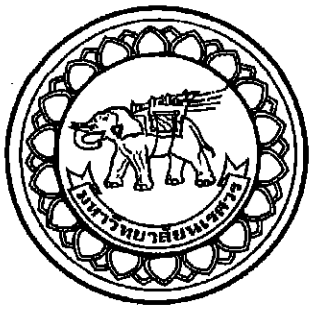


การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และวิศวกรรมของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน

THE STUDY OF CHEMICAL, PHYSICAL AND ENGINEERING PROPERTIES OF NAPIER GRASS ASH AS A POZZOLANIC MATERIALS

นายกฤษฎา ดอนไพร รหัส 54361206

นายภัครภัทร พูลทองคำ รหัส 54361213

นายณัฐพล เอี่ยมสะอาด รหัส 54361268

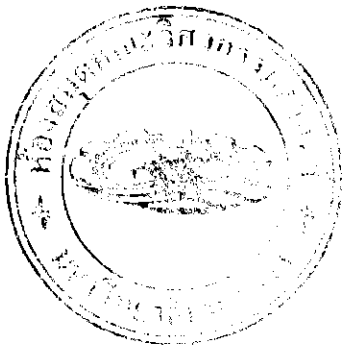
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ ...
เลขทะเบียน 16905584
เลขเรียกหนังสือ ...
มหาวิทยาลัยนเรศวร 2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และวิศวกรรมของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน

ผู้ดำเนินโครงงาน

นายกฤษฎา ดอนไพร	รหัส 54361206
นายภัครภัทร พูลทองคำ	รหัส 54361213
นายณัฐพล เอี่ยมสะอาด	รหัส 54361268

ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

Project title	The study of chemical, physical and engineering properties of napier grass ash as a pozzolanic materials	
Name	Mr. Krisada Donpai	ID. 54361206
	Mr. Pakkanapat Poltongkum	ID. 54361213
	Mr. Nutapon Lamsa-ard	ID. 54361268
Project advisor	Dr. Phongthorn Julphunthong	
Major	Civil Engineering	
Department	Civil Engineering	
Academic year	2014	

Abstract

This research developed the napier grass ash as a natural pozzolan. The study was focused on the chemical composition, physical properties and engineering properties of the napier grass ash. The result indicates that napier grass ash shows the summary proportion of SiO_2, Al_2O_3 and Fe_2O_3 of around 95.05%, which can be defined as a natural pozzolan follow the ASTM C618-03. The water requirement for normal consistency, initial setting time and final setting time were increased with increasing in ash percentage. Increase of replacement percentage of ash tended to decrease in compressive strength of mortars. For samples with 28 days curing, the compressive strength of mortars tended to increase with increase of replacement percentage. However, the samples with replacement percentage higher than 10% replacement percentage caused the compressive strength to decreased.

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และวิศวกรรมของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกฤษฎา ดอนไพร	**รหัส** 54361206
	นายภัครภัทร พูลทองคำ	**รหัส** 54361213
	นายณัฐพล เอี่ยมสะอาด	**รหัส** 54361268
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2557	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเถ้าหญ้าเนเปียร์ให้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ หรือที่เรียกว่าวัสดุปอซโซลาน การศึกษาได้เน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี , คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าหญ้าเนเปียร์ ผลที่ได้คือเถ้าหญ้าเนเปียร์ มีสัดส่วนของ SiO_2, Al_2O_3 และFe_2O_3 รวมกันเท่ากับ 95.05% ซึ่งสามารถจัดให้เป็นประเภทผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618-03 ความต้องการน้ำระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะเวลาการก่อตัวระยะปลายของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละของการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยเถ้าหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของเถ้าหญ้าเนเปียร์มีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่เถ้าหญ้าเนเปียร์มากกว่าร้อยละ 10 การเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดน้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้ความอนุเคราะห์จาก ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงคำชี้แนะในขั้นตอนการทำงานจนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าวิไทใบโอเพาเวอร์ที่อนุเคราะห์เถ้าหญ้าเนเปียร์ในการทำโครงงาน ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายกฤษฎา ดอนไพร
นายภัครภัทร พูลทองคำ
นายณัฐพล เอี่ยมสะอาด
29 พฤษภาคม 2557

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน.....3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน.....5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์.....6
2.2 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลานนิก.....10
2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอซโซลาน.....11
2.4 การทดสอบทางวิศวกรรม.....14
2.5 ทบทวนวรรณที่เกี่ยวข้อง.....1.5

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง.....18
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง....18
3.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ....19
3.5 การเตรียมวัสดุ....19
3.6 วิธีการทดลอง....19

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ....25
4.2 ลักษณะอนุภาคของวัสดุผง....26
4.3 ความเป็นผลึกของอนุภาค....27
4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม....27
4.5 เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Sitting Time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time)....28
4.6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ....29
4.7 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ....33

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย....36

บรรณานุกรม....37

ภาคผนวก....38

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าหญ้าแปียร์.....19

3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์ 6 ก้อน.....23

4.1 องค์ประกอบทางเคมี,พื้นที่ผิวของ เถ้าหญ้าเนเปียร์และปูนซีเมนต์.....25

4.2 ผลการทดสอบปริมาณการดูซึมน้ำของการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในส่วนผสมต่างๆ.....27

4.3 ผลการทดสอบเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time).....28
และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ.....29

4.5 ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ.....33

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 กระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเผาตรง....2
2.1 การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process)....7
2.2 การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง(Dry Process)....9
2.3 หลักการทำงานของเครื่อง XRD....13
4.1 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)....26
4.2 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า)....26
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเถ้าหญ้าเนเปียร์....27
4.4 กราฟปริมาณการดูดซึมน้ำของการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในส่วนผสมต่างๆ....28
4.5 กราฟแสดงเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time)....29
และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)
4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 5 %....30
4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 10 %....30
4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 15 %....31
4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 20 %....31
4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 25 %....32
4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 30 %....32
4.12 กราฟผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ....32
4.13 กราฟผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ....33
4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 5%....34
4.15 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 10%....34
4.16 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 15%....34
4.17 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 20%....35
4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 25%....35
4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 30%....35

บทที่ 1

บทนำ

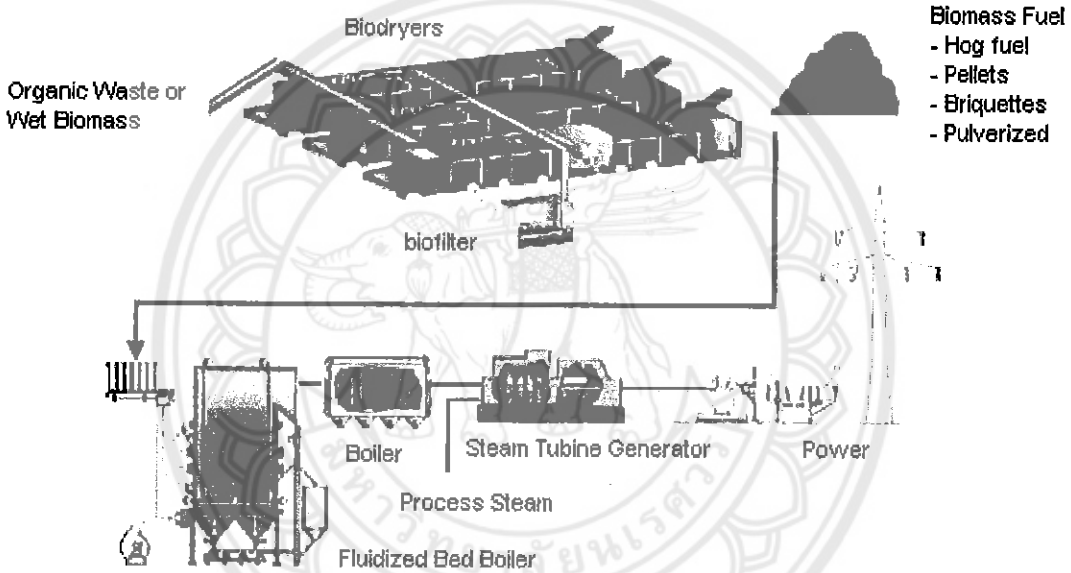
คอนกรีต เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย โดยจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste),ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทรายเรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar),มอร์ตาร์ผสมกับหินหรือกรวดเรียกว่า คอนกรีต (Concrete) โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากที่ผสมและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต ในปัจจุบันมีการเติมผสมวัสดุต่างๆเพื่อเพิ่มความสามารถของคอนกรีต

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ผลผลิตทางการเกษตรซึ่งสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบนำมาผลิตพลังงาน ทั้งชีวมวล ก๊าซชีวภาพ รวมไปถึงไบโอดีเซลและเอทานอล อีกทั้งภายหลังการแปรรูปจากอุตสาหกรรมอาหาร วัสดุเหลือทิ้งยังสามารถก่อให้เกิดเป็นพลังงานจากขยะอีกด้วย นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีศักยภาพด้านพลังงานธรรมชาติเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 18.2 $MJ/m^2/day$และบางแห่งของประเทศมีศักยภาพพลังงานลมดีจึงทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนอยู่ในระดับดีมาก และมีโอกาสที่จะส่งเสริมพลังงานทดแทนให้กลายเป็นพลังงานมีส่วนสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศได้ในอนาคต ดังนั้น รัฐบาลจึงมอบหมายให้กระทรวงพลังงานจัดทำแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) หรือ Alternative Energy Development Plan : AEDP (2012-2021) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศกระทรวงพลังงานได้พยากรณ์ความต้องการพลังงานในอนาคตของประเทศ โดยในปี 2564 คาดว่าจะมีความต้องการ 99,838 ktoe จากปัจจุบัน 71,728 ktoe โดยแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573และแผนการพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2555-2564 ได้กำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 7,413 ktoe ในปี 2555 เป็น 25,000 ktoe ในปี 2564 หรือคิดเป็น 25% ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมด ได้มีหน่วยงานทำการศึกษาเพื่อเสาะหาพืชพลังงานที่มีความเหมาะสม ผลการวิจัยพันธุ์หญ้ากว่า 20 ชนิดพบว่าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่น เนื่องจากมีโครงสร้างของสารอาหารที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 6,860-7,840 ลบ.ม./ไร่/ปี สามารถผลิตเป็นก๊าซไบโอมีเทนอัด (Compressed Bio Gas : CBG) ได้ประมาณ 3,118 – 3,563 กก./ปี สามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซ LPG และก๊าซ NGV ได้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะอื่นๆ เช่น ง่ายต่อการเพราะปลูก ให้ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าหญ้าชนิดอื่นเกือบ 7 เท่า [1] จึงทำให้ได้รับความสนใจมากขึ้นในฐานะพืชพลังงาน (รูปที่ 1.1) อย่างไรก็ตามต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวลค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบ

กับต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินหรือพลังงานนิวเคลียร์ แนวทางสำคัญประการหนึ่งในการเพิ่มความคุ้มค่าของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังชีวมวล คือการนำวัสดุที่เหลือใช้จากการผลิตไฟฟ้ามาสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น การนำเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่เหลือจากการเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านงานก่อสร้าง

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ รวมถึงสมบัติทางวิศวกรรมของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ที่มีการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์หรือที่รียกว่าวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)



รูปที่1.1 กระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเผาตรง [2]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าจากหญ้าเนเปียร์ซึ่งเป็นกากจากการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าชีวมวลจากหญ้าเนเปียร์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์และมอร์ตาร์

1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเถ้าจากหญ้าเนเปียร์ที่ได้จากการผลิตกระเสไฟฟ้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้วัสดุปอซโซลานทางเลือกใหม่

1.3.2 ได้แนวทางในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์

1.3.3 ทราบแนวทางหรือวิธีการในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

ศึกษาคุณสมบัติเชิงเคมี ฟิสิกส์ ของเถ้าหญ้าเนเปียร์และศึกษาคุณสมบัติมอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ตาร์ และระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้ง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของเถ้าหญ้าเนเปียร์

1.5.3 ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสตผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25 และ30

1.5.4 ทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25 และ30

1.5.5 ทำการทดสอบหาค่าอัตราการไหลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25 และ30

1.5.6 ทำการหล่อมอร์ตาร์ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25 และ30

1.5.7 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 1,3,7,14,28 และ 50 วัน เทียบกับกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์

1.5.8 ทำการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ร์ที่อายุ 1,3,7,14,28 และ 50 วัน เทียบกับกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์

1.6 แผนการดำเนินงาน

เดือน กิจกรรม	ตุลาคม 1 2 3 4	พฤศจิกายน 1 2 3 4	ธันวาคม 1 2 3 4	มกราคม 1 2 3 4	กุมภาพันธ์ 1 2 3 4
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง					
2. จัดเตรียมตัวอย่างและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลอง					
3.วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ฟิสิกส์					
4.ทำการทดลอง					
5.วิเคราะห์ผลการวิจัยสรุปและเขียนบทความ					

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

ค่าวัสดุสำนักงาน	200	บาท
ค่าวัสดุน้ำมันหรือเชื้อเพลิง	300	บาท
ค่าเดินทางไปในการขนส่งวัสดุ	500	บาท
ค่าอุปกรณ์ในการทำงาน	500	บาท
ค่าจ้างถ่ายเอกสารหรือจัดทำรูปเล่ม	1,500	บาท

รวมค่าใช้จ่าย 3,000 บาท (สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

2.1.1 ประวัติ

ซีเมนต์ (cement) สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง หมายถึง วัสดุผงละเอียดสีเทา เมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดวัสดุประเภท อิฐ หิน และทราย เข้าด้วยกัน สิ่งก่อสร้างในยุคอารยะธรรมแรกๆ ทำมาจากดินและหิน สิ่งก่อสร้างจากดินทำโดยการกระทุ้งดินให้แน่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือใช้อิฐที่ทำจากดินที่ผ่านการตากแห้งมาก่อโดยใช้น้ำโคลนเป็นวัสดุประสาน สิ่งก่อสร้างที่ทำจากหินจะอาศัยฝีมือในการเรียงหินให้ชิดกันและเกิดความแข็งแรงโดยไม่ต้องใช้สารซีเมนต์การใช้ซีเมนต์ในการก่อสร้างมีขึ้นในสมัยอารยะธรรมที่ค่อนข้างเจริญแล้ว

ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นคนแรกคือ โจเซฟ แอสปดิน (Joseph Aspdin) ชาวอังกฤษ เมื่อประมาณ 170 ปีมาแล้ว เขาได้นำฝุ่นดินกับหินปูนมาเผารวมกัน แล้วนำมาบดจนละเอียด ผลที่ได้เมื่อผสมน้ำและแข็งตัวแล้ว จะเป็นก้อนสีเหลืองเทา เหมือนก้อนหินจากเหมืองของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ในประเทศอังกฤษ เขาจึงเรียกชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้จดทะเบียนสิทธิบัตรการผลิตไว้เป็นหลักฐาน

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆทั่วโลก รวมทั้งได้เปิดโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่น ในประเทศฝรั่งเศส พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน พ.ศ.2398 และสหรัฐอเมริกา พ.ศ.2414 เป็นต้น [3]

2.1.2 กรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

- Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- Argillaceous Material ได้แก่ ซิลิกา, อลูมินาซึ่งอยู่ในรูปของดินดำ ดินเหนียว และดินดาน
- Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก ศิลาแลง

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์มี 2 วิธีด้วยกันคือ

- กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
- กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process)

- นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่ง นั่นคือ ดินขาว (Marl) และดินเหนียว (Clay) ซึ่งหาได้จากแหล่งดินตามธรรมชาติมายังที่ผลิต

- นำดินทั้งสองชนิดมาผสมกันน้ำในบ่อตีดิน (Wash Mill) แล้วกวนให้เข้ากัน

- หลังจากที่กวนเข้ากันแล้ว ก็ส่งไปบดให้ละเอียดในหม้อบดดิน (Slurry Mill) จนได้น้ำดิน (Slurry)

- ส่งไปกรองเอาเศษหินและส่วนที่ไม่ละลายน้ำออก เหลือแต่น้ำดินที่ละลายเข้ากันดี ซึ่งจะผ่านเครื่องกรองสองเครื่องคือ เครื่องกรองหยาบ และเครื่องกรองละเอียด

- สูบน้ำดินไปเก็บพักไว้ในยุ้งเก็บ (Silo) เพื่อตรวจสอบคุณภาพและปรับแต่งส่วนผสมให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด

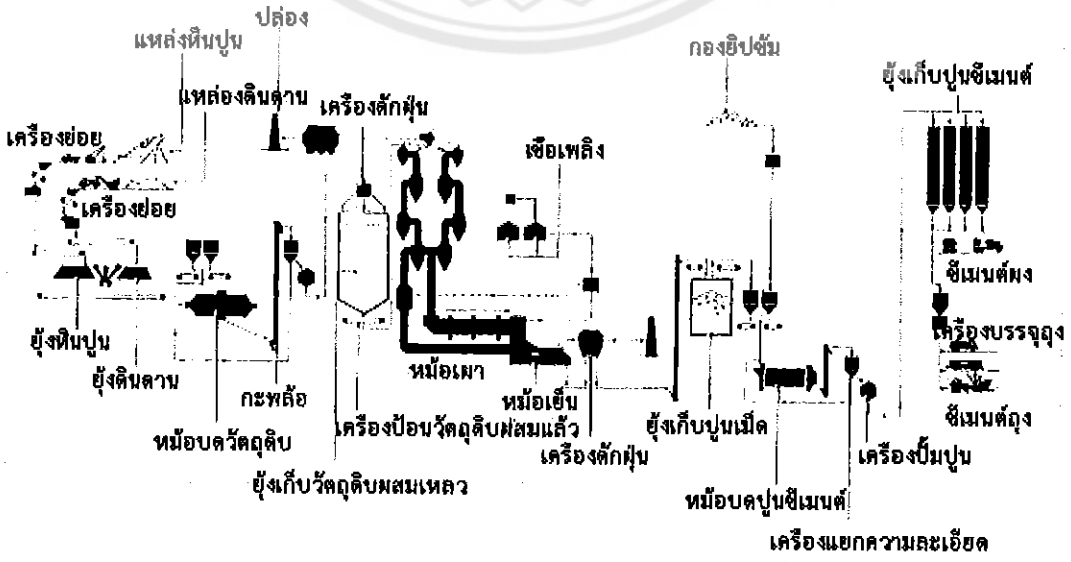
- น้ำดินที่มีส่วนผสมที่ถูกต้องแล้ว จะถูกสูบไปรวมกันที่บ่อกวนดิน (Slurry Basin) เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอ และกวนให้ส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งหนึ่ง

- สูบน้ำดินจากบ่อกวนดินเข้าสู่เครื่องป้อนน้ำดิบ เพื่อป้อนน้ำดิบเข้าไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ความร้อนในหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่บรรยากาศ เหลือแต่เม็ดดินซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

- ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกลำเลียงไปตามโซ่ลำเลียงปูนเม็ด เพื่อนำไปเก็บในยุ้งเก็บปูนเม็ดรอกระบวนการต่อไป

- เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill) ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

- จากนั้นปูนซีเมนต์จะผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.1 การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) [4]

การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process)

- นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่งนั่นคือ หินปูน (Limestone) และ ดินดาน (Shale) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูนมายังที่ทำการผลิต

- นำดินทั้งสองชนิดมาลดขนาดลงเพื่อให้เหมาะกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป โดยการนำมาผ่านเครื่องย่อย (Crusher) ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard) นอกจากนี้วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่าน เครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน

- ลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิน (Raw Mill) ซึ่งในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) นี้จะบดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดรวมกันซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) โดยการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผาด้วย

- หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ววัตถุดิบสำเร็จจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องแยกวัตถุดิบผสมแล้ว (Cyclone) ไปยังยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal Homogenizing Silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน

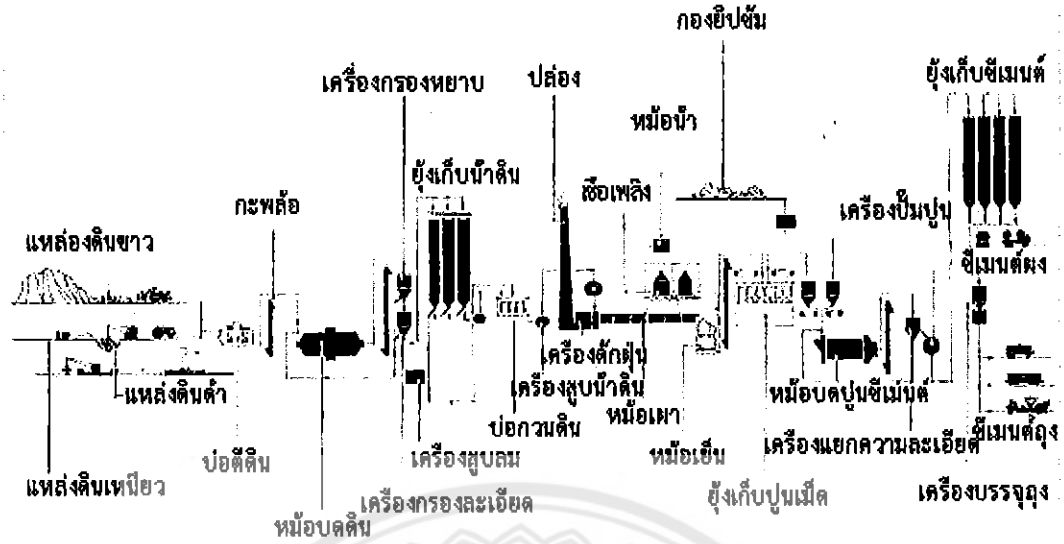
- จะเป็นกระบวนการเผา โดยวัตถุดิบสำเร็จจะถูกส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) โดยกระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จแล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

- เป็นการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงโดยการนำปูนเม็ด (Clinker) ไปผ่านหม้อเย็น (Clinker cooler)

- ลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ยุ้งเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป

- เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill) ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

- จากนั้นปูนซีเมนต์จะผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.2 การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process) [5]

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก CaO SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3
- ออกไซด์รอง MgO Na_2O K_2O TiO_2 P_2O_5 SO_3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง

2.1.4 สารประกอบหลัก

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcuim Silicate) C_3S

จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็วให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก การเพิ่มยิปซัมทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์มีสภาพพลาสติกมากขึ้น และช่วยหน่วงเวลาของระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ได้ช้าลง

- ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcuim Silicate) C_2S

จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูงและเกิดความร้อนน้อย การเพิ่มยิปซั่มจะได้ผลหน่วงการก่อนตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ได้เล็กน้อย

- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcuim Aluminate) C_3A

จะก่อตัวกันทันทีที่ผสมกับน้ำให้ความร้อนสูง จะทำให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกๆและจะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่มีประโยชน์คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาไดแคลเซียมซิลิเกต

- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcuim Aluminoferrite) C_4AF

จะก่อนตัวรวดเร็วแต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต

2.1.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยามีความแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก ของซีเมนต์แต่ละประเภท

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ C_3S ($3CaOSiO_2$) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 วัน

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ C_2S ($2CaO\ SiO_2$) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 100 วัน

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(HO)_2$$

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ C_3A ($3CaOAl_2O_3$) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 6 วัน

$$C_3A + 6H_2O \rightarrow 3C_3AH_6$$

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ C_4AF ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 วัน

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4$$

2.2 วัสดุปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลานนิก

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณภาพบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น

เมื่อผสมวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตสารประกอบออกไซด์ในวัสดุปอซโซลาน เช่น SiO_2 , Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และได้สารประกอบของวัสดุเชื่อมประสาน CSH และ CAH แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหลา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้เช่นเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง

2.2.1 เถ้าหญ้าเนเปียร์

- กรมวิธีการผลิต

หญ้าเนเปียร์สดเมื่อลำเลียงมายังโรงไฟฟ้าจะต้องผ่านกระบวนการลดความชื้น และย่อยให้มีขนาดเล็กลงก่อนนำเข้าเตาเผา จากนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ความร้อนส่งผ่านไปยังน้ำที่อยู่ภายในเตา น้ำมีอุณหภูมิ

สูงขึ้นจนเดือด และกลายเป็นไอน้ำ นำไอน้ำที่เกิดขึ้นไปผลักกังหันไอน้ำเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะได้ไฟฟ้าออกมาในที่สุด และเหลือเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ "เถ้าหญ้าเนเปียร์"

- องค์ประกอบทางเคมี

เถ้าหญ้าเนเปียร์มีส่วนประกอบหลักทางเคมี Al_2O_3 และSiO_2 ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามทฤษฎีของปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงน่าจะเหมาะกับการเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)

เถ้าเป็นสารประกอบปอซโซลานซึ่งความหมายของปอซโซลานหมายถึงวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานแต่สามารถทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ แล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสานดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมซิลิกา (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลาน จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \rightarrow 3Ca(OH)_2 + 2SiO_2$$
$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO\ 2Al_2O_3\ 3H_2O$$

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท $3CaO\ \ 2SiO_2 3H_2O$ และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท $3CaO\ \ 2Al_2O_3 3H_2O$ เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ และการผสมขี้เถ้าแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เมื่อปฏิกิริยาเกิดช้าจะเป็นการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลงด้วย

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอซโซลาน

2.3.1 X-ray Fluorescence (XRF)

XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรื่องรังสีเอกซ์ ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescene ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray Photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทน ที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ฟูออเรสเซนต์" พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่ารังสีเอ็กซ์ฟูออเรสเซนต์ที่

เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำ รังสีขนานไปยัง Diffracting Crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอนเช่น ควอทซ์, ลิเทียม-ฟูออไรด์, ไมกา ฯลฯ โดย Diffracing Crystal จะทำให้รังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ (X-ray Detector) โดยปกติ Diffracting Crytal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก Colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัด

2.3.2 Brunauer Paul Hugh Emmett and Edward Teller (BET)

บรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer,Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นก๊าซไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับ กับความดันสัมพัทธ์ ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น

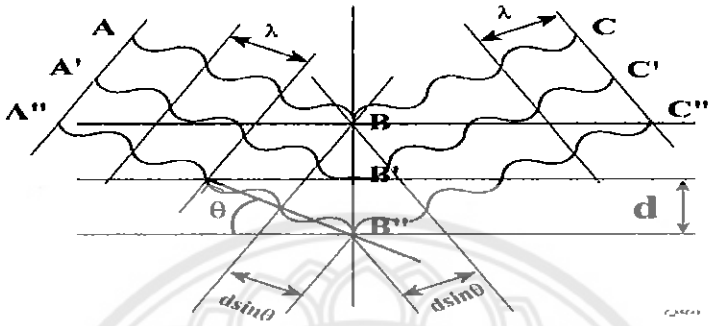
เป็นเครื่องที่ออกแบบมาเพื่องานวัดพื้นที่ผิวโดยเฉพาะ เครื่องนี้เป็นเครื่องที่ทำการวัดโดยอัตโนมัติ การไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวตัวอย่างกระทำโดยการให้ความร้อนและ "ทำสุญญากาศ" ตัวเครื่องเองมีระบบตรวจสอบว่าการไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวเสร็จสมบูรณ์หรือยังด้วยการ "วัดความดัน" ซึ่งถ้าหากพื้นผิวยังมีก๊าซใด ๆ ดูดซับเอาไว้อยู่ ก๊าซที่คายออกมาจะทำให้ความดันของระบบสูงกว่าสุญญากาศ ถ้าหากยังทำสุญญากาศไม่ได้ระดับที่เหมาะสม เครื่องก็จะยังไม่เริ่มการวิเคราะห์ จะเริ่มวิเคราะห์ก็ต่อเมื่อทำสุญญากาศได้ระดับแล้วเท่านั้น ส่วนต้องใช้เวลาทำสุญญากาศนั้นนานเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวสูง อาจต้องใช้เวลาทำสุญญากาศอย่างน้อย 8-12 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวต่ำ อาจใช้เวลาทำสุญญากาศเพียงแค่ 2 ชั่วโมง

เมื่อทำสุญญากาศได้ที่แล้วก็จะเปลี่ยนจากการให้ความร้อนมาเป็นการหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (ตรงนี้ต้องทำการเปลี่ยนอุปกรณ์กันเองจากถุงให้ความร้อนมาเป็นถังไนโตรเจนเหลว) เครื่องก็จะเริ่มฉีดก๊าซไนโตรเจนไปยังตัวอย่างตามปริมาตรที่กำหนดไว้ ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างจะดูดซับก๊าซไนโตรเจนเอาไว้และจะบันทึกปริมาณก๊าซตัวอย่างดูดซับเอาไว้ พอดูดซับเอาไว้จนอิ่มตัวก็จะทำการไล่ก๊าซออก ดังนั้นในการวิเคราะห์จะมีข้อมูลในระหว่างการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับหรือคายซับสามารถนำมาใช้คำนวณพื้นที่ผิว และพฤติกรรมการดูดซับและการคายซับที่ความดันต่าง ๆ กันจะถูกใช้คำนวณขนาดรูพรุน ข้อมูลที่เครื่องวัดได้นั้นจะนำไปคำนวณพื้นที่ผิว

2.3.3 X-ray Diffractometer (XRD)

XRD เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\ \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเครื่อง XRD

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.3.4 Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดามีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.4 การทดสอบทางวิศวกรรม

2.4.3 การทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

การทดสอบนี้เพื่อหากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างเป็นรูป บริเคต (Briquet) การทดสอบมีประโยชน์ในการหากำลังดึงของมอร์ตาร์อาจใช้ในงานวิจัยเพื่อหาแรงดึงในวัสดุอื่นโดยวิธีนี้ อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ASTM ในปัจจุบัน ได้ยกเลิกการทดสอบนี้แล้ว เนื่องจากข้อมูลของการับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ไม่ค่อยมีประโยชน์มากนัก [6]

2.4.1 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยใช้เข็มไวเคต

การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ควรมีระยะเวลาการก่อตัวไม่เร็วหรือช้าเกินไป เพราะเกี่ยวเนื่องต่อการทำงานในรูปแบบต่างๆ มาตรฐานสำหรับปูนซีเมนต์ได้แบ่งการก่อตัวของปูนซีเมนต์ออกเป็น 2 ระยะ คือระยะการก่อตัวต้น (Initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวปลาย (Final setting time) เริ่มผสมถึงระยะก่อตัวต้นเป็นช่วงที่สามารถเทและตกแต่งได้ โดยไม่ทำให้สูญเสียการรับกำลัง ถ้าเลยระยะก่อตัวต้นไปอาจเกิดผลเสียต่อปูนซีเมนต์ และถ้าเลยระยะก่อตัวปลายปูนซีเมนต์จะมีผลกำลังลดลงถ้าเกิดการกระทำใดๆ สำหรับการทดลองเพื่อหาเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยเข็มไวเคต (Vicat needle) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 191 [7]

ปริมาณน้ำในส่วนผสมของซีเมนต์มีผลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ กล่าวคือถ้าใช้น้ำในส่วนผสมของซีเมนต์เพสมาก ระยะเวลาการก่อตัวจะนานขึ้น ดังนั้นก่อนจะทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จึงต้องทำการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งถือว่าเป็นปริมาณน้ำที่ไม่มากหรือน้อยเกินไป และใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อการทดลองหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ต่อไป การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมดำเนินตาม ASTM C 187 [8] ซึ่งคือปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในซีเมนต์นั้นกระทำให้เข็มไวเคตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนัก 300 กรัม ตกลงอย่างอิสระ 30 วินาที และจมเข้าในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะ 10±1 มิลลิเมตร

2.4.2 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

การทดสอบนี้เพื่อหากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ ซึ่งผลที่ได้เป็นข้อมูลบ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนซีเมนต์ การทดสอบโดยย่อ คือการนำปูนซีเมนต์ผสมกับทราย จากนั้นผสมน้ำสะอาดตามปริมาณที่กำหนด โดยในที่นี้นั้นเป็นปูนซีเมนต์ผสมให้ใช้ปริมาณน้ำส่วนผสมที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ 110±5 จากนั้นหล่อตัวอย่างลงแบบนำมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และทดสอบกำลังอัดตามอายุที่ต้องการ ซึ่งการทดลองเป็นไปตาม ASTM C 109 [9]

2.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ษณุรักษ์ เทียมวีรสกุล และนที อทิกคุณาการ (2543) ศึกษาผลกระทบจากความละเอียดของเถ้าชานอ้อยที่นำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่อัตราร้อยละ 20 โดยอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดเท่ากันกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์และค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว เมื่อมีอายุ 28 วัน

ณพงศธร ลิขิตไพบูลย์(2548) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี และปรับปรุงคุณภาพของเถ้าชานอ้อยด้วยการบดให้ความละเอียดเพิ่มขึ้น เพื่อหาความเป็นไปได้ในการ ใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการนำเถ้าชานอ้อยมาจาก 5 แหล่ง คือ จังหวัดราชบุรี จังหวัดสระบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี จังหวัดนครสวรรค์ และจังหวัดลพบุรี พบว่าเมื่อบดเถ้าชานอ้อย นานขึ้นรูพรุนจะลดลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น มีผลรวมของ Sio_2 , Al_2O_3 และFe_2O_3 มากกว่า ร้อยละ 75 และส่วนผสมต้องการน้ำลดลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวของ ซีเมนต์เพสต์เร็วขึ้นเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยไม่ได้ ผ่านการบดร้อยละ 20 มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 28 วัน เป็นค่าที่ต่ำและไม่เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อบดให้มีความละเอียดค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 25 - 30 กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมที่ 28 วัน และเมื่อบดให้มีส่วนค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละไม่เกิน ร้อยละ 5 ที่การแทนที่ร้อยละ 20 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ มีค่าร้อยละ 98 - 103 ของมอร์ตาร์ควบคุม

สุวิมล สัจจวาณิชย์ (2546) ศึกษาผลกระทบของเถ้าชานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ XRD แสดงว่าเถ้าชานอ้อยมีปริมาณ SiO2 สูงประมาณร้อยละ 62 เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำ การใช้เถ้าชานอ้อยอนุภาคละเอียดทำให้การไหลของมอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อยและทำให้กำลังเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ความละเอียดมีผลต่อการไหลน้อย กำลังของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อระดับการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้น ที่อายุ 1 วัน การแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวโน้มให้ผลดีที่สุดโดยที่อายุ 7 และ 28 วันให้ผลใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์(2545) ศึกษาคุณสมบัติด้านปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมัน ความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตอิฐคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน มีส่วนประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 63.56 ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์ร้อย

ละ 20.80 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้แต่มีขนาดใหญ่ มีรูพรุนมาก ทำให้ดูดน้ำมาก และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ เมื่อบดให้มีความละเอียดมากขึ้นขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ได้ร้อยละ 75 – 100 จะทำให้มีรูพรุนน้อยลง การดูดซึมน้ำต่ำลงทาให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สูง ส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น และการเพิ่มความละอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ทำให้กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้นด้วย

สุวิมลสัจจวาณิชย์ และอาทิมา ดวงจันทร์ (2547) ศึกษาดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยและความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดจนมีความละเอียดค้างบดตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0 - 12 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าซีเมนต์ล้วนร้อยละ 13 และดัชนีความเป็นปอซโซลานที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 98 - 104 และที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 102 - 108 ของมอร์ตาร์ควบคุม และยังพบว่าเถ้าชานอ้อยมีดัชนีความเป็นปอซโซลานสูงกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2544) ศึกษาคุณสมบติทางกลของซีเมนต์ผสมเถ้าฟางข้าวที่ได้จากการเผาฟางข้าวในเตาเผาเผอร์โรซีเมนต์ โดยการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าฟางข้าว คุณสมบัติทางกลซีเมนต์เพสต์ได้แก่ ความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การขยายตัวในน้ำและการหดตัวแบบแห้ง โดยทำการควบคุมปริมาณน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าฟางข้าว) โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.4(W/(C+RSA)=0.4) ตัวแปรหลักที่ใช้คือ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าฟางข้าวในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0,20,40,60 และ80 ตามลำดับ จากผลทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงของซีเมนต์เพสต์ในช่วง 28 วันจะเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าฟางข้าวในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 40 ส่วนการดูดซับน้ำ ความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย การขยายตัวในน้ำและการหดตัวแบบแห้ง จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าฟางข้าว ในขณะที่ระยะการก่อตัวเริ่มต้นและค่าร้อยละของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดซีเมนต์เพสต์ธรรมดาจะมีค่าลดลง

นายเรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ (2546) ศึกษาและพัฒนาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยใช้เถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วอายุ 1, 2, 5 และ 10 ปีจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วอายุ 1 ปีจากโรงไฟฟ้า COCO ทำการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาโดยการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 30-35, 15-20 และไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งหมดก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ทดสอบความข้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาก่อนและหลังการปรับปรุง

คุณภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้ยังทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อสร้างความสัมพันธ์ในการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาผลการศึกษาพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มากกว่าร้อยละ 34 หลังจากบดวัสดุแต่ละชนิดในแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน เถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วก่อนการบดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะส่วนใหญ่กลมตัน และบางอนุภาคมีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุน ส่วนเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม สำหรับเถ้าก้นเตาพบว่ามีรูปร่างไม่แน่นอนและมีความพรุนสูงมาก องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วมีค่าต่างกันมากโดยเฉพาะปริมาณของ CaO และ SO_3 ขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีค่าใกล้เคียงกับของเถ้าถ่านหิน แต่เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า COCO มีองค์ประกอบเคมีแตกต่างจากเถ้าถ่านหินอย่างมาก จากผลการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์พบว่าเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาก่อนการปรับปรุงคุณภาพไม่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากให้กำลังอัดที่ต่ำ แต่หลังจากการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วหรือเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน และที่ความละเอียดเดียวกันมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างอายุการทิ้งกับกำลังอัด แต่พบว่าหากเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตามีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดจากโรงฟ้าแม่เมาะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า COCO มีค่าลดลงเล็กน้อย คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดสุดในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 จากโรงฟ้าแม่เมาะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง วิธีการทดลอง และขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นบทที่สำคัญที่สุดของโครงการวิจัยนี้ โดยมีการอ้างอิงถึงมาตรฐานดังต่อไปนี้

3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

3.1.1 ASTM C 191-99 :Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic by Vicat Needle [7]

3.1.2 ASTM C 187-98 :Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement [8]

3.1.3 ASTM C 109/C 109M-99 :Standard Test Method for Compressive of Hydraulic Cement Mortars(Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens) [9]

3.1.4 ASTM C 778 :Standard Specification for Standard Sand [10]

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3.2.2 เครื่องร่อนทราย

3.2.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.4 เครื่องผสมมอร์ตาร์

3.2.5 เครื่องทดสอบไวแคต

3.2.6 เครื่องทดสอบกำลังดึง

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ถาดอลูมิเนียม

3.3.2 ตู้อบ

3.3.3 แบบหล่อมอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังอัด ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร

3.3.4 เกรียง

3.3.5 กระบอกตวงน้ำ

3.3.6 ถุงมือยาง

3.3.7 แบบหล่อบริเคต ขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร

3.4 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.4.2 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างเบอร์ 100

3.4.3 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างเบอร์ 30

3.4.4 เถ้าหญ้าเนเปียร์

3.5 การเตรียมวัสดุ

3.5.1 นำปูนซีเมนต์ปอดแลนต์ประเภทที่ 1 ใส่ถังเพื่อควบคุมความชื้น

3.5.2 นำเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ได้จากโรงงานไฟฟ้ามาอบให้แห้งแล้วบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียด จากนั้นแบ่งตัวอย่างเพื่อทำการส่งทดสอบทางเคมี

3.5.3 นำทรายที่จะใช้มาล้างน้ำให้สะอาดจากนั้นอบให้แห้ง แล้วร่อนให้ได้ขนาดที่ต้องการนั่นคือผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างเบอร์ 10

3.5.4 นำเถ้าที่ได้จากเครื่องบดส่งวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางเคมีและฟิสิกส์ ด้วยวิธีการทดสอบของ XRD, XRF, BET และSEM

3.6 วิธีการทดลองทางวิศวกรรม

3.6.1 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าหญ้าเนเปียร์

ร้อยละการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้าหญ้าเนเปียร์ (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
0%	650.0	0.0	แล้วแต่กำหนด
5%	617.5	32.5	แล้วแต่กำหนด
10%	585.0	65.0	แล้วแต่กำหนด
15%	552.5	97.5	แล้วแต่กำหนด
20%	520.0	130.0	แล้วแต่กำหนด
25%	487.5	162.5	แล้วแต่กำหนด
30%	455.0	195.0	แล้วแต่กำหนด

ตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนด ปริมาณน้ำที่กำหนดอาจเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตกลงอย่างอิสระและจมลงในซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นก็เพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงมากกว่า 10 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองต้องมีอย่างน้อย 3 ค่า

1. ชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าหญ้าเนเปียร์ตาม (ตารางที่ 3.1)

2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม

3. ใส่น้ำที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสมจนหมด

4. ใส่ปูนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าลงไปในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำแล้วทิ้งไว้ 30 วินาที

5. เมื่อครบ 30 วินาทีจึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆ โดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดปูนซีเมนต์ที่ติดข้างหม้อลงยังก้นหม้อ

7. เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 1 นาที

8. ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือพลาสติก 2 ข้าง นำซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสม จากนั้นปั้นให้เป็นก้อนกลมๆโยนสลับมือในแนวราบระยะห่างกันประมาณ 15 ซม. จำนาน 6 ครั้ง ควรเป็นก้อนค่อนข้างกลมและเป็นเนื้อเดียวกัน

9. นำซีเมนต์เพสต์ใส่ยังแบบรูปกรวยโดยใส่จากด้านฐานเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง

10. ปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินออกจากแบบด้วยเกรียงเหล็ก โดยปาดเพียงครั้งเดียว ภายหลังปาดเสร็จแล้วหากผิวหน้ายังไม่เรียบให้ใช้เกรียงปาดแต่งผิวหน้าเบาๆจากนั้นนำไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคต

11. เลื่อนก้านเข็มลงมาจนกระทั่งปลายเข็มสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์ จากนั้นยึดก้านเข็มให้แน่นด้วยสกรู

12. ปรับสเกลบอกระยะให้อ่านค่าที่ศูนย์

13. คลายสกรูเพื่อให้เข็มตกอย่างอิสระและจมเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาทีแล้วให้หมุนสกรูเพื่อหยุดการตกอย่างอิสระของก้านเข็ม อ่านค่าระยะจมของเข็มไวแคต

14. ปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติคือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที และได้ระยะจม 10 มิลลิเมตร เมื่ออ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมลงไม่ถึง 10 มิลลิเมตร ครั้งต่อไปก็เพิ่มน้ำ แต่ถ้าอ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมลงเกิน 10 มิลิเมตร ครั้งต่อไปก็ลดน้ำลง อย่างน้อยต้องให้ได้ 3 ค่า เมื่อได้ปริมาณน้ำข้นเหลวปกติแล้วก็เอาไปหาระยะเวลาการก่อตัวต่อไป ส่วนซีเมนต์ผสมเถ้านั้นก็ทำเหมือนกัน

3.6.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

1. ชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าเหมือนกับตารางที่ 3.1 ที่ทำการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ตวงน้ำตามที่ได้จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

2. ทำการผสมซีเมนต์เพสต์เหมือนกันกับการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3. ปรับเครื่องทดสอบไวแคตโดยการปรับก้านเข็มและใส่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

4. นำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วโยนสลับมือ 6 ครั้งนำใส่แบบกรวยปาดหน้าให้เรียบจากนั้นทิ้งไว้ในที่ที่มีความชื้นสูง 30 นาที

5. ภายหลังจากทิ้งตัวอย่างไว้ครบ 30 นาที จึงนำตัวอย่างไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคตปรับระยะเข็มให้ลงมาสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์ปรับสเกลระยะให้เป็นศูนย์

6. ปล่อยให้เข็มไวแคตตกลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบแล้วให้ยึดก้านเข็มไวแคตแล้วอ่านค่าระยะจม ทำการทดสอบหาระยะจมทุกๆ 15 นาทีจนกระทั่งได้ระยะจมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 6.5 มิลลิเมตร และห่างจากขอบของแบบไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร

7. ระหว่างการทดสอบอย่าให้มีการสั่นสะเทือน เพราะอาจทำให้ผลการทดสอบผิดพลาด เข็มไวแคตต้องสะอาด และไม่คดงอ

8. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตถูกปล่อยให้จมลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 นาที และจมลงได้ระยะ 25 มิลลิเมตร ส่วนเวลาการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตไม่สามารถจมลงได้

3.6.3 การทดสอบหาค่าการไหล

1. ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหลให้สะอาดและแห้ง จากนั้นวางแบบทดสอบการไหลลงตรงกลาง

2. ตักมอร์ตาร์ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 มิลลิเมตร และกระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้งให้ทั่วตลอดหน้าตัด เพื่อให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอในแบบ ไม่ต้องกระทุ้งให้แรงจนเกินไป

3. ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบอีก 1 ชั้นซึ่งมีความสูงประมาณ 25 มิลลิเมตร และกระทุ้งมอร์ตาร์เช่นเดียวกับที่กระทุ้งชั้นที่ 1 สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้า

4. ภายหลังกระทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้า โดยการลากเกรียงเหล็กที่เกือบตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบ และปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกทิ้งไปโดยใช้วิธีการเลื่อนไป-มา คล้ายๆกับการเลื่อยไม้

5. หากมีน้ำไหลออกจากใต้ฐานของแบบให้เช็ดน้ำออก และนำส่วนของมอร์ตาร์ที่ตกข้างแบบออกให้หมด

6. ยกแบบขึ้นในแนวดิ่งอย่างช้าๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกจากผิวหน้าโต๊ะการไหลประมาณ 1 นาที

7. ภายหลังจากยกแบบออกจากมอร์ตาร์ ให้ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ซึ่งยกจานของโต๊ะการไหลขึ้นสูง 13 มิลลิเมตร และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที ในขณะที่ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่น อย่าให้มีการเคลื่อนตัวเพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด

8. มอร์ตาร์ที่อยู่บนจานของโต๊ะการไหลแผ่ออกไป โดยเกือบเป็นวงกลม ให้ใช้คาลิเปอร์วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมุมห่างกัน 45 องศา (หรือวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานของโต๊ะการไหล)บวกค่าที่อ่านจากคาลิเปอร์จำนวน 4 ครั้งเข้าด้วยกัน ค่าที่อ่านได้คือค่าร้อยละของเส้นผ่านศูนย์การของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (เส้นผ่านศูนย์กลางของแบบทดสอบการไหลเท่ากับ 10 เซนติเมตร)

9. สำหรับการทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้จดค่าการไหลที่ได้

10. สำหรับปูนซีเมนต์ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้ทำการทดสอบจนได้ค่าการไหลอยู่ที่ระหว่าง 110±5 โดยการปรับปริมาณน้ำที่ใช้การผสม การทดสอบค่าการไหลให้ใช้มอร์ตาร์ที่ผสมใหม่ทุกครั้งในการทดสอบ

3.6.4 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

1.เตรียมส่วนผสมตาม ตารางที่ 3.2

2. ประกอบหม้อผสมและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่อง

3. ทาน้ำมันเครื่องภายในแบบหล่อบางๆ เพื่อป้องกันมอร์ตาร์ติดแบบหล่อ

4. ใส่น้ำลงในหม้อผสม จากนั้นใส่ปูนซีเมนต์แล้วเดินเครื่องผสมโดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

5. เมื่อครบ 30 วินาที จึงใส่ทรายลงไปอย่างช้าๆภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งใบกวนยังคงกวนอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราช้า (140±5รอบต่อนาที)

6. หยุดเครื่องผสม แล้วเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที

7. หยุดเครื่องผสม แล้วปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้ 90 วินาที และในระหว่างเวลา 15 วินาทีแรกให้ปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อให้ลงไปก้นหม้อ จากนั้นนำภาชนะมาปิดปากหม้อ เพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากหม้อ จนครบเวลา 90 วินาที เดินเครื่องด้วยอัตราเร็วปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 1 นาทีเป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

8. ในกรณีที่ไม่ทำการทดสอบค่าการไหล ให้ทิ้งมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จในหม้อผสมเป็นเวลา 75 วินาที

9. ทำการหล่อมอร์ตาร์ลงแบบหล่อโดยใช้เวลาทั้งหมดในการหล่อแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากผสมเสร็จสิ้น

10. ใช้เกรียงตักมอร์ตาร์ลงแบบชั้นแรก โดยมีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นกระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างภายในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ รอบละ 8 ครั้ง

11. เมื่อการทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้ว จึงใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 โดยมีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นทำการการทุ้งเหมือนชั้นที่แรก ดั้งนั้นแต่ละตัวอย่างจะมีการกระทุ้งทั้งหมด 64 ครั้ง

12. เมื่อเสร็จการกระทุ้งแล้ว ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์ 6 ก้อน

ร้อยละการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้าหญ้าเนเปียร์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
0%	500	0	1375	ค่าการไหล 110±5
5%	475	25	1375	ค่าการไหล 110±5
10%	450	50	1375	ค่าการไหล 110±5
15%	425	75	1375	ค่าการไหล 110±5
20%	400	100	1375	ค่าการไหล 110±5
25%	375	125	1375	ค่าการไหล 110±5
30%	350	150	1375	ค่าการไหล 110±5

3.6.5 การทดสอบการกำลังดึงของมอร์ตาร์

1. ส่วนผสมของมอร์ตาร์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หากต้องการหล่อตัวอย่างทดสอบ 6 ตัวอย่างให้ใช้น้ำหนักของปูนซีเมนต์ 300 กรัม และน้ำหนักทราย 900 กรัม แต่ถ้าต้องการ 9 ตัวอย่าง ให้ใช้ปูนซีเมนต์ 450 กรัม และทราย 1350 กรัม

2. ทำการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ซึ่งดำเนินการตามการทดสอบที่ 2 จากนั้นจึงนำค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาทำการคำนวณตามสมการที่ 1 คือ

$$Y = \frac{2}{3}\left[\frac{P}{(N+1)}\right] + 6.5$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ (ร้อยละ)

P คือ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)

N คือ อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 3

3. ชั่งน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และทราย โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 0.3 กรัม ผสมปูนซีเมนต์และทรายให้เข้ากัน ซึ่งในที่นี้เรียกว่า "ปูน-ทราย" จากนั้นตักส่วนผสมของปูน-ทรายให้คล้ายๆกับปล่องภูเขาไฟ

4. ค่อยๆเติมน้ำที่ใช้ผสมลงในปากปล่องปูน-ทรายที่ทำไว้ จากนั้นตักส่วนผสมของปูน-ทรายที่อยู่ด้านฐานปล่องใส่เข้าไปตรงกลางปล่องซึ่งมีน้ำอยู่ โดยใช้เวลาไม่เกิน 30 วินาที

5. ปล่อยปูน-ทรายทิ้งไว้เพื่อให้ดูดซึมน้ำเป็นเวลา 30 วินาที ในช่วงเวลานี้ใช้เกรียงเหล็กค่อยๆตักปูน-ทรายที่ยังไม่สัมผัสน้ำไปวางยังบริเวณที่เปียกเพื่อช่วยให้เปียกน้ำเร็วขึ้น

6. เมื่อครบ 30 วินาที ใช้มือทั้งสองข้าง (สวมถุงมือยาง) ผสมปูน-ทรายและน้ำให้เข้ากันอย่างทั่วถึง โดยเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ในระหว่างการผสมให้สวมถุงมือยางตลอดเวลาเพื่อป้องกันปูนซีเมนต์กัดมือ

7. ทันทีที่ผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้น ให้วางแบบหล่อบริเคตลงบนแผ่นรองโลหะ (แผ่นโลหะไม่ต้องทาน้ำมันทาเฉพาะแบบหล่อบริเคต) และใช้มือ (สวมถุงมือยาง) นำมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จใส่ลงในแบบหล่อบริเคตจนเต็ม

8. ใช้นิ้วแม่มือทั้ง 2 นิ้วกดลงบนมอร์ตาร์เพื่อทำการอีกมอร์ตาร์เข้าสู่แบบโดยกดจำนวน 12 ครั้งให้กระจายทั่วแบบหล่อ โดยแรงกดที่สม่ำเสมอประมาณ 6.75-9 กิโลกรัมต่อการกดหัวแม่มือแต่ละครั้ง

9. ปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินที่ล้นแบบออกโดยใช้เกรียงเหล็ก นำแผ่นโลหะ ที่ทาน้ำมันบางๆมาวางไว้บนผิวหน้าของแบบบริเคต ใช้มือทั้ง 2 ข้างยึดแบบหล่อและแผ่นรองทั้ง 2 จากนั้นพลิกแบบหล่อจากล่างขึ้นมาเป็นด้านบน

10. ดึงแผ่นโลหะที่ด้านบนออก จากนั้นใช้นิ้วแม่มือทั้ง 2 นิ้วกดลงบนมอตาร์เพื่อทำการอีกมอร์ตาร์เข้าสู่แบบโดยกดจำนวน 12 ครั้งให้กระจายทั่วแบบหล่อ โดยแรงกดที่สม่ำเสมอประมาณ 6.75-9 กิโลกรัมต่อการกดหัวแม่มือแต่ละครั้ง

11. ปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินที่ล้นแบบออกโดยใช้เกรียงเหล็ก

12. ทิ้งไว้ 1 วัน จึงแกะแบบ และนำตัวอย่างไปบ่มตามระยะเวลาที่ต้องการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าเถ้าหญ้าเนเปียร์มีองค์ประกอบของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับ 95.05% ซึ่งมากกว่าความต้องการทางเคมีที่มีข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-03 [11] ผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ซึ่งผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ต้องสูงกว่า 70% จึงมีความเป็นไปได้ว่าเถ้าหญ้าเนเปียร์อาจมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ดั้งนั้นเถ้าหญ้าเนเปียร์จึงถูกเลือกในการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์

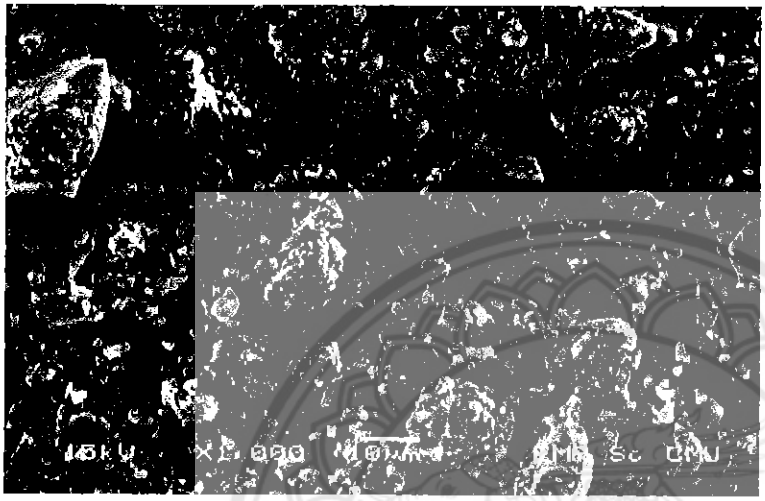
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี, พื้นที่ผิว ของเถ้าหญ้าเนเปียร์และปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้าหญ้าเนเปียร์
Al_2O_3 (%)	5.16	2.20
SiO_2 (%)	20.71	91.52
SO_3 (%)	2.14	0.55
K_2O (%)	0.48	2.45
CaO (%)	66.23	1.75
MnO_2 (%)	-	0.18
Fe_2O_3 (%)	3.22	1.31
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 (%)	-	95.04
BET specific surface area (m^2/kg)	3.20	75.92

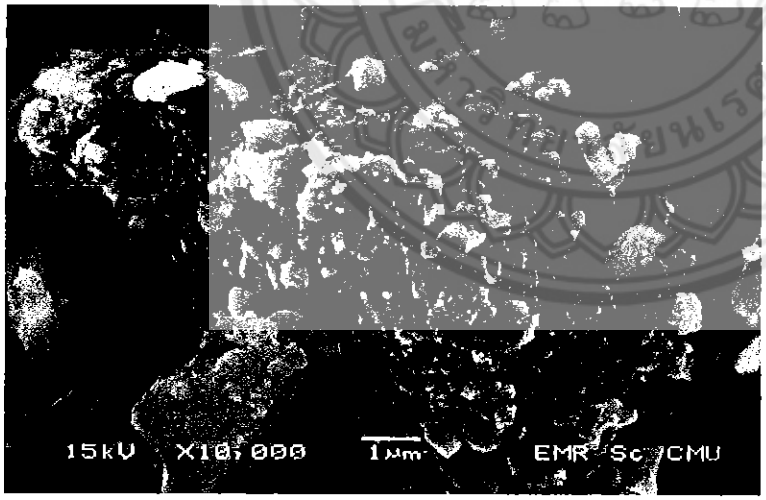
4.2 ลักษณะอนุภาคของวัสดุผง

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีขนาดอนุภาคคละกัน และมีรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ มีลักษณะผิวขรุขระ



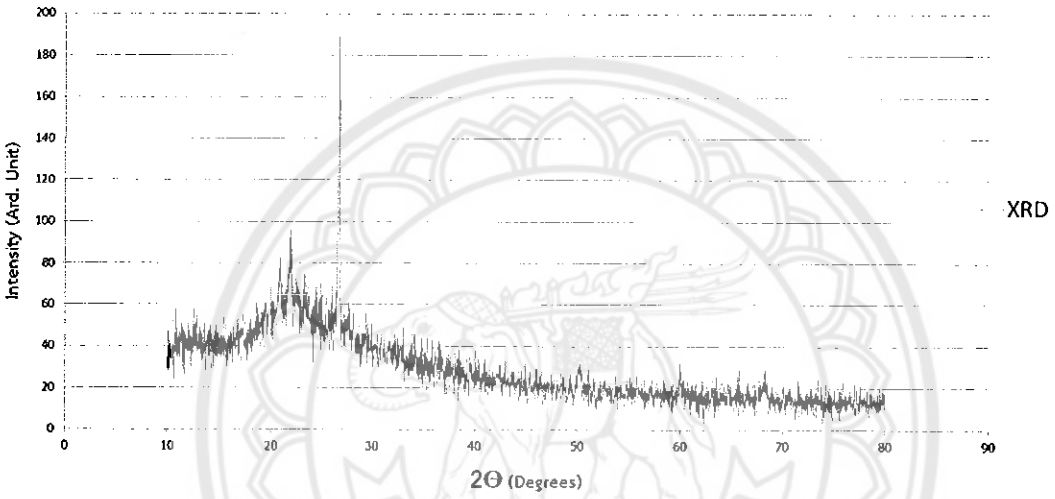
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 1,000 เท่า)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

4.3 ความเป็นผลึกของอนุภาค

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (รูปที่ 4.3) จะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟไม่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ชัดเจน รวมทั้ง broad peak ที่ 2Θ ระหว่าง 15-30° การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงมีความเป็นไปได้ว่าเถ้าหญ้าเนเปียร์อาจมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลานดั้งนั้นเถ้าหญ้าเนเปียร์จึงถูกเลือกในการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์



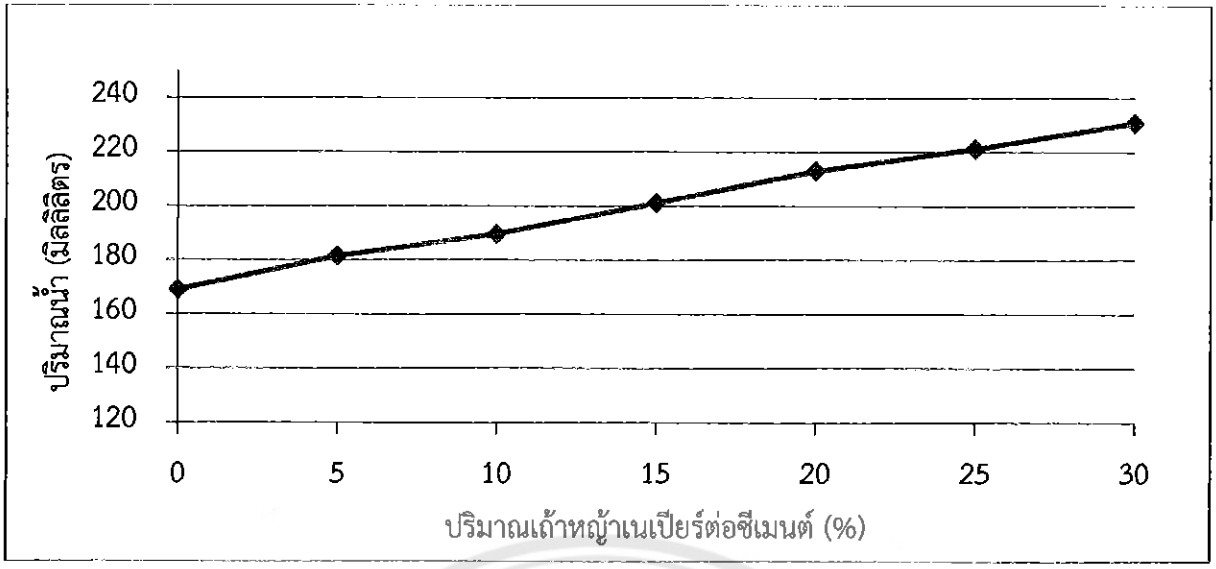
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเถ้าหญ้าเนเปียร์

4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

แสดงความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าหญ้าเนเปียร์ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์มีความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ทุกส่วนผสม การแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการของน้ำเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในส่วนผสมต่างๆ

เถ้าหญ้าเนเปียร์ (%)	0	5	10	15	20	25	30
ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)	169.0	181.5	190.0	201.0	213.0	221.2	231.0



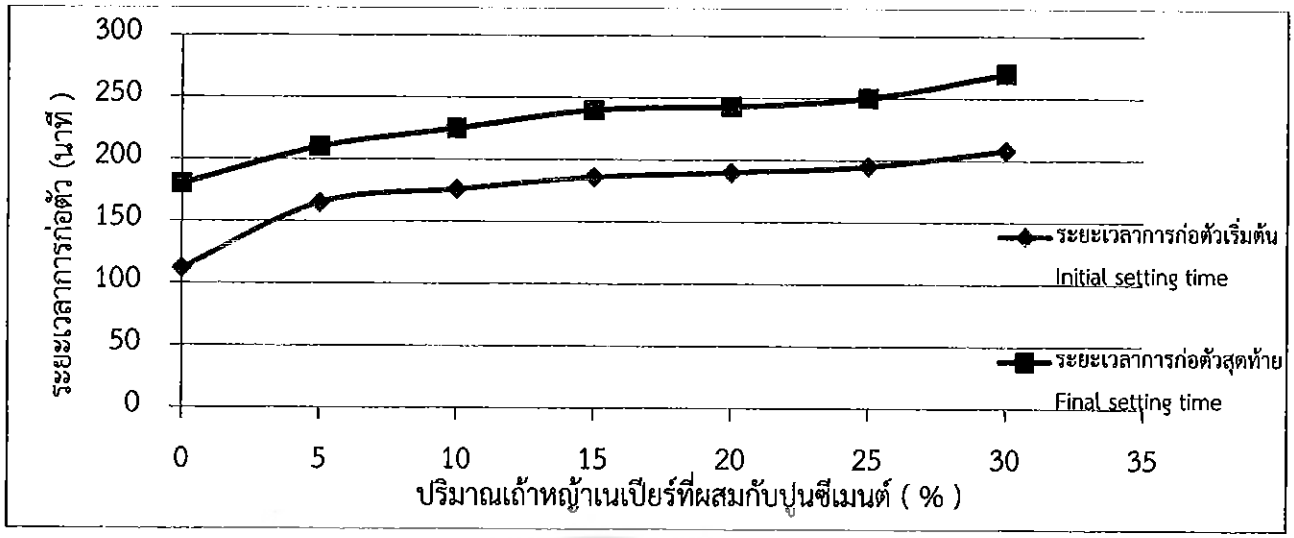
รูปที่ 4.4 กราฟปริมาณน้ำที่เหมาะสมของการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ในส่วนผสมต่างๆ

4.5 เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ถูกนำมาใช้การทดสอบหาเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ (Final Setting Time) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 จากการทดลองพบว่าการที่เพิ่มอัตราส่วนของเถ้าหญ้าเนเปียร์ จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ (Final Setting Time) เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการที่เราได้ลดปริมาณซีเมนต์และแทนที่ด้วยเถ้าหญ้าเนเปียร์จะทำให้การบวนการการเกิดปฏิกิริยาไฮเดชันช้าลง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

เถ้าหญ้าเนเปียร์ (%)	0	5	10	15	20	25	30
Initial Setting Time	112.0	165.0	176.0	186.0	190.0	195.0	208.0
Final Setting Time	180.0	210.0	225.0	240.0	243.0	250.0	270.0



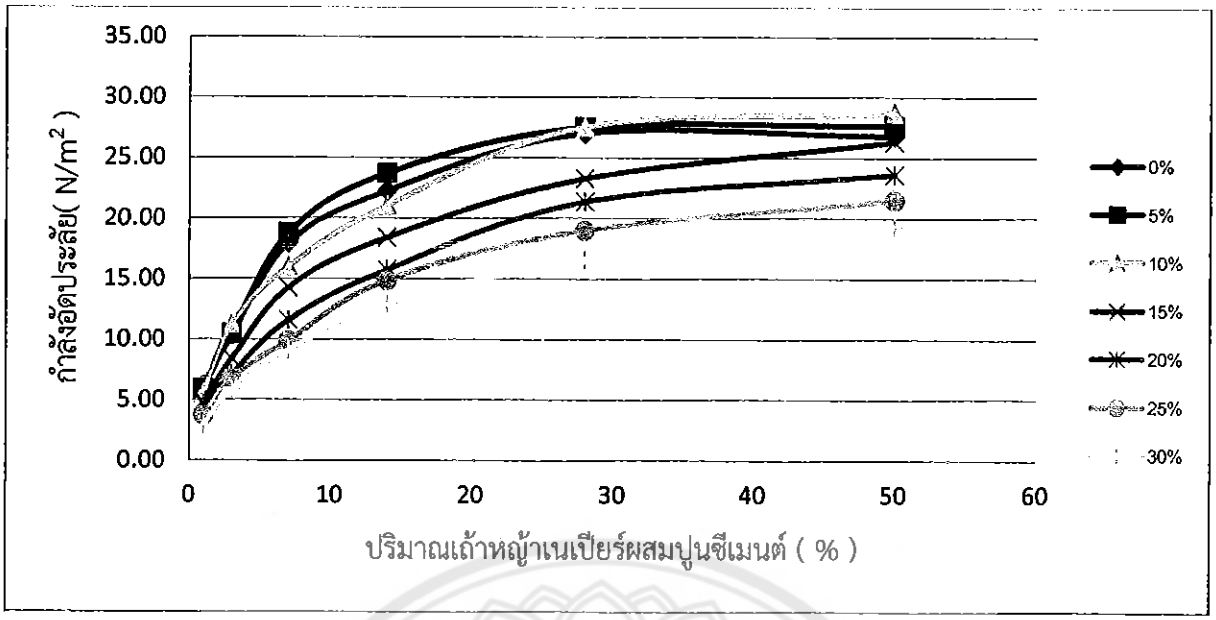
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

4.6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ

จากผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.6 - 4.12 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าหญ้าเนเปียร์ จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดชันลดลง แต่ในการผสมเถ้าเนเปียร์ที่ 5% มีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์หรือเรียกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ นอกจากนี้มอร์ตาร์ผสมหญ้าเนเปียร์ 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้นำมาคำนวณหา pozzolanic activity index ได้เท่ากับ 79.12% ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน ASTM C618-03 ที่กำหนดไว้ 75% ดังนั้นเถ้าหญ้าเนเปียร์เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

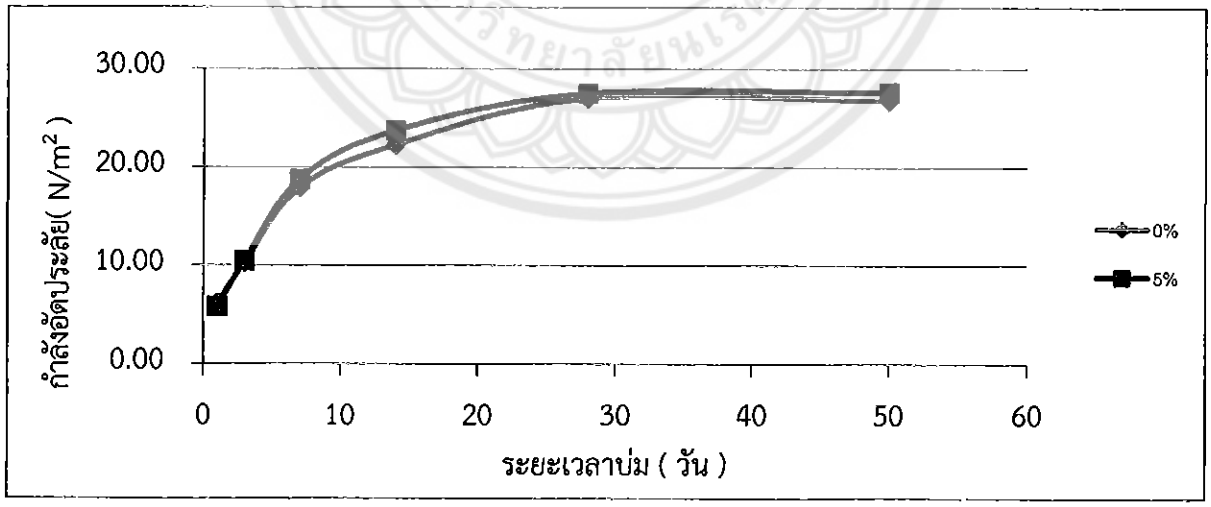
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ

เถ้าหญ้าเนเปียร์ (%)	กำลังอัด (N/m^2)					
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	50 วัน
0	6.17	10.34	17.93	22.26	27.01	26.8
5	5.88	10.50	18.77	23.72	27.51	27.63
10	5.55	11.25	15.99	21.04	27.53	28.72
15	4.80	8.40	14.27	18.39	23.29	26.33
20	4.58	7.08	11.57	15.72	21.37	23.62
25	3.76	6.80	9.88	14.86	19.00	21.50
30	2.91	5.89	9.12	12.91	16.55	19.31



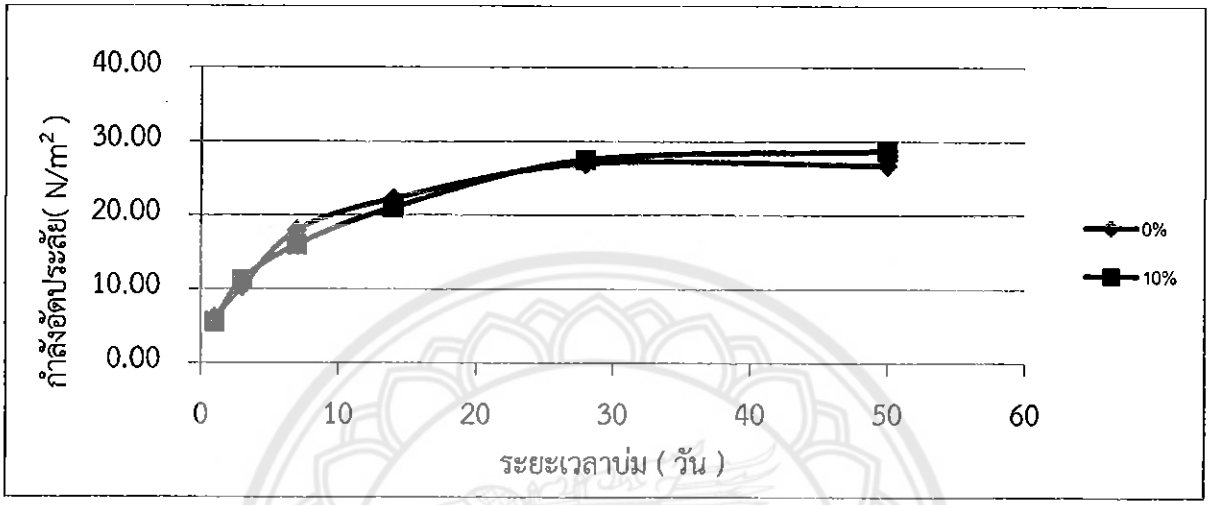
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับเปอร์เซ็นต์การแทนที่เถ้าหญ้าเนเปียร์

จากผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 แสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่น้อยทำให้มีผลกระทบกับปฏิกิริยาไฮเดชันน้อย และเมื่อรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม



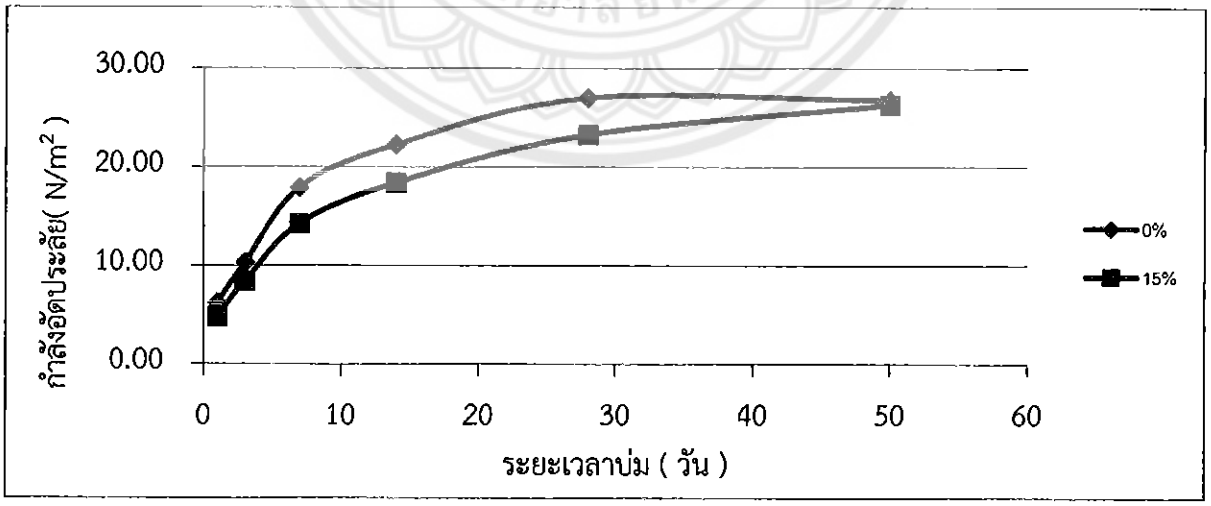
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 5%

จากผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 แสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ที่ 28 วัน เนื่องจากการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดชันช้าลง ทำให้ช่วง 1, 3, 7 และ 14 วัน มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่ามาร์ตาร์ควบคุม และเมื่อรวมกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ 28 วัน จึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

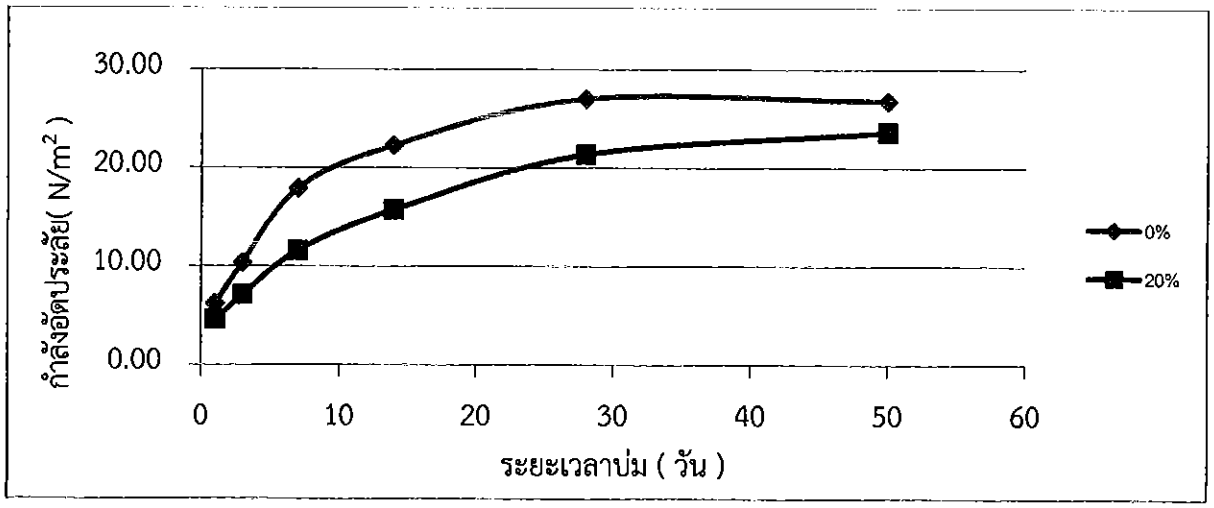


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 10%

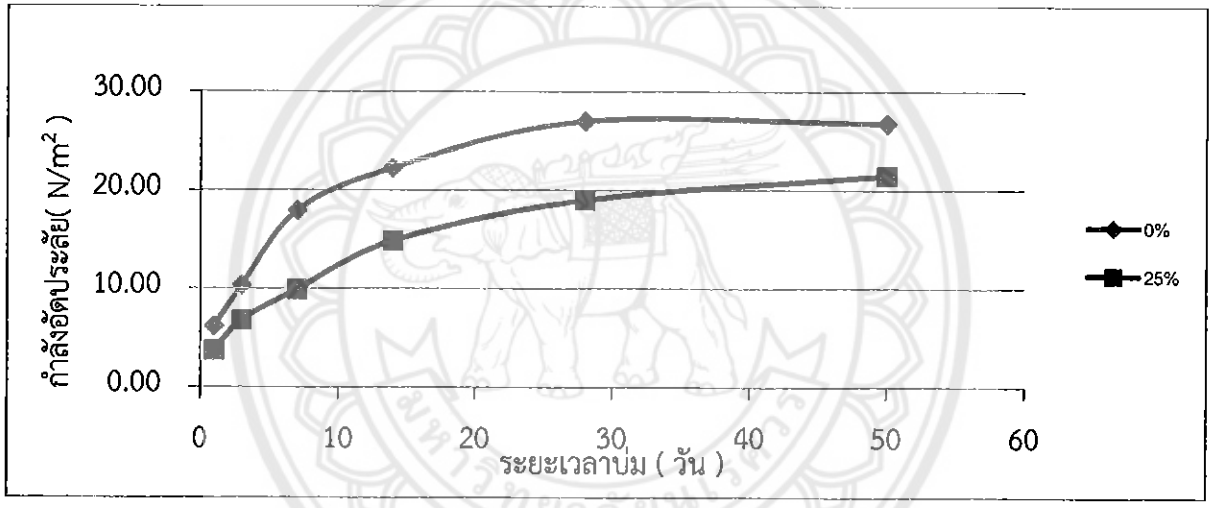
จากผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15, 20, 25 และ 30 แสดงในรูปที่ 4.9 – 4.12 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากการแทนที่ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ทำให้การเกิดกับปฏิกิริยาไฮเดชันน้อยลง จึงทำให้มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ 1, 3, 7, 14, 28 และ 50 วัน



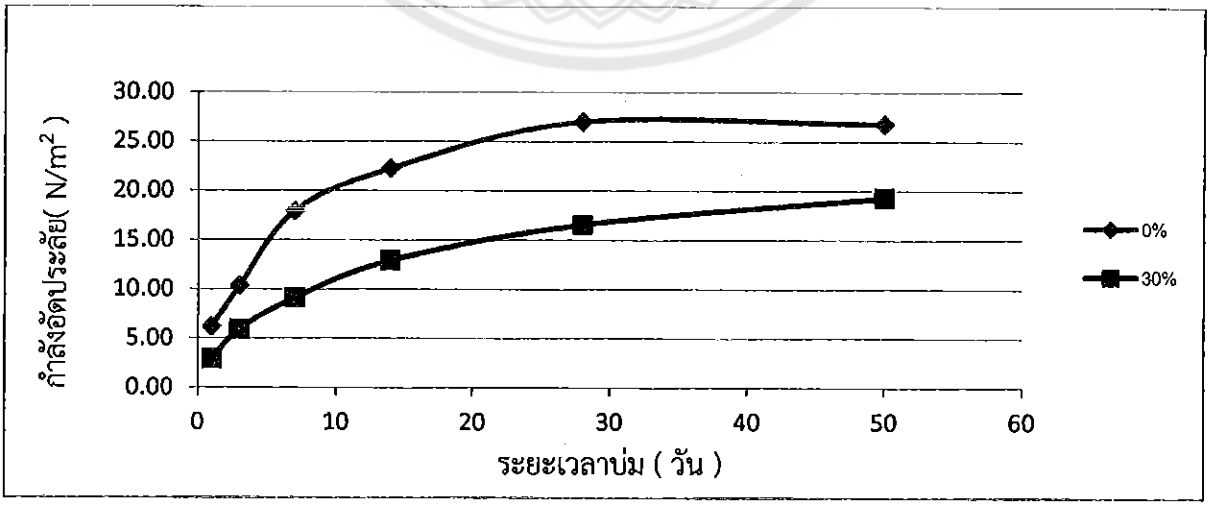
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 15%



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 20%



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 25%



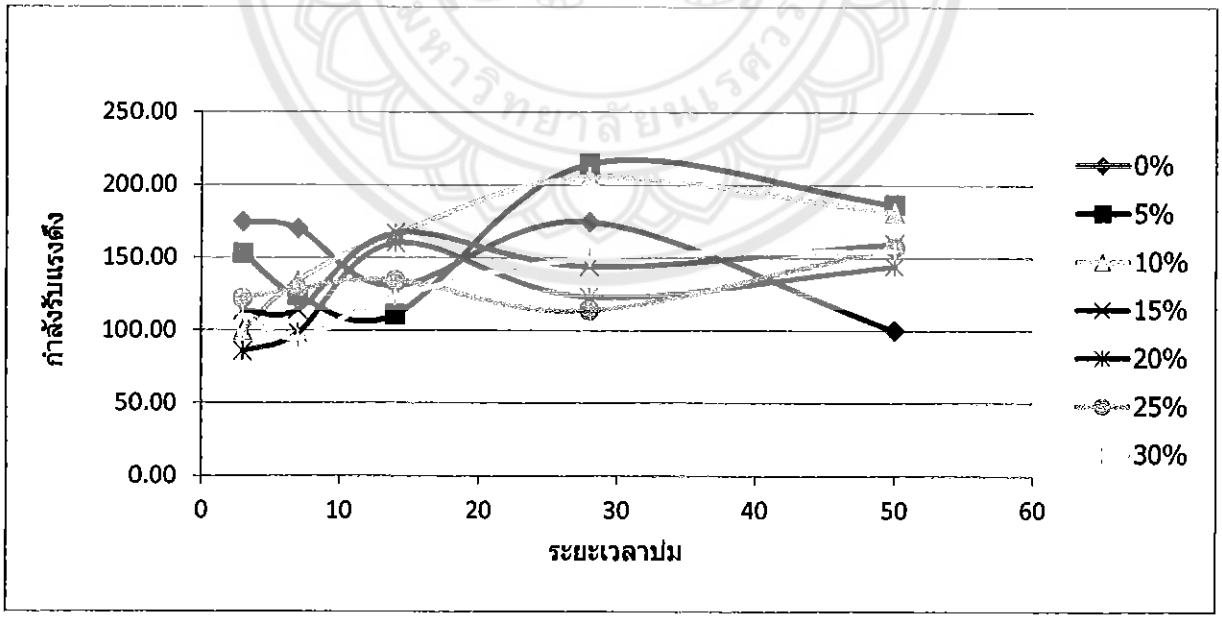
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 30%

4.7 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ

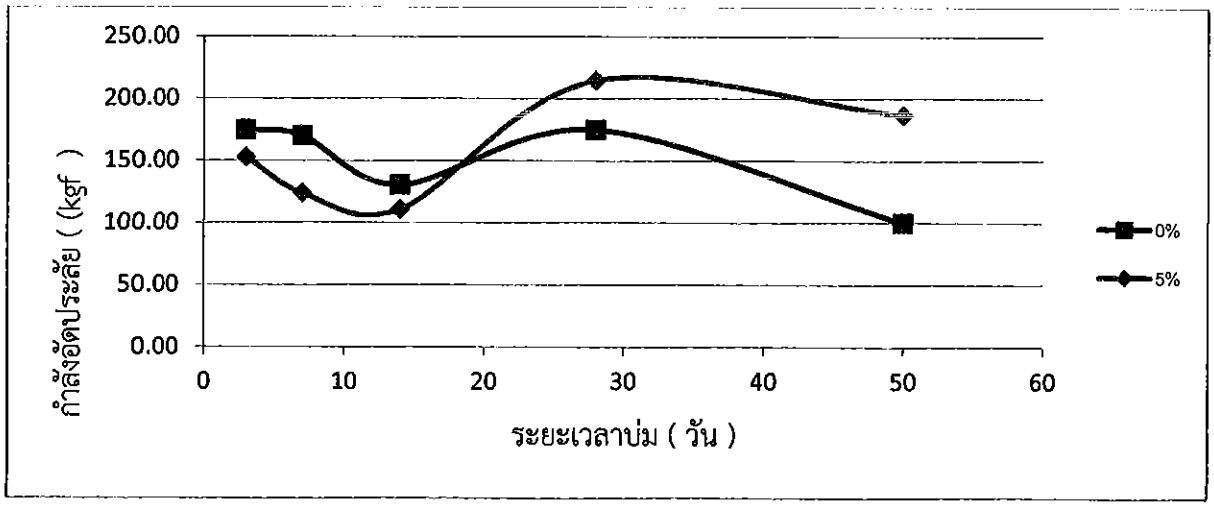
จากผลการทดลองกำลังรับแรงดึงมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละต่างๆแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 พบว่ามอร์ตาร์ที่บ่มระยะเวลาที่นานกว่า สามารถรับแรงดึงได้น้อยกว่า ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎี เป็นเพราะการอัดมอร์ตาร์ลงในแบบอาจทำได้ไม่ดีพอเท่าที่ควรและไม่มีมาตรฐานในการทดสอบกำลังรับแรงดึง จึงทำให้ผลการทดสอบผิดพลาด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ

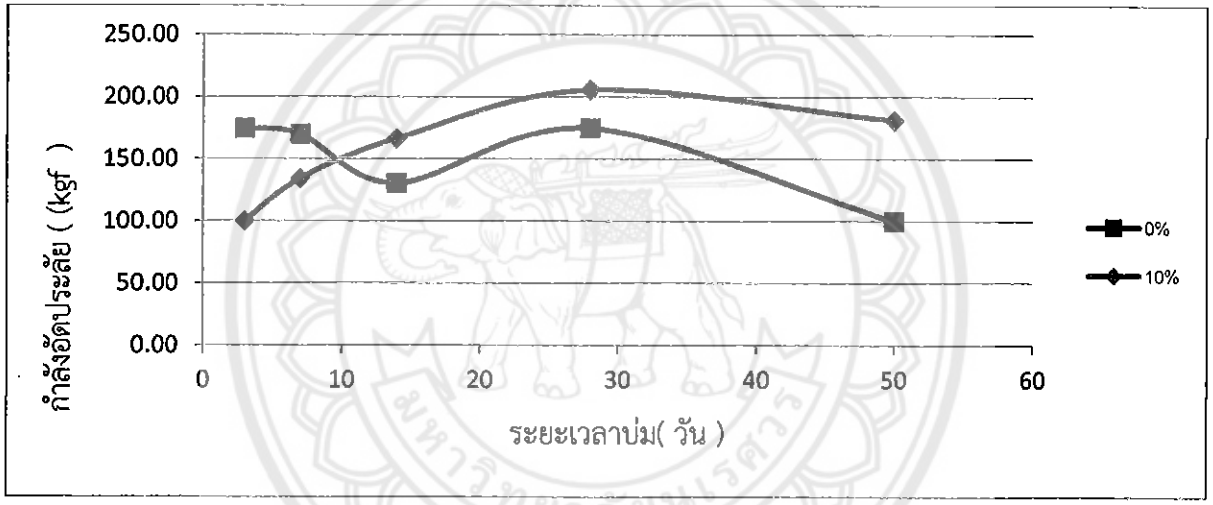
เถ้าหญ้าเนเปียร์ (%)	กำลังดึง (kgf)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	50 วัน
0	174.49	169.83	130.55	174.76	100.18
5	152.75	123.74	110.95	214.49	186.62
10	99.96	134.0.5	166.35	205.69	181.31
15	113.59	114.17	166.92	144.12	159.931
20	85.525	98.24	160.16	123.08	144.06
25	122.22	128.67	134.60	113.87	157.60
30	110.60	94.67	123.16	150.02	155.01



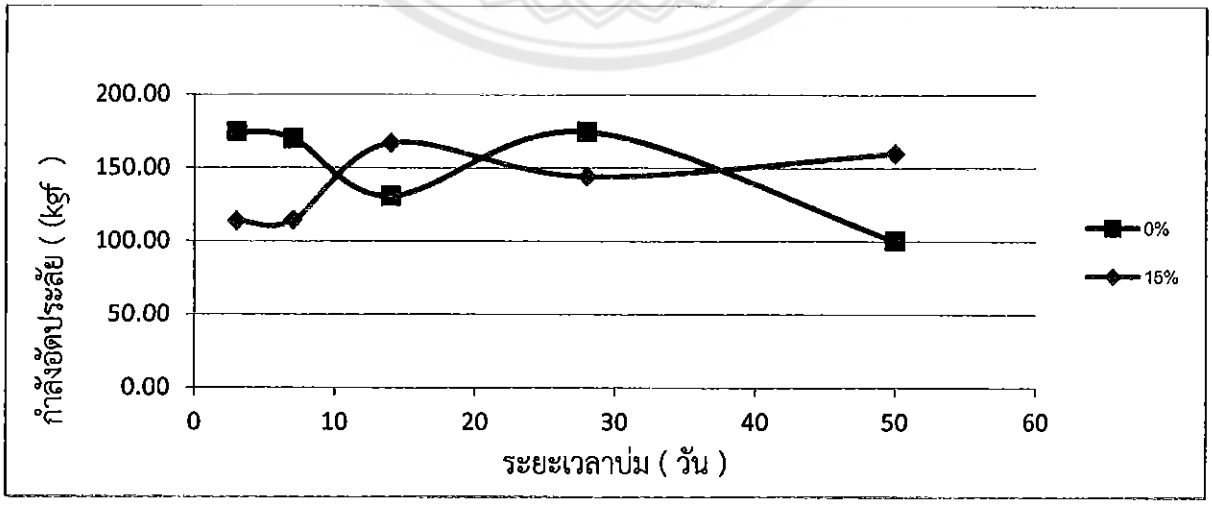
รูปที่ 4.13 กราฟผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่ส่วนผสมต่างๆ



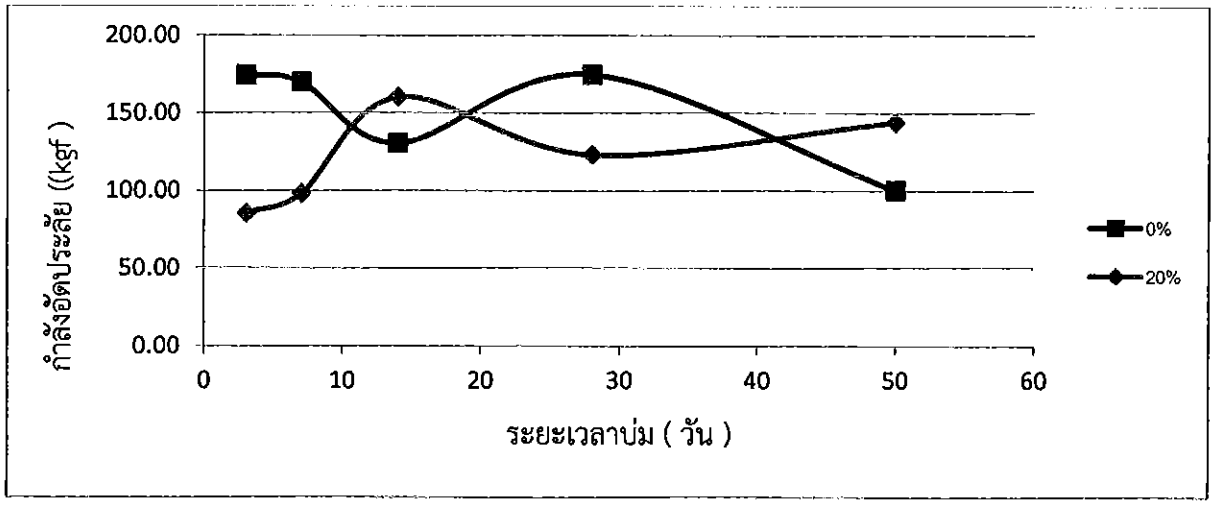
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 5%



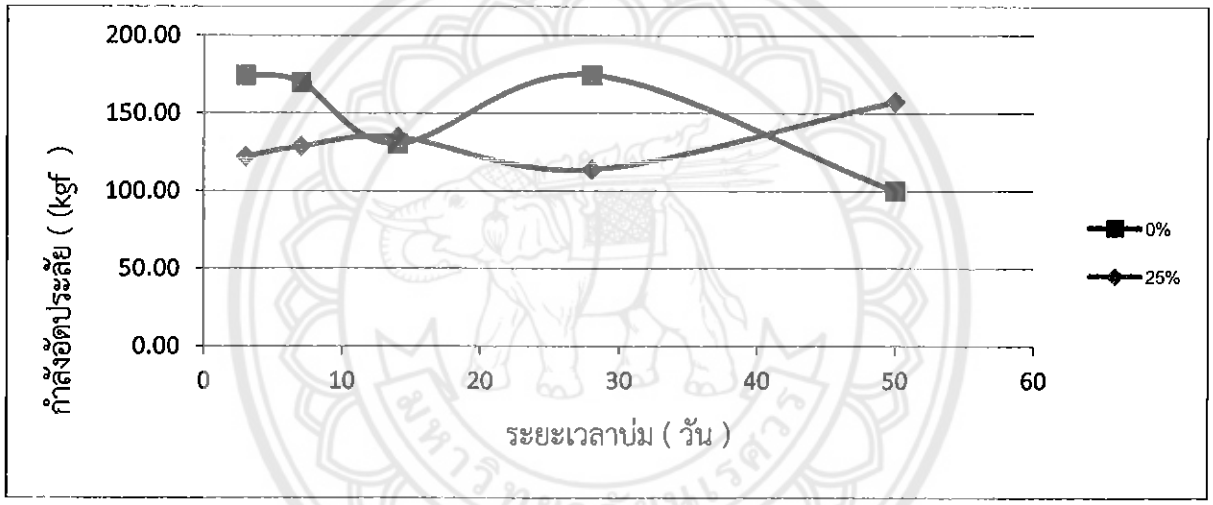
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 10%



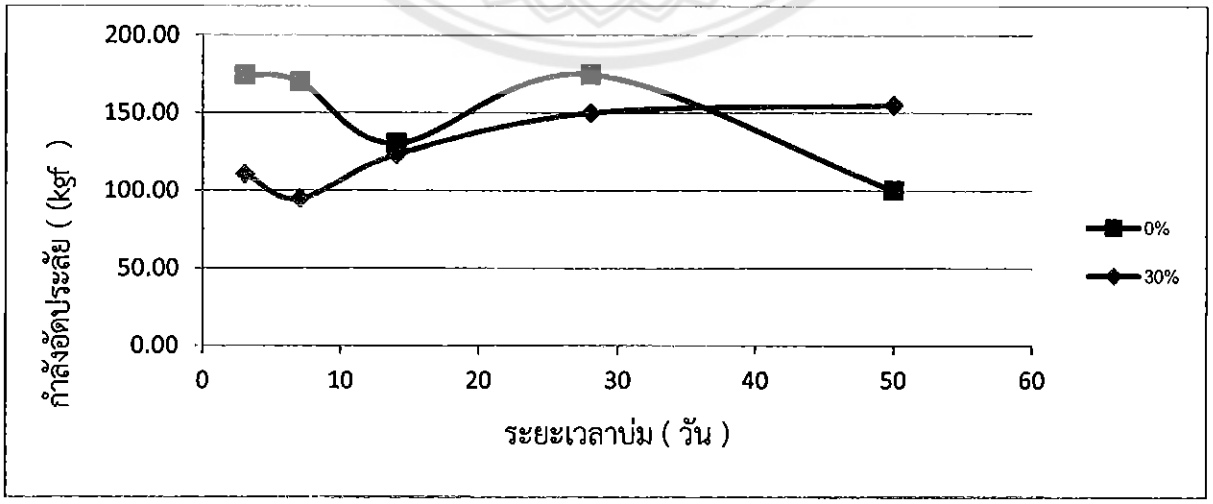
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 15%



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 20%



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 25%



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 30%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ การก่อตัวเริ่มต้นของเข็มไวแคตและการหาค่ารับแรงอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งจากผมการทดลองสามารถสรุปหาค่าความสัมพันธ์ได้ดังนี้

5.1 ผลทางเคมีของเถ้าหญ้าเนเปียร์มีค่ารวมของ Al_2O_3, SiO_2 และ Fe_2O_3 รวมกัน มีค่าเท่ากับ 95.0461% มากกว่ามาตรฐาน ASTM C 618-03 ที่กำหนดไว้ 70%

5.2 ผลของการดูดซึมน้ำ มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์มีการดูดซึมน้ำที่มากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา เนื่องจากเถ้าหญ้าเนเปียร์มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าซีเมนต์ ทำให้การดูดซึมน้ำของเถ้าหญ้าเนเปียร์มีมากกว่าซีเมนต์

5.3 ผลของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าหญ้าเนเปียร์ 20% ที่การบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัด 79.12% มากกว่ามาตรฐาน ASTM C 618-03 ที่กำหนดไว้ 75%

5.4 จากการทดสอบผมทางเคมี ฟิสิกส์ และวิศวกรรม ของเถ้าหญ้าเนเปียร์ ผมการทดสอบมากกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C 618-03 ทำให้สรุปได้ว่าเถ้าหญ้าเนเปียร์เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

บรรณานุกรม

1. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ :
http://www.erdi.cmu.ac.th/index.php/news/944?category=11

2. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xOFGZirhzO8J:ebapp4.egat.co.th/LotusQuickr/4ned/Main.nsf/

3. CPAC ,คอนกรีตเทคโนโลยี

4. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 24 หน้า 196

5. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 24 หน้า 198

6. ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มวลรวม และคอนกรีต

7. http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C191-99.htm

8. http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C187-98.htm

9. http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C109C109M-99.htm

10. http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C778-00.htm

11. http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C618-03.htm

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดสอบทางวิศวกรรม

ตาราง ก.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 1 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย KN	กำลังอัดประลัย N/m^2
0%	1	1	5x5x5	241.5	15.30	6.10
	2	1	5x5x5	241.5	15.50	6.20
	3	1	5x5x5	243.0	15.50	6.20
เฉลี่ย					15.43	6.17
5%	1	1	5x5x5	247.5	14.50	5.81
	2	1	5x5x5	246.0	14.80	5.90
	3	1	5x5x5	248.0	14.80	5.90
เฉลี่ย					14.70	5.88
10%	1	1	5x5x5	245.0	13.70	5.46
	2	1	5x5x5	244.0	13.80	5.51
	3	1	5x5x5	246.5	14.20	5.66
เฉลี่ย					13.90	5.55
15%	1	1	4.9x5x5	243.0	11.70	4.66
	2	1	4.9x5x5	243.0	12.00	4.81
	3	1	4.9x5x5	242.5	12.30	4.91
เฉลี่ย					12.00	4.80
20%	1	1	4.9x5x5	244.0	11.50	4.61
	2	1	4.9x5x5	244.5	11.70	4.66
	3	1	4.9x5x5	244.5	11.20	4.46
เฉลี่ย					11.47	4.58
25%	1	1	4.9x5x5	244.0	9.30	3.72
	2	1	4.9x5x5	244.5	9.30	3.72
	3	1	4.9x5x5	244.5	9.60	3.82
เฉลี่ย					9.40	3.76
30%	1	1	4.9x5x5	239.5	7.40	2.97
	2	1	4.9x5x5	239.0	7.20	2.88
	3	1	4.9x5x5	238.5	7.20	2.88
เฉลี่ย					7.27	2.91

ตาราง ก.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 3 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย (KN)	กำลังอัดประลัย (N/m^2)
0%	1	3	4.9x5x5	247.0	26.20	10.69
	2	3	4.9x5x5	242.5	24.20	9.88
	3	3	4.9x5x5	244.5	25.60	10.43
เฉลี่ย					25.33	10.34
5%	1	3	4.9x4.95x5	249.0	24.80	10.21
	2	3	5x5x5	248.0	26.70	10.89
	3	3	4.9x5x5	252.5	25.90	10.37
เฉลี่ย					25.80	10.50
10%	1	3	4.9x4.9x5	251.0	27.10	11.27
	2	3	5x4.8x5	252.0	27.10	11.27
	3	3	4.9x5x5	251.5	27.40	11.19
เฉลี่ย					27.20	11.25
15%	1	3	4.9x5x5	246.5	19.10	7.70
	2	3	4.9x5x5	252.0	21.80	8.91
	3	3	4.9x5x5	247.5	20.80	8.58
เฉลี่ย					20.57	8.40
20%	1	3	4.9x5x5	245.0	17.10	6.99
	2	3	4.9x5x5	243.5	17.80	7.24
	3	3	4.9x5x5	248.5	17.10	6.99
เฉลี่ย					17.33	7.08
25%	1	3	4.9x5x5	246.5	16.90	6.75
	2	3	4.9x5x5	247.5	16.60	6.65
	3	3	4.9x5x5	245.0	17.50	7.00
เฉลี่ย					17.00	6.80
30%	1	3	4.9x5x5	244.0	15.40	6.15
	2	3	4.9x5x5	242.0	14.00	5.61
	3	3	4.9x5x5	244.0	14.80	5.90
เฉลี่ย					14.73	5.89

ตาราง ก.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย (KN)	กำลังอัดประลัย (N/m^2)
0%	1	7	4.9x5x5	246.5	45.90	18.37
	2	7	4.9x5x5	247.5	43.80	17.52
	3	7	4.9x5x5	247.5	44.70	17.87
เฉลี่ย					44.80	17.93
5%	1	7	4.9x5x5	253.5	47.10	18.82
	2	7	4.9x5x5	252.0	46.70	18.66
	3	7	4.9x5x5	256.0	47.10	18.82
เฉลี่ย					46.97	18.77
10%	1	7	4.9x5x5	249.0	39.50	15.79
	2	7	4.9x5x5	250.0	40.70	16.28
	3	7	4.9x5x5	250.5	39.70	15.89
เฉลี่ย					39.97	15.99
15%	1	7	4.9x5x5	249.0	36.50	14.59
	2	7	4.9x5x5	249.0	34.80	13.90
	3	7	4.9x5x5	245.5	35.80	14.30
เฉลี่ย					35.70	14.27
20%	1	7	4.9x5x5	247.0	29.90	11.96
	2	7	4.9x5x5	247.5	28.30	11.32
	3	7	4.9x5x5	249.0	28.60	11.42
เฉลี่ย					28.93	11.57
25%	1	7	4.9x5x5	247.0	26.10	10.42
	2	7	4.9x5x5	2450	23.30	9.33
	3	7	4.9x5x5	244.5	24.70	9.88
เฉลี่ย					24.70	9.88
30%	1	7	4.9x5x5	244.0	23.50	9.38
	2	7	4.9x5x5	245.0	22.60	9.03
	3	7	4.9x5x5	243.0	22.30	8.93
เฉลี่ย					22.80	9.12

ตาราง ก.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 14 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย (KN)	กำลังอัดประลัย (N/m^2)
0%	1	14	4.9x5x5	250.5	59.80	23.93
	2	14	4.9x5x5	248.0	52.60	21.05
	3	14	4.9x5x5	248.0	54.50	21.80
เฉลี่ย					55.63	22.26
5%	1	14	4.9x5x5	250.5	60.60	24.23
	2	14	4.9x5x5	251.0	56.00	22.39
	3	14	4.9x5x5	253.0	61.30	24.53
เฉลี่ย					59.30	23.72
10%	1	14	4.9x5x5	251.5	54.60	21.84
	2	14	4.9x5x5	253.0	53.40	21.35
	3	14	4.9x5x5	252.0	49.80	19.91
เฉลี่ย					52.60	21.04
15%	1	14	4.9x5x5	250.0	46.40	18.57
	2	14	4.9x5x5	251.0	44.80	17.92
	3	14	4.9x5x5	250.5	46.70	18.67
เฉลี่ย					45.97	18.39
20%	1	14	4.9x5x5	247.0	39.40	15.74
	2	14	4.9x5x5	249.0	41.20	16.48
	3	14	4.9x5x5	248.5	37.40	14.94
เฉลี่ย					39.33	15.72
25%	1	14	4.9x5x5	247.0	37.60	15.04
	2	14	4.9x5x5	247.0	36.60	14.64
	3	14	4.9x5x5	246.0	37.20	14.89
เฉลี่ย					37.13	14.86
30%	1	14	4.9x5x5	244.5	32.00	12.81
	2	14	4.9x5x5	243.0	32.30	12.91
	3	14	4.9x5x5	245.5	32.50	13.01
เฉลี่ย					32.27	12.91

ตาราง ก.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย (KN)	กำลังอัดประลัย (N/m^2)
0%	1	28	4.9x5x5	248.5	67.50	27.56
	2	28	4.9x5x5	249.5	66.50	27.16
	3	28	4.9x5x5	251.0	64.40	26.29
เฉลี่ย					66.13	27.01
5%	1	28	4.9x5x5	252.5	65.10	26.55
	2	28	4.9x5x5	252.5	69.50	28.37
	3	28	4.9x5x5	251.5	67.70	27.61
เฉลี่ย					67.43	27.51
10%	1	28	4.9x5x5	253.5	68.90	28.12
	2	28	4.9x5x5	254.0	68.70	28.04
	3	28	4.9x5x5	254.0	64.80	26.43
เฉลี่ย					67.47	27.53
15%	1	28	4.9x5x5	251.0	56.70	23.15
	2	28	4.9x5x5	252.0	57.20	23.35
	3	28	4.9x5x5	249.0	57.10	23.33
เฉลี่ย					57.00	23.29
20%	1	28	4.9x5x5	248.5	50.20	20.47
	2	28	4.9x5x5	249.5	52.80	21.53
	3	28	4.9x5x5	251.0	54.10	22.09
เฉลี่ย					52.37	21.37
25%	1	28	4.9x5x5	247.0	46.80	19.10
	2	28	4.9x5x5	247.0	46.10	18.79
	3	28	4.9x5x5	248.0	46.80	19.10
เฉลี่ย					46.57	19.00
30%	1	28	4.9x5x5	243.0	39.50	16.11
	2	28	4.9x5x5	242.0	41.10	16.77
	3	28	4.9x5x5	242.5	41.10	16.77
เฉลี่ย					40.57	16.55

ตาราง ก.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 50 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	หน้าตัด (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงอัดประลัย (KN)	กำลังอัดประลัย (N/m^2)
0%	1	50	5x5x5	248.5	63.30	25.32
	2	50	5x5x5	249.0	66.70	27.21
	3	50	5x5x5	253.5	69.60	27.85
เฉลี่ย					66.53	26.80
5%	1	50	5x5x5	250.5	68.20	27.21
	2	50	4.9x5x5	251.0	68.00	27.76
	3	50	5x5x5	245.0	69.80	27.90
เฉลี่ย					68.67	27.63
10%	1	50	5x5x5	252.5	67.70	27.06
	2	50	5x5x5	245.0	73.00	29.79
	3	50	5x5x5	252.5	74.20	29.30
เฉลี่ย					71.63	28.72
15%	1	50	4.9x5x5	251.0	66.80	27.36
	2	50	4.9x5x5	252.2	64.60	26.34
	3	50	4.9x5x5	253.5	61.90	25.28
เฉลี่ย					64.43	26.33
20%	1	50	4.9x5x5	250.0	57.70	23.55
	2	50	4.9x5x5	250.0	58.50	23.38
	3	50	4.9x5x5	250.0	58.60	23.91
เฉลี่ย					58.27	23.62
25%	1	50	4.9x5x5	246.5	53.30	21.73
	2	50	4.9x5x5	245.0	52.80	21.48
	3	50	4.9x5x5	245.0	52.10	21.28
เฉลี่ย					52.73	21.50
30%	1	50	4.9x5x5	245.0	48.00	19.61
	2	50	4.9x5x5	244.5	47.20	19.25
	3	50	4.9x5x5	245.5	46.70	19.05
เฉลี่ย					47.30	19.31

ตาราง ก.7 ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 3 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (วัน)	ขนาด (เซนติเมตร)	แรงดึงประลัย (kpf)
0%	1	3	2.5x2.5	146.05
	2	3	2.5x2.5	202.48
	3	3	2.5x2.5	174.93
เฉลี่ย				174.49
5%	1	3	2.5x2.5	143.83
	2	3	2.5x2.5	144.36
	3	3	2.5x2.5	170.05
เฉลี่ย				152.74
10%	1	3	2.5x2.5	122.58
	2	3	2.5x2.5	90.75
	3	3	2.5x2.5	86.59
เฉลี่ย				99.96
15%	1	3	2.5x2.5	103.87
	2	3	2.5x2.5	115.65
	3	3	2.5x2.5	121.32
เฉลี่ย				113.59
20%	1	3	2.5x2.5	87.16
	2	3	2.5x2.5	97.05
	3	3	2.5x2.5	72.38
เฉลี่ย				85.52
25%	1	3	2.5x2.5	125.20
	2	3	2.5x2.5	113.31
	3	3	2.5x2.5	128.14
เฉลี่ย				122.21
30%	1	3	2.5x2.5	80.71
	2	3	2.5x2.5	131.01
	3	3	2.5x2.5	120.08
เฉลี่ย				110.60

ตาราง ก.8 ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (วัน)	ขนาด (เซนติเมตร)	แรงดึงประลัย (kpf)
0%	1	7	2.5x2.5	174.69
	2	7	2.5x2.5	171.83
	3	7	2.5x2.5	162.95
เฉลี่ย				169.82
5%	1	7	2.5x2.5	117.93
	2	7	2.5x2.5	145.00
	3	7	2.5x2.5	108.29
เฉลี่ย				123.74
10%	1	7	2.5x2.5	137.76
	2	7	2.5x2.5	134.53
	3	7	2.5x2.5	129.84
เฉลี่ย				134.046
15%	1	7	2.5x2.5	139.76
	2	7	2.5x2.5	107.27
	3	7	2.5x2.5	95.46
เฉลี่ย				114.18
20%	1	7	2.5x2.5	79.12
	2	7	2.5x2.5	93.84
	3	7	2.5x2.5	121.72
เฉลี่ย				98.28
25%	1	7	2.5x2.5	133.34
	2	7	2.5x2.5	126.88
	3	7	2.5x2.5	125.76
เฉลี่ย				128.66
30%	1	7	2.5x2.5	-
	2	7	2.5x2.5	106.08
	3	7	2.5x2.5	83.24
เฉลี่ย				94.66

ตาราง ก.9 ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 14 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (วัน)	ขนาด (เซนติเมตร)	แรงดึงประลัย (kpf)
0%	1	14	2.5x2.5	129.30
	2	14	2.5x2.5	129.92
	3	14	2.5x2.5	132.42
เฉลี่ย				130.55
5%	1	14	2.5x2.5	15.54
	2	14	2.5x2.5	152.56
	3	14	2.5x2.5	164.75
เฉลี่ย				110.95
10%	1	14	2.5x2.5	168.10
	2	14	2.5x2.5	167.02
	3	14	2.5x2.5	163.91
เฉลี่ย				166.34
15%	1	14	2.5x2.5	160.89
	2	14	2.5x2.5	168.74
	3	14	2.5x2.5	171.14
เฉลี่ย				166.92
20%	1	14	2.5x2.5	158.14
	2	14	2.5x2.5	160.09
	3	14	2.5x2.5	162.25
เฉลี่ย				160.16
25%	1	14	2.5x2.5	136.72
	2	14	2.5x2.5	134.05
	3	14	2.5x2.5	133.00
เฉลี่ย				134.59
30%	1	14	2.5x2.5	122.06
	2	14	2.5x2.5	119.93
	3	14	2.5x2.5	127.49
เฉลี่ย				123.16

ตาราง ก.10 ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

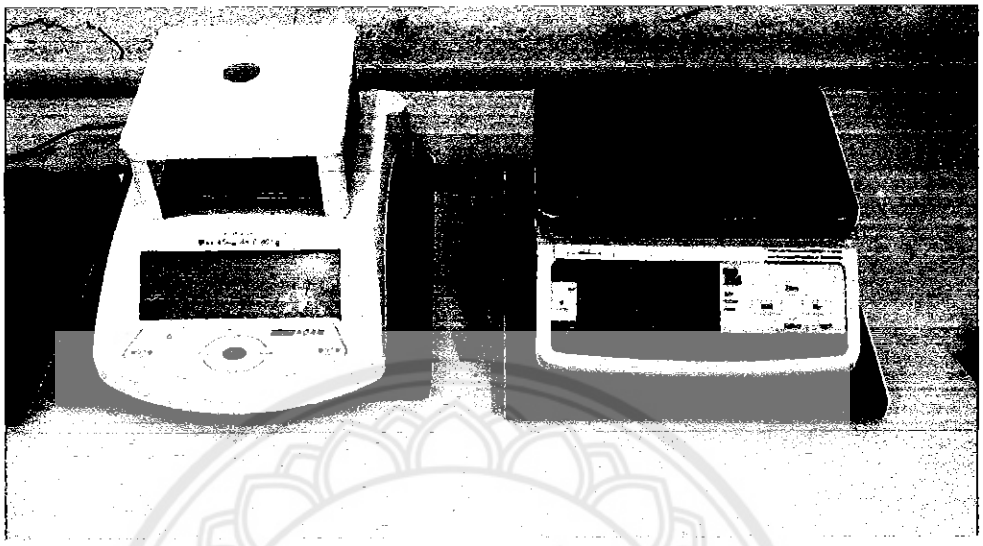
อัตราส่วน	ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (วัน)	ขนาด (เซนติเมตร)	แรงดึงประลัย (kpf)
0%	1	28	2.5x2.5	171.90
	2	28	2.5x2.5	183.58
	3	28	2.5x2.5	168.78
เฉลี่ย				174.75
5%	1	28	2.5x2.5	210.57
	2	28	2.5x2.5	218.59
	3	28	2.5x2.5	214.29
เฉลี่ย				214.48
10%	1	28	2.5x2.5	200.37
	2	28	2.5x2.5	203.77
	3	28	2.5x2.5	212.93
เฉลี่ย				205.69
15%	1	28	2.5x2.5	140.89
	2	28	2.5x2.5	141.82
	3	28	2.5x2.5	149.64
เฉลี่ย				144.12
20%	1	28	2.5x2.5	115.29
	2	28	2.5x2.5	115.55
	3	28	2.5x2.5	138.40
เฉลี่ย				123.08
25%	1	28	2.5x2.5	113.22
	2	28	2.5x2.5	115.80
	3	28	2.5x2.5	112.59
เฉลี่ย				113.87
30%	1	28	2.5x2.5	152.97
	2	28	2.5x2.5	154.55
	3	28	2.5x2.5	142.52
เฉลี่ย				150.01

ตาราง ก.11 ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ระยะการบ่ม 50 วัน

อัตราส่วน	ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (วัน)	ขนาด (เซนติเมตร)	แรงดึงประลัย (kpf)
0%	1	50	2.5x2.5	150.00
	2	50	2.5x2.5	140.46
	3	50	2.5x2.5	10.071
เฉลี่ย				100.17
5%	1	50	2.5x2.5	165.49
	2	50	2.5x2.5	218.66
	3	50	2.5x2.5	175.71
เฉลี่ย				186.62
10%	1	50	2.5x2.5	201.02
	2	50	2.5x2.5	161.79
	3	50	2.5x2.5	181.11
เฉลี่ย				181.31
15%	1	50	2.5x2.5	158.00
	2	50	2.5x2.5	138.98
	3	50	2.5x2.5	182.80
เฉลี่ย				159.93
20%	1	50	2.5x2.5	162.16
	2	50	2.5x2.5	135.92
	3	50	2.5x2.5	134.08
เฉลี่ย				144.06
25%	1	50	2.5x2.5	158.76
	2	50	2.5x2.5	173.60
	3	50	2.5x2.5	140.43
เฉลี่ย				157.60
30%	1	50	2.5x2.5	171.75
	2	50	2.5x2.5	127.22
	3	50	2.5x2.5	166.06
เฉลี่ย				155.01

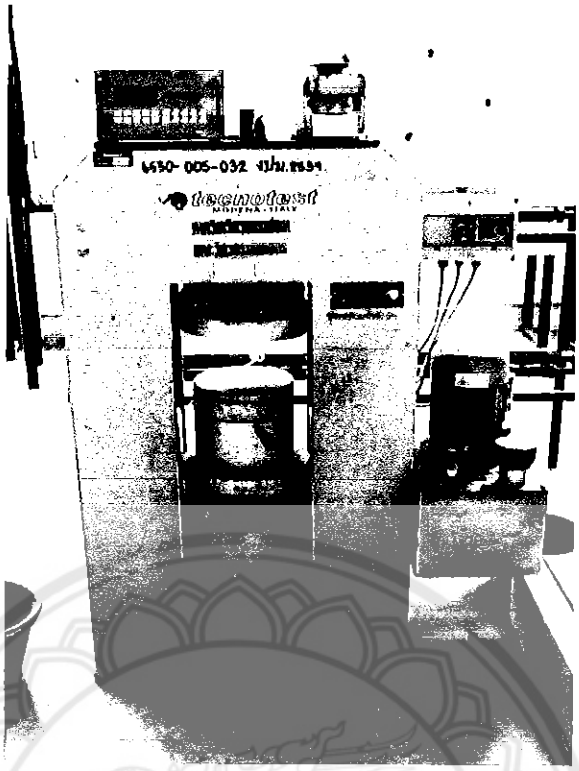
ภาคผนวก ข

รูปภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

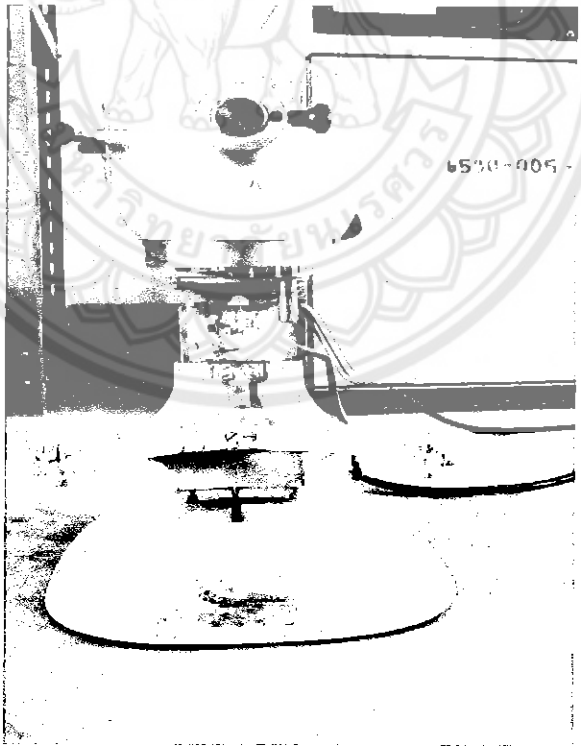


รูปที่ ข.1 เครื่องชั่งไฟฟ้า

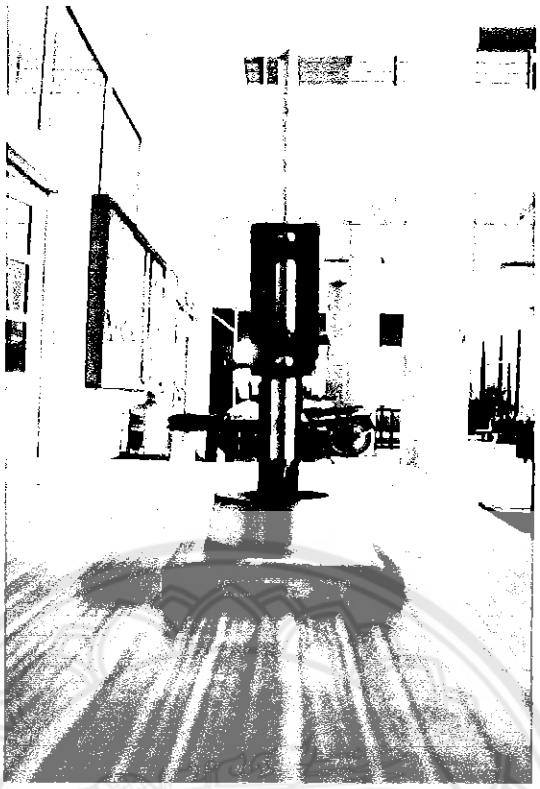
รูปที่ ข.2 เครื่องร่อน (Sieve)



รูปที่ ข.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ ข.4 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์

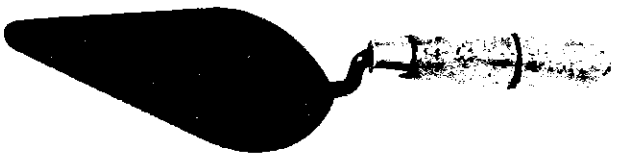


รูปที่ ข.5 เครื่องทดสอบไวแคต

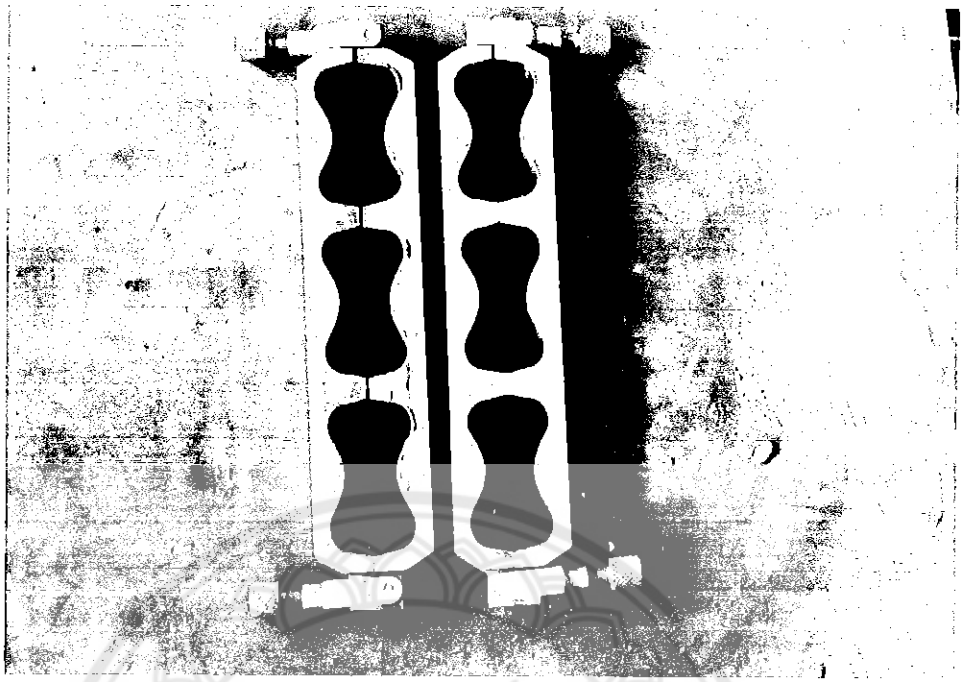
รูปที่ ข.6 เครื่องทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

รูปที่ ข.7 กระบอกตวง

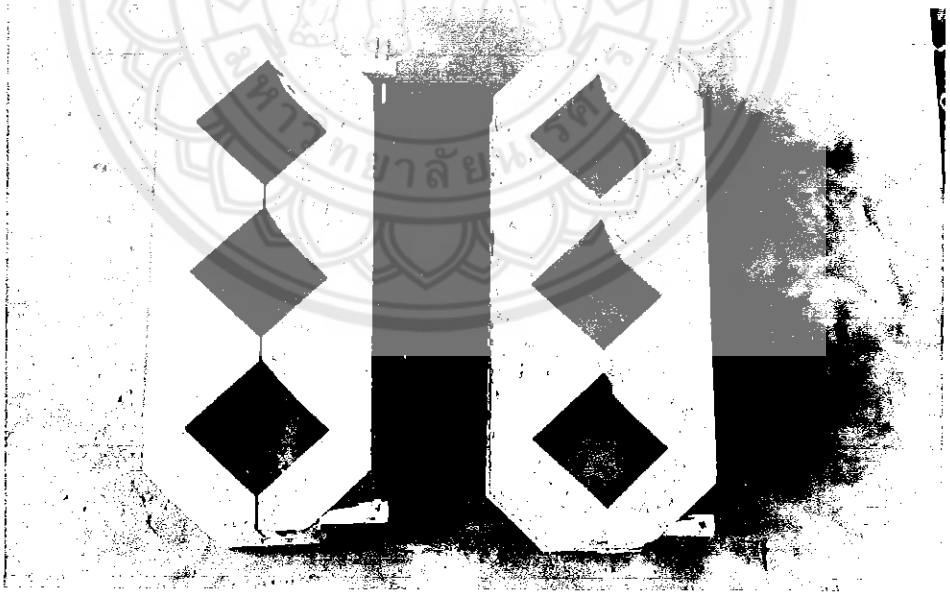
รูปที่ ข.8 ถาดใส่มอร์ตาร์



รูปที่ ข.9 เกรียงเหล็ก



รูปที่ ข.10 แบบหล่อมอร์ตาร์รูปบริเคต (Briquet)



รูปที่ ข.11 แบบหล่อมอร์ตาร์รูปลูกบาศก์

รูปที่ ข.12 ตู้อบ

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

1. ชื่อ : นายกฤษฎา ดอนไพร
ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 85 หมู่ 6 ตำบลมะตูม อำเภอพรหมพิราม จังหวัดพิษณุโลก
การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
: กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

2. ชื่อ : นายภัคณภัทร พูลทองคำ
ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 23 หมู่ 9 ตำบลวังศาล อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์
การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชนแดนวิทยาคม
: กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

3. ชื่อ : นายณัฐพล เอี่ยมสะอาด
ที่อยู่ : บ้านเลขที่ 106/6 หมู่ 11 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก
การศึกษา : จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
: กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4