	x	190
0:25	10	y	200
Initial setting time			139.06
Final setting time			200

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค5 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHL1



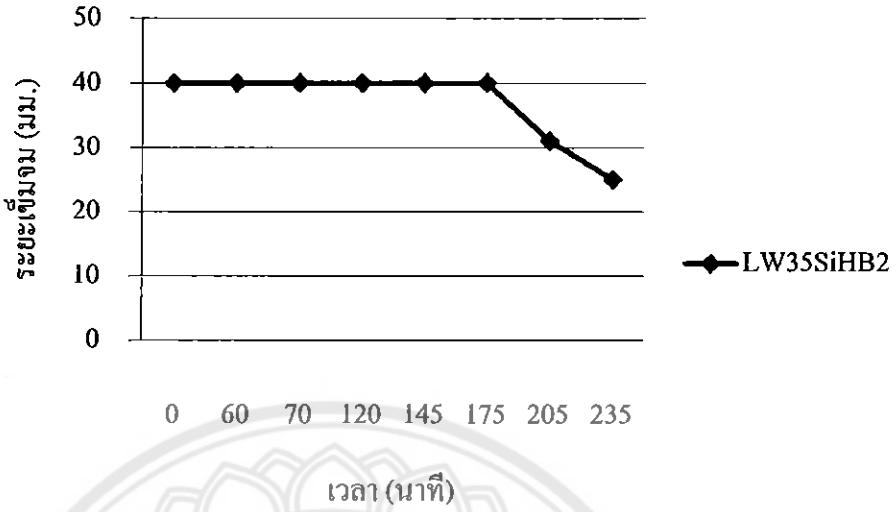
ตารางที่ ค6 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHB2

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
14:35	0	40	0
15:35	1:00	40	60
15:45	1:10	40	70
16:35	2:00	40	120
17:00	2:25	40	145
17:30	2:55	40	175
18:00	3:25	31	205
18:30	3:55	25	235
19:00	4:25	x	265
19:15	4:40	y	280
Initial setting time			235
Final setting time			280

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค6 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHB2



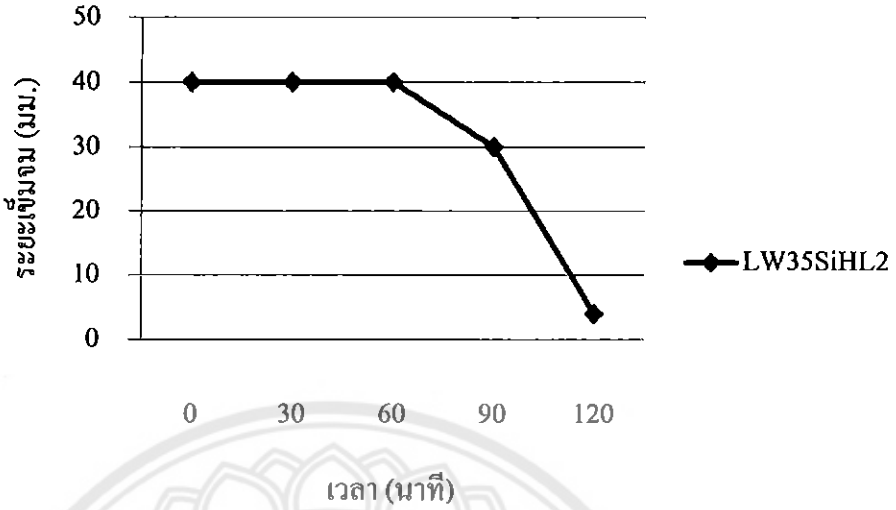
ตารางที่ ค7 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHL2

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
21:40	0	40	0
22:10	30	40	30
22:40	30	40	60
23:10	30	30	90
23:40	30	4	120
0:00	20	x	140
0:15	15	y	155
Initial setting time			95.77
Final setting time			155

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค7 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35SiHL2



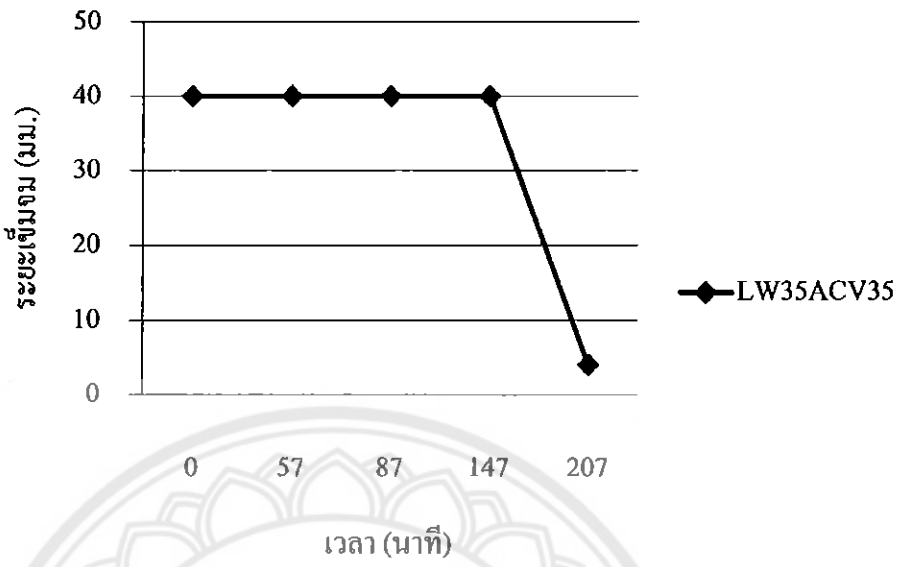
ตารางที่ ค8 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ACV35

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
13.33	0	40	0
14.30	57	40	57
15.00	30	40	87
16.00	60	40	147
17.00	60	4	207
17.05	5	x	212
17.10	5	y	217
Initial setting time			172
Final setting time			217

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค8 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ACV35



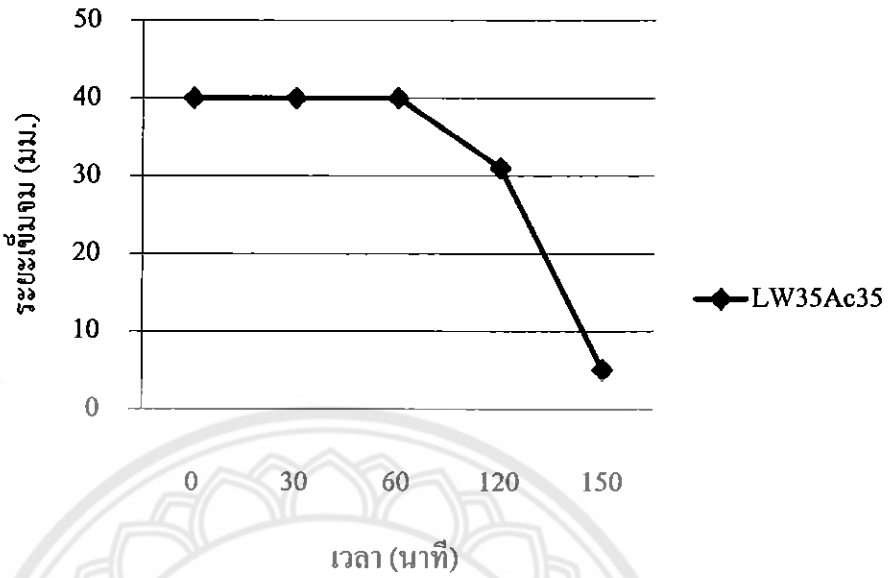
ที่ ค9 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35Ac35

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
14.05	0	40	0
14.35	30	40	30
15.05	30	40	60
16.05	60	31	120
16.35	30	5	150
16.40	5	x	155
16.45	5	x	160
16.50	5	x	165
16.55	5	y	170
Initial setting time			126.92
Final setting time			170

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค9 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35Ac35



ที่ ค10 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ACC35

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
14.25	0	40	0
15.25	60	40	60
16.25	60	40	120
17.05	40	32	160
17.20	15	30	175
17.35	15	25	190
17.45	10	x	200
17.55	10	x	210
18.05	10	x	220
18.15	10	x	230
18.25	10	x	240
18.35	10	x	250

ที่ ค10 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ACC35 (ต่อ)

เวลา	ระยะเวลา	ระยะเข็มจม	เวลารวม
18.45	10	x	260
18.55	10	y	270
Initial setting time			190
Final setting time			270

หมายเหตุ x คือ ซีเมนต์เพสต์ยังไม่สิ้นสุดการก่อตัว

y คือ ซีเมนต์เพสต์ที่สิ้นสุดการก่อตัว

รูปที่ ค10 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวในซีเมนต์เพสต์ของส่วนผสม LW35ACC35