

การพัฒนาชั้นหินโรยทางรถไฟด้วยวิธีซีเมนต์เกราท์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางรถไฟ

THE DEVELOPMENT OF RAILROAD BALLAST LAYERS WITH THE CEMENT GROUT  
METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE RAILWAY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DEVELOPMENT OF RAILROAD BALLAST LAYERS WITH THE CEMENT GROUT  
METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE RAILWAY



DANUPHON SANGNUT

SIWA JUNDANG

SUPAT BUAKAEW

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาชั้นหินโรยทางรถไฟด้วยวิธีซีเมนต์เกราท์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางรถไฟ  
THE DEVELOPMENT OF RAILROAD BALLAST LAYERS WITH THE CEMENT  
GROUT METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE RAILWAY

นักศึกษา นายดณพล สังข์นุช รหัสนักศึกษา 63015051  
นายศิวะ จันทร์แดง รหัสนักศึกษา 63015173  
นายศุภัช บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 63015176

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา	
ดร.ทรงศักดิ์ สุชาสุประดิษฐ์	
ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.ชลิตา อุตะเงาะ)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา


วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ    การพัฒนาชั้นหินโรยทางรถไฟด้วยวิธีซีเมนต์เกร้าท์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางรถไฟ  
THE DEVELOPMENT OF RAILROAD BALLAST LAYERS WITH THE CEMENT GROUT METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE RAILWAY

นักศึกษา	นายคุณพล    สังกันช	รหัสนักศึกษา 63015051
	นายศิวัช    จันทร์แดง	รหัสนักศึกษา 63015173
	นายศุภวิช    บัวแก้ว	รหัสนักศึกษา 63015176
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา	

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. รัฐภูมิ	ปริชาติปรีชา	
ดร.ทรงศักดิ์	สุชาสุประดิษฐ์	
ดร.ภาณุมาศ	ไพโรจน์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.ชลิตา อู่ตะเภา)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาชั้นหินโรยทางรถไฟด้วยวิธีซีเมนต์เกราท์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางรถไฟ

นายคณพล สังข์นุช รหัสนักศึกษา 63015051

นายศิวะ จันทร์แดง รหัสนักศึกษา 63015173

นายศุภัช บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 63015176

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

ระบบรางแบบมีหินโรยทางถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายบนรางรถไฟทั่วไป เนื่องจากความง่ายในการก่อสร้าง แต่ข้อบกพร่องที่สำคัญของมันคือความจำเป็นในการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ด้วยความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับยานพาหนะที่ใช้รถไฟซึ่งมีความเร็วและความจุสูงขึ้น รางคอนกรีตจึงได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงสูงและการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างต่ำ เทคโนโลยีการแปลงอย่างรวดเร็วได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้เพื่อเปลี่ยนรางบัลลาสต์ที่มีอยู่ให้เป็นรางคอนกรีตโดยใช้มอร์ตาร์ที่แข็งตัวเร็วที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีการพัฒนาการไหลและความแข็งแรงสูงในระยะเริ่มต้น ซึ่งอาจลดการหยุดชะงักของการเดินรถไฟได้ เพื่อประเมินความสามารถในการใช้งานของปูนที่พัฒนาแล้วในภาคสนาม ได้มีการพิจารณาลักษณะความทนทาน ความสิ้นเปลือง และการพัฒนาความแข็งแรงของซีเมนต์เกราท์ เพื่อพัฒนาส่วนผสมและเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุด ทั้งในด้านความแข็งแรง การไหลตัวที่ดี และระยะเวลาในการทำงานได้

# THE DEVELOPMENT OF RAILROAD BALLAST LAYERS WITH THE CEMENT GROUT METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE RAILWAY

Mr.Danuphon Sangnut Student ID 63015051

Mr.Siwa Jundang Student ID 63015173

Mr.Supat Buakaew Student ID 63015176

Advisor: Asst. Prof. Dr. Rattapoom Parichatprecha

Academic Year 2022

## ABSTRACT

The ballasted track system has been widely adopted on conventional railways due to its ease of construction, but its key shortcoming is its need for frequent maintenance. In recent years, with the growing demand for railway vehicles capable of higher speeds and capacities, the concrete track is becoming more popular due to its high rigidity and relatively low maintenance. A fast converting technology was developed in this study to transform the existing ballasted tracks into concrete tracks using the developed quick-hardening mortar, which has high fluidity and strength development at an early stage, such that it could minimize the interruption of train operation. To assess the applicability of the developed mortar in the field, durability, fluidity and strength development of the mortar To develop ingredients and select the best combination in terms of strength, Good fluidity and working time

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก

ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องคอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดีพวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่างๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่างๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอดทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ดณุพล      สัจจ์นุช

ศิวะ          จันท์แดง

ศุภัช        บัวแก้ว

## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โครงสร้างทางรถไฟ.....	3
2.2.1 ทางรถไฟมีกี่ประเภท.....	3
2.1.2 วัสดุของแต่ละประเภท.....	4
2.1.3 ความแตกต่างของแต่ละประเภท.....	7
2.1.4 แต่ละประเภทเหมาะสำหรับรถแบบไหน.....	7
2.1.5 ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละประเภท.....	8
2.1.6 การระบายน้ำของทางรถไฟแต่ละประเภท.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2	เก้าอี้ลอย.....	8
2.3	ซีลิกาฟูม.....	13
2.4	ซีเมนต์เกร้าท์.....	16
2.5	ปูนซีเมนต์.....	17
2.6	Polycarboxylate ether (PCE).....	18
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	23
3.2	การออกแบบและการทดสอบ.....	24
3.3	การออกแบบส่วนผสมของซีเมนต์เกร้าท์.....	24
3.4	วัสดุและคุณสมบัติ.....	25
3.5	การออกแบบส่วนผสม.....	31
3.6	การทดสอบ.....	32
บทที่ 4	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
4.1	ผลการทดสอบซีเมนต์เกร้าท์.....	40
4.2	ผลการทดสอบคอนกรีต.....	45
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1	สรุป.....	48
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างทางรถไฟทั้ง 2 ประเภท.....	7
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียทางรถไฟทั้ง 2 ประเภท.....	8
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	10
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นล้อยตามมาตรฐาน มอก. 2135 – 2545.....	11
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นล้อยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014.....	11
ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นล้อยจากแหล่งต่าง ๆ.....	12
ตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะไมโครซิลิกา.....	26
ตารางที่ 3.2 ความถ่วงจำเพาะเส้นล้อย.....	27
ตารางที่ 3.3 โมดูลัสความละเอียดของทราย.....	29
ตารางที่ 3.4 โมดูลัสความละเอียดของหินหินบลาสต์.....	30
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงส่วนผสมของแต่ละการทดสอบ ต่อ 1 ลบ.ม.....	31
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาการไหลในแนวตั้ง.....	42
ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สูตร Mix 1.....	46
ตารางที่ 4.3 ค่าการทดสอบการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สูตร Mix 8.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ

### หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย.....	9
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง.....	19
รูปที่ 2.3 ส่วนผสมตั้งต้นจากงานวิจัย.....	19
รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบจากการวิจัย.....	19
รูปที่ 2.5 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % เถ้าลอยและการยุบตัว.....	20
รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ใส่เถ้าลอยที่ 0%,20%,40%.....	20
รูปที่ 2.7 รูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง % เถ้าลอยและกำลังรับแรงอัด.....	21
รูปที่ 2.8 รูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง % เถ้าลอยและกำลังรับแรงดัด.....	21
รูปที่ 2.9 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง.....	22
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์.....	25
รูปที่ 3.2 ซิลิกาฟุ่ม.....	25
รูปที่ 3.3 เถ้าลอย.....	27
รูปที่ 3.4 Polycarboxylate ether superplasticizer (PCEs).....	28
รูปที่ 3.5 ทราาย.....	28
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ในทราาย.....	29
รูปที่ 3.7 หินบัสลาสต์.....	30
รูปที่ 3.8 เครื่องมือการทดสอบการไหลแผ่.....	32
รูปที่ 3.9 การทดสอบการไหลแผ่.....	32
รูปที่ 3.10 การทดสอบการไหลแผ่.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ

หน้า

รูปที่ 3.11 การทดสอบการไหลแผ่.....	33
รูปที่ 3.12 เครื่องมือทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์.....	34
รูปที่ 3.13 ทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์.....	34
รูปที่ 3.14 เครื่องมือทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์.....	35
รูปที่ 3.15 ทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์.....	35
รูปที่ 3.16 ทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์.....	36
รูปที่ 3.17 เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด.....	36
รูปที่ 3.18 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด.....	37
รูปที่ 3.19 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด.....	37
รูปที่ 3.20 เครื่องมือการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น.....	38
รูปที่ 3.21 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น.....	38
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบ Mini slump flow test.....	40
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบ J-14 V-funnel flow test.....	41
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบ Setting time.....	43
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบ Compressive strength.....	44
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบ Compressive strength.....	45
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบ Modulus of elasticity.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรางรถไฟแบบหินโรยทาง (ballasted) เป็นระบบรางที่ใช้กันแบบแพร่หลายมากที่สุด และเป็นโครงสร้างรางมาตรฐานทั่วโลกมาเป็นเวลานานเนื่องจากง่ายต่อการบำรุงรักษาและต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำในระยะแรกและความยืดหยุ่นสูง ในทางกลับกัน การใช้กรวดที่บดอัดแล้วทำให้เกิดฝุ่นและการปนเปื้อนซึ่งจะต้องทำความสะอาดเป็นประจำ และมีการชำรุดที่บ่อยครั้งเนื่องจากน้ำหนักของรถไฟที่มาก

ระบบรางรถไฟแบบใหม่ที่สร้างจากคอนกรีตเพื่อแก้ไขจุดอ่อนเหล่านี้ของรางแบบบัลลาสต์ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แม้ว่าการก่อสร้างรางคอนกรีตจะมีราคาแพงในแง่ของการลงทุนในระยะแรกและเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนสูง แต่รางคอนกรีตมีความทนทานสูงและทนต่อการทำลายของราง ซึ่งช่วยลดความจำเป็นในการบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังปรับปรุงความสม่ำเสมอของรางและลดการเสียดสีในขณะที่ยังเพิ่มความสะดวกสบายในการขับขี่สำหรับผู้โดยสาร

ความสำคัญในการลดการบำรุงรักษารางบัลลาสต์คือการกำจัดชั้นบัลลาสต์และสร้างรางคอนกรีตใหม่ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนรางที่มีอยู่เป็นรางคอนกรีตจำเป็นต้องหยุดการเดินรถเป็นเวลานาน เพื่อจัดการกับปัญหานี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดริเริ่มการนำซีเมนต์เกรดพรีเมียมมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เพื่อจะเปลี่ยนรางรถไฟแบบมีหินโรยทางให้เป็นทางรถไฟแบบกึ่งคอนกรีต

ดังนั้น การวิจัยเชิงทดสอบนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพทางรถไฟแบบมีหินโรยทางด้วยซีเมนต์เกรดพรีเมียม โดยการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ก่อนใช้งานในภาคสนาม ในขั้นตอนสุดท้ายมีการเปรียบเทียบความสามารถในการนำไปใช้งานกับมาตรฐานปัจจุบัน

#### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาส่วนผสมของซีเมนต์เกรดพรีเมียมและทดสอบวัสดุหรือส่วนประกอบที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งออกเป็นวัตถุประสงค์ย่อย ดังนี้

- 1.ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความสามารถในการทำงานได้ (Work Ability) ของปูนซีเมนต์มอร์ต้าเกรดพรีเมียมที่พัฒนาขึ้น
- 2.ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของปูนซีเมนต์มอร์ต้าเกรดพรีเมียมที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาและประเมินการใช้งานปูนซีเมนต์มอร์ต้าเกรดที่พัฒนาขึ้นกับหินโรยทาง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

#### ขอบเขตด้านเวลา

ปีการศึกษา 2565

#### ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. การพัฒนาส่วนผสมซีเมนต์เกรดที่ใช้วัสดุปอซโซลาน คือ Micro Silica (2-8% โดยน้ำหนัก) และ fly ash (10, 20 % โดยน้ำหนัก) แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์
2. ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C139
  - 2.1 ตัวอย่าง ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม
  - 2.2 ระยะเวลาบ่มตัวอย่างหลังฉีดซีเมนต์เกรดที่ 1 3 7 14 และ 28 วัน
3. ทดสอบคุณสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ต้า (Mini Slump Flow Test) ตามมาตรฐาน NF EN196-1
4. ทดสอบระยะเวลาก่อตัวของมอร์ต้า (Setting time of Mortar) ตามมาตรฐาน ASTM C807
5. ทดสอบคุณสมบัติการไหลแผ่ในแนวตั้ง (V funnel Test) ตามมาตรฐาน JSCE-F531

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและยืดระยะเวลาการใช้งานของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางได้ยาวนานขึ้น
2. สามารถประหยัดเงินในการซ่อมบำรุงของทางรถไฟ
3. สามารถเพิ่มแข็งแรงของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โครงสร้างทางรถไฟ

##### 2.1.1 ทางรถไฟมีกี่ประเภท

รูปแบบจนถึงปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับที่ใช้งานมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

##### 1. โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track)

โครงสร้างทางแบบ (Ballast Track) เป็นทางรถไฟที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่ทั่วไปในทุก ๆ ประเทศ ซึ่ง Ballasted Track นั้นมีข้อดีคือ ต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำ ขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนราง เปลี่ยนเครื่องยึดเหนี่ยว สามารถทำได้ง่าย Rail Joint และ Fish plated joint และ Insulated Rail Joint (IRJ) แม้กระทั่งการปรับแก้ ระดับ (Level) และ แนวทางวิ่ง (Alignment) สามารถทำได้ง่าย มีคุณสมบัติการระบายน้ำ ที่ดี รวมถึงการลดมลภาวะทางเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของการวิ่งของรถไฟกับพื้นทางอย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า Ballasted Track จะมีต้นทุนในการบำรุงรักษาที่ถูกลง และบำรุงรักษาง่าย ก็จริงแต่ก็ต้องทำการบำรุงรักษาเป็นระยะ ๆ เมื่อพิจารณาพร้อมกับจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาก็ระยะเวลาในการใช้พบว่ามีค่าบำรุงรักษาทางที่ค่อนข้างสูง

##### 2. โครงสร้างทางแบบ Slab - Track (Non-Ballasted Track)

ลักษณะของ Slab Track จะแตกต่างจาก Ballast Track ตรงที่จะเปลี่ยนชั้น Sub-grade ไปเป็น Concrete Road-bed ในส่วนของ Sub-ballast จะเปลี่ยนเป็นการเทคอนกรีตเพื่อเชื่อมกับตัวหมอนรถไฟ (Concrete Sleeper) Slab Track จะช่วยลดความสูงของโครงสร้าง ลดปัญหาในการจัดหาหิน Ballast เนื่องจากในปัจจุบันยากในการหาหิน Ballast ที่ได้ขนาด ได้สัดส่วน ไม่กลม หรือ แบนจนเกินไป และที่สำคัญในหลาย ๆ ประเทศได้มีนโยบายในการปกป้องสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลให้การขออนุญาตในการเปิดเหมืองหินก็ทำได้ยากขึ้นยิ่งส่งผลให้มีการก่อสร้างทางรถไฟมีต้นทุนที่สูงขึ้นตามมาอีกด้วย และในเมื่อหิน Ballast นั้นวันยิ่งหายากขึ้นก็จะทำให้ต้นทุนในการบำรุงรักษาทางรถไฟในอนาคตสูงขึ้นด้วยเนื่องหิน Ballast จะต้องถูกเปลี่ยนและบำรุงรักษาตามระยะเวลา Slab Track ยังมีความเสถียรภาพทางโครงสร้างที่สูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้กับ รถไฟความเร็วสูง (High Speed Rail: HSR) รวมถึงยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากอีกด้วย ในปัจจุบันทางรถไฟประเภทนี้ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟลอยฟ้า และระบบรถไฟชานเมือง ซึ่งเป็นทางรถไฟที่มีความถี่ของขบวนต่อ

วันสูง มีเวลาในการบำรุงรักษาต่ำ หรือ หากว่าต้องหยุดเพื่อบำรุงรักษาอาจเกิดการสูญเสียทางระบบเศรษฐกิจ สังคมสูง เช่น หากหยุดรถไฟฟ้าใต้ดิน หรือ รถไฟฟ้า BTS หยุดวิ่งก็จะทำให้สูญเสียทางเศรษฐกิจทางตรงเช่นราย ของบริษัท ทางอ้อมเช่น หากประชาชนไม่ขึ้นรถไฟฟ้า จะทำให้หันมาใช้รถยนต์มากขึ้นทำให้การบริโภคน้ำมันมาก ขึ้น ทำให้เกิดการล่าช้าในการนัดหมายหรือการประชุมอีกสาเหตุสำคัญที่ Slab Track ไม่ใช้ในการขนส่งระยะไกล เนื่องจาก จะทำให้มีต้นทุนการก่อสร้างที่สูง และควมถึของขบวนรถยังไม่มากพอ ก็ยังไม่คุ้มค่าที่จะใช้ Slab Track ซึ่งราคาแพงกว่า Ballasted Track 30 – 50% หรือว่าในบางกรณีอาจแพงกว่าถึงเท่าตัว

ประเภทของ Slab Track กรณีในการจัดประเภทได้ 2 แบบหลัก ๆ คือ

1 แบ่งตามวิธีการติดตั้ง การติดตั้งแบ่งออกได้สองแบบคือ

- 1) Direct Fixation
- 2) Floating Slab Track

2 แบ่งตามลักษณะของประเภท Rail Support

ลักษณะของ Slab Track ที่แบ่งตาม Rail Support จะมีอยู่หลายประเภทซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการออกแบบของแต่ละบริษัทหรือตาม TOR (Term of References) ของแต่ละประเทศ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความต้องการในการลดต้นทุนการก่อสร้าง ที่ต้องการให้เด็งานที่เร็ว ต้นทุนที่ถูกลง และการควบคุมคุณภาพ

### 2.1.2 วัสดุของแต่ละประเภท

#### 1. โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track)

1.1. ราง (Rail) รูปแบบของรางรถไฟ จะมีหน้าตัดคล้ายกับเหล็กรูปพรรณตัวไอ (I) เป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับ การใช้งานด้านเทคนิคและเป็นหน้าตัดรางที่ประหยัด (Economic) ให้ความแกร่ง (Stiffness) และมีความคงทนต่อการใช้งาน (Durability) รูปร่าง (Profile) ของรางจะประกอบด้วยส่วนของหัวราง (Head) เอรราง (Web) และฐานราง (Foot)

1.2. เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening) เครื่องยึดเหนี่ยวรางถือเป็นวัสดุทางที่ใช้สำหรับตรึงยึดรางให้ติดกับหมอนรองราง เพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างรางได้ขนาดทาง (Gauge) ตามที่ต้องการ

#### 1) เครื่องยึดเหนี่ยวรางสำหรับหมอนไม้

## 2) เครื่องยึดเหนี่ยวรางสำหรับหมอนคอนกรีต

1.3. หมอนรองราง (Tie หรือ Sleeper) หมอนรองรางถือเป็นวัสดุทางที่ใช้งานรองรับน้ำหนักจากฐานหรือจานรองราง ลงสู่ผิวหน้าหมอนเพื่อช่วยกระจาย แรงผ่านหมอน ลงไปยังชั้นหินโรยทาง ปัจจุบันหมอนรองรางมีใช้งานอยู่ 3 ชนิด คือ

1) หมอนไม้ (Timber Sleeper)

2) หมอนคอนกรีต (Concrete Sleeper)

3) หมอนเหล็ก (Steel Sleeper)

1.4 หินโรยทาง (Ballast) คือวัสดุที่ใช้โรยทางและทำการบดอัดในชั้นบนสุดของโครงสร้างฐานรากซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ โดยปกติแล้วหินที่มีความแข็ง, มีเหลี่ยมมุม, และมีความต้านทานต่อการขัดสีนี้เป็นองค์ประกอบที่จะช่วยให้เป็น ทางรถไฟเป็นทางที่สมบูรณ์แบบ เรื่องที่กล่าวมานี้เป็นเรื่องซับซ้อนที่ยังมีการวิจัยอยู่จาก ความพร้อมของทาง เศรษฐกิจ, การเงิน, ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุบัลลาสต์ ดังนั้นความหลากหลายของวัสดุต่างๆที่ถูก นำมาใช้เป็นบัลลาสต์เช่น หินแกรนิต หินบะซอล หินปูน เศษหินและกรวด จึงทำให้มีคุณภาพที่แตกต่างกัน ขนาดของหินที่นำมาใช้เป็นหินโรยทาง เดิมนั้นถูกกำหนดให้ขึ้น อยู่กับชนิดของหมอนรองรางรถไฟ กล่าวคือ หากหมอนรองรางทำจากไม้หรือคอนกรีต จะใช้ขนาดหินที่ประมาณ 40 มิลลิเมตร (1.5 นิ้ว) แต่หากหมอน รองราง ทำจากเหล็ก ก็จะใช้ขนาด 50 มิลลิเมตร (1.5 นิ้ว) แทน แต่ในปัจจุบันยอมรับกันว่าใช้หินขนาด 50 มิลลิเมตร กับหมอนรองรางทุกชนิด โดยบัลลาสต์อาจแบ่งย่อยออกเป็น 4 หมวดดังนี้

- Crib คือ วัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ

- Shoulder คือ วัสดุที่อยู่นอกปลายของหมอนรองรางรถไฟใต้ชั้นบัลลาสต์

- Top ballast คือ ส่วนบนที่รองรับชั้นบัลลาสต์ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ tamping

- Bottom ballast คือ ส่วนล่างของชั้นที่รองรับชั้นบัลลาสต์ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ และตามธรรมชาติส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีการปนเปื้อน (fouled)

บัลลาสต์มีหน้าที่ ดังนี้

- ต้านทานแรงในแนวตั้ง, แนวนอน, และตามยาว จากหมอนรองรางรถไฟเพื่อรักษาทางรถไฟให้อยู่ใน ตำแหน่งเดิม

- ให้ความยืดหยุ่นและซึมซับพลังงานจากรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ให้ช่องว่างขนาดใหญ่เพื่อเก็บวัสดุที่ปนเปื้อนในบัลลาสต์และเคลื่อนย้ายอนุภาคผ่านชั้นบัลลาสต์
- ทำให้ง่ายในการบำรุงรักษาผิวหน้า และขั้นตอนการดำเนินการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ (tamping)
- ช่วยให้เกิดการระบายน้ำในทันทีเมื่อมีน้ำขังอยู่บนรางรถไฟ
- ลดแรงแบกทานจากไม้หมอน เพื่อให้มีค่าความเค้นที่ยอมให้ของวัสดุชั้นถัดลงไป แม้ว่าค่าความเครียดจะ ลดลง โดยการเพิ่มความหนาของชั้นบัลลาสต์ ถึงกระนั้นชั้นที่รองรับบัลลาสต์จะต้องมีอนุภาคที่มีความ คงทนและสัมผัสกับความเครียดสูงตามไปด้วย
- ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช โดยให้มีชั้นปกคลุมที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช
- ลดซับเสียงในอากาศ
- ให้มีความต้านทานไฟฟ้าเพียงพอระหว่างรางรถไฟ

โดยหน้าที่ของหินโรยทาง คือ ทำหน้าที่ยึดหมอนไว้กับที่แล้วถ่ายน้ำหนักเฉลี่ยลงสู่ดินคันทาง (Sub-Structure) และส่วนที่อยู่ล่างสุดคือดินเดิม นอกจากนั้นบนเส้นทางรถไฟที่วิ่งไปต้องผ่านประแจ สะพาน ทางตัดผ่านถนน ก็จะมีรางกัน (Safety Rail หรือ Guard Rail) ทำหน้าที่ประคองเพื่อป้องกันล้อที่อาจพลัดตกจากรางไม่ให้หลุดไปไกล หรือป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอมเข้ามาแทรกอยู่ใกล้รางทางรถไฟในปัจจุบันจะมีทั้งที่ใช้หินโรยทางและไม่ใช่หินโรยทาง (Ballast Track / Non Ballast Track) ซึ่งแต่ละแบบจะมีคุณลักษณะพิเศษที่แตกต่างกันทางรถไฟที่ใช้หินโรยทางรองรับไม้หมอนจะมีข้อดีคือนุ่มนวลมีเสียงดังน้อย แต่เมื่อใช้งานไปสักระยะต้องมีการบำรุงรักษาโดยการล้างหินและอัดหินเพิ่มเติม ในขณะที่โครงสร้างทางรถไฟที่ไม่ใช่หิน (Non Ballast Track) คือการวางรางลงบนแผ่นคอนกรีตอัดแรงที่เรียกว่า 'สแลบแทรค' (Slab Track) หรือการวางรางลงบนหมอนคอนกรีตที่วางอยู่บนพื้นคอนกรีตที่มีช่องบังคับ ข้อดีคือ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงดูแลรักษาแต่ก็มีค่าก่อสร้างสูงกว่า

**ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-Ballast) คือ ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นบัลลาสต์และชั้นดินเดิม มีหน้าที่ดังนี้**

- ลดค่าความเครียดบริเวณใต้ชั้นบัลลาสต์ที่เกิดจากการใช้งาน ให้อยู่ในระดับที่ชั้นดินเดิมสามารถรับได้
- ขยายการป้องกันการแข็งตัวของน้ำในชั้น Sub grade
- ป้องกันการแทรกซึมของดินเดิมและบัลลาสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ป้องกันการเคลื่อนย้ายของวัสดุที่มีความละเอียดเล็ดรอดออกมาจากชั้นดินเดิม
- ป้องกันการสึกกร่อนของบัลลาสต์จะเกิดเมื่อมีน้ำ ซึ่งจะนำไปสู่การสลาย และการป้องกันต้นเหตุของการเกิด pumping นี้คือปัญหาหลักของชั้นดินเดิมที่แก้ไขได้ยาก
- ระบายน้ำจากบัลลาสต์และชั้นดินเดิมไหลไปสู่คูน้ำด้านข้างของทางรถไฟ
- ยอมให้มีการระบายของน้ำขึ้นมาจากชั้นดินเดิม นี่คือฟังก์ชันที่สำคัญที่สุดในประสิทธิภาพของบัลลาสต์ที่น้ำ ฝังพอใจ

## 2. โครงสร้างทางแบบ Slab - Track (Non-Ballasted Track)

1 แบ่งตามวิธีการติดตั้ง การติดตั้งแบ่งออกได้สองแบบคือ

- 1) Direct Fixation;
- 2) Floating Slab Track

2 แบ่งตามลักษณะของประเภท Rail Support

ลักษณะของ Slab Track ที่แบ่งตาม Rail Support จะมีอยู่หลายประเภทซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการออกแบบของแต่ละบริษัทหรือตาม TOR (Term of References) ของแต่ละประเทศ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความต้องการในการลดต้นทุนการก่อสร้าง ที่ต้องการให้ดำเนินงานที่เร็ว ต้นทุนที่ถูกลง และการควบคุมคุณภาพ

### 2.1.3 ความแตกต่างของแต่ละประเภท

	ต้นทุนในการสร้าง	ค่าบำรุงรักษา	อายุการใช้งาน	ความเร็วในการเดินรถ
ทางแบบมีหินโรยทาง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ทางแบบ Slab Track	สูง	ต่ำ	สูง	สูง

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างทางรถไฟทั้ง 2 ประเภท

### 2.1.4 แต่ละประเภทเหมาะสำหรับรถแบบไหน

#### 1. โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track)

รถจักรดีเซลไฟฟ้า รุ่นต่างๆของรถไฟแห่งประเทศไทย ที่สามารถบรรทุกได้ทั้งคนและสิ่งของต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. โครงสร้างทางแบบ Slab - Track (Non-Ballasted Track)

Slab Track ยังมีความเสถียรภาพทางโครงสร้างที่สูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้กับ รถไฟความเร็วสูง (High Speed Rail: HSR) รวมถึงยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากอีกด้วย ในปัจจุบันทางรถไฟประเภทนี้ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟลอยฟ้า และระบบรถไฟชานเมือง ซึ่งเป็นทางรถไฟที่มีความถี่ของขบวนต่อวันสูง มีเวลาในการบำรุงรักษาต่ำ

### 2.1.5 ข้อดี ข้อเสียของแต่ละประเภท

ทางรถไฟประเภทใช้หินโรยทาง		ทางรถไฟคอนกรีต	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ต้นทุนการก่อสร้างต่ำมาก 2. มีความยืดหยุ่นสูง	1. รอบการบำรุงรักษาและซ่อมแซมสูง 2. เกิดฝุ่นและการปนเปื้อนได้ง่าย 3. มีความแข็งแรงทนทานต่ำ	1. รอบการบำรุงรักษาต่ำมาก 2. มีความแข็งแรงและทนทานสูง	1. ต้นทุนการก่อสร้างสูง 2. มีกระบวนการก่อสร้างที่ซับซ้อน

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียทางรถไฟทั้ง 2 ประเภท

### 2.1.6 การระบายน้ำของทางรถไฟแต่ละประเภท

#### 1. โครงสร้างทางแบบมีหินโรยทาง (Ballast Track)

การระบายน้ำของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางจะระบายน้ำจากบนทางรถไฟลงสู่ดินโดยการไหลผ่านชั้นหินไปสู่ท่อระบายน้ำที่ทำการติดตั้งไว้และส่งน้ำไปยังบ่อผันหรือแม่น้ำ

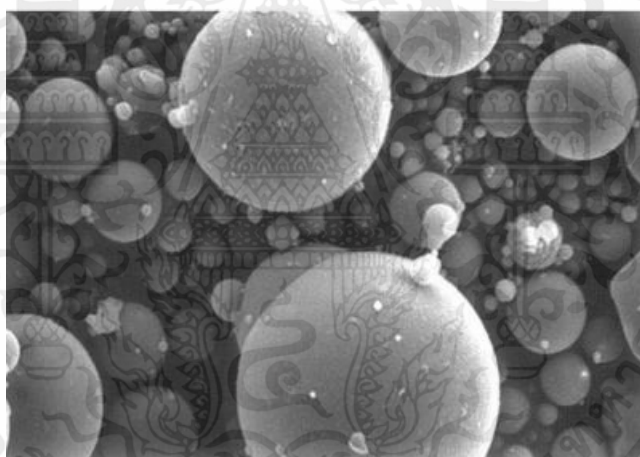
#### 2. โครงสร้างทางแบบ Slab - Track (Non-Ballasted Track)

การระบายน้ำของทางรถไฟแบบ slab track จะระบายน้ำออกทางด้านข้างที่มีการขุดร่องไว้สำหรับการไหลของน้ำไม่สามารถซึมสู่ดินได้

## 2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา หรือน้ำตาลแล้วแต่แหล่งที่มา มีน้ำหนักเบาเมื่ออยู่สู่ สภาพแห้งจะไม่มีสมบัติการเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ดีขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยอาจแตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับแหล่งของถ่านหิน ความสม่ำเสมอความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนขณะเผา รวมทั้งวิธีการดักจับเถ้าลอย โดยปกติแล้วเถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต

(Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า จากนั้นเถ้าลอยจะถูกรวบรวมไว้ในถังเก็บเถ้า (Ash hopper) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าทั้งหมดมีขนาดประมาณ 1 ไมครอนจนถึง 150 ไมครอนเมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูงจะพบว่า เถ้าลอยมีรูปร่างกลมตัน หรือก็ลวงจนถึงรูปร่างไม่แน่นอน การมีรูพรุนของเถ้าลอยยังแตกต่างกันด้วยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำคืออยู่ในช่วง 1.90 - 2.69 มีความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ในช่วง 800 - 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตรและมีความหนาแน่นสูงสุด (Maximal density) เป็น 1,000 - 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยปกติแล้วอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าลอยจะมีส่วนที่มีความเป็นผลึก (Crystal) ผสมอยู่กับ ส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) เถ้าลอยสามารถทำ ปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต กล่าวคือมีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดีปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาพอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย

### 1. ประเภทของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับมาตรฐาน ASTM

C618 ได้แบ่งเถ้าลอยเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ประเภท F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่น

ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปแล้วล้อยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) สูง

2. ประเภท C (Class C) เป็นล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซังบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เพอร์ริคออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) สูง สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ำ ทำให้ล้อยชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ต่ำแล้วยังมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ำด้วย

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อลูมินาออกไซด์และเพอร์ริคออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) อย่างต่ำ , ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O, ร้อยละ	1.5	1.5

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของล้อยออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมายังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (pozzolan) ได้ด้วยเนื่องจากล้อย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะถ่านล้อย Class C มักมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่า ร้อยละ 10 ดังนั้นการนำ ล้อยมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไปควรใช้ถ่านล้อย Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และสามารถเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้ล้อย Class C เนื่องจากพบว่า ล้อย Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าล้อย Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับ แก้วลอยใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลักโดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.4

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก.	ชนิด ข.	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	<10.0	≥10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุดอย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของแก้วลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135 – 2545

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) อย่างต่ำ , ร้อยละ	70.0	50.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อย่างต่ำ, ร้อยละ	-	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	5.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O, ร้อยละ	1.5	1.5

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางเคมีของแก้วลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014

แก้วลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะการเผา ถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็ยังมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต แก้วลอยจากแหล่งต่าง ๆ มีองค์ประกอบทางเคมีดังตาราง 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ถ้ำลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจากแหล่งต่าง ๆ

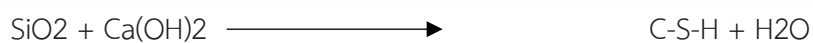
## 2. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรณีวิทยาและด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ้ำหินเป็นหลักแต่อาจขึ้นอยู่กับ สภาวะการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในถ้ำลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดินคือมี ออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิดเป็นร้อยละ 95-99 ของส่วนประกอบทั้งหมดและมีส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมดนอกจากนี้ถ้ำลอยจะมีส่วนประกอบของธาตุอื่นที่มีปริมาณน้อย ๆ (Trace element) ประมาณ 20-50ธาตุ

## 3. การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของถ้ำลอย

ปฏิกิริยาปอซโซลานของถ้ำลอย เกิดจากซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในถ้ำลอย ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างนาและปูนซีเมนต์ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เพิ่มการยึดประสานระหว่างเพสต์และมวลรวม จึงช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังให้กับคอนกรีตในระยะยาว

สำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานได้แสดงไว้ในสมการ



#### 4. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

ปัจจุบันการนำ เถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้แพร่หลายมากขึ้น โดยอาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์อีกทั้งเถ้าลอยยังมีอนุภาคที่มีความละเอียดสูงกว่า ปูนซีเมนต์จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ซึ่งปกติแล้ว ช่องว่างเหล่านี้จะถูกอุดด้วยปริมาณน้ำ ส่วนที่เกินจากการทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยให้คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น เช่น คุณสมบัติการรับแรงความทนทาน ลดการแตกร้าวและแยกตัวลดคุณสมบัติการซึมน้ำ ลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลน์ เป็นต้น

#### 2.3 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)

ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) หรือไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัดผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัล และเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอตซ์ (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน โดยวิธี electric arc ที่ อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ(fume)ของ SiO ซึ่งต่อมาจะ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับ ในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้(ปริญญา จินดา ประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556) เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำ ปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือ ส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำ เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้น เหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง ทำให้มีพื้นที่ ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำ ในการหล่อลื่นพื้นที่ ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย ซิลิกาฟุ้งจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟุ้งที่มีคุณภาพดีโดยร้อยละ 61 ถึง 98 ประกอบด้วยซิลิกอนซึ่งร้อยละ 85 ถึง 95 ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก หรืออสัณฐาน ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำ ปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟุ้งที่ได้จากโรงงาน เฟอร์โรซิลิกอน มีคุณภาพต่ำ กว่าโดยมีซิลิกอนเพียงประมาณร้อยละ 50 และอยู่ในรูปของผลึก ค่อนข้างมากซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านั้นในงานคอนกรีตไม่ดีนัก

องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO<sub>2</sub> นั้นควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO<sub>2</sub> มากกว่า ร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O และออกไซด์อื่น ๆ อีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่ง ออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO<sub>2</sub> หากนำ ค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมา เปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ถ้าถ่านหิน ตะกรัน เตาถลุงเหล็ก และดินขาวเผา จะพบว่า มี องค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากที่สุดเท่า เทาดำ หรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟูมควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการ รวมตัวของซิลิกาฟูมหลายๆอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มี ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม. 2 /ก. ซึ่ง ใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่ ถ้ำถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม. 2 /ก. ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาค ของซิลิกาฟูมเป็นขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่าเพราะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟูม มีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้ายเพื่อแก้ปัญหาจึงมีการนำซิลิกาฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มี ขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าซิลิกาฟูมควบแน่น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม ถ้ำถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ถ้ำเกลือ บด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

## การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปซิลิกาฟูมจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 โดย น้ำหนักการผลิตปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมมีใช้ในประเทศแคนาดาโดยผสมซิลิกาฟูมในส่วนผสมร่วร้อยละ 7 ถึง 8 เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งและการใช้งาน พอสมควรเพราะฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมที่ผสมน้ำ ให้อยู่ในรูปของเหลวชั้น อย่างไรก็ตามโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายแห่งยังคงนิยมใช้ซิลิกาฟูมในรูปผงซึ่งอาจเป็นปัญหา เรื่องสุขภาพได้เพราะมีการฟุ้งกระจายของซิลิกาฟูมได้ง่าย ดังนั้น The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ได้ระบุให้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุอันตราย (hazardous material) และไม่ควรมีฝุ่นของซิลิกาฟูมในอากาศมากกว่า 2 มก./ม. 3 และควรใช้น้ำกักกันฝุ่น สวมป้องกันในขณะที่ทำงาน การใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นแทนซิลิกาฟูมจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้เพราะ ซิลิกาฟูมควบแน่นมีขนาดใหญ่กว่า ซิลิกาฟูมมากและไม่ปลิวลมง่ายนัก

### ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อคอนกรีตสด

เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมาก ซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุ่มที่ความชื้นเหลว ปกติจะต้องการปริมาณน้ำสูงขึ้นและจะทำให้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น เมื่อใช้ผสมทำมอร์ตาร์และ คอนกรีตทำให้ต้องการปริมาณน้ำที่มากขึ้น แนวทางแก้ไขคือการใช้สารลดน้ำ หรือสารลดน้ำ พิเศษ เข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำ ในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไป เพราะการใช้น้ำ ในส่วนผสมมากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำ ลงตามกฎของ Abrams ปริมาณสารลดน้ำ พิเศษที่ให้กำลังรับแรงสูง จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ส่วนการเฝ้าน้ำ ในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มพบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้การใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่มีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของคอนกรีต เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความ ละเอียดสูงและทำ ปฏิกิริยาได้ไวจึงมีความร้อนจากปฏิกิริยาค่อนข้างมาก

### ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ซิลิกาฟุ่มนิยมใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมากเช่นกำลังอัด เท่ากับ 120 เมกะปาสคาลที่ อายุ90วัน โดยการใช้ร่วมกับ สารลดน้ำพิเศษ คอนกรีตที่ได้้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีค่าการซึมผ่านที่ต่ำมากด้วยเพราะซิลิกาฟุ่มจะไปอุดโพรงของซีเมนต์ เพสต์การใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือน ใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ4 เท่า เช่นใช้ซิลิกาฟุ่ม1กิโลกรัมแทนที่ปูนซีเมนต์3 หรือ4กิโลกรัม ใน คอนกรีต แต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ อายุ 7 หรือ28วัน เท่ากัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 15, และ 20 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28วันค่อนข้างมาก

## 2.4 ซีเมนต์เกร้าท์ (Cement Grout)

### 1. ความหมายของซีเมนต์เกร้าท์

ปูนเกร้าท์ หรือซีเมนต์เกร้าท์ คือ เป็นปูนผสมเสร็จ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทรายละเอียด แลสารผสมเพิ่ม มีคุณสมบัติให้กำลังอัดสูง และไหลตัวได้ดี เมื่อแห้งตัวแล้วมีคุณสมบัติไม่หดตัว ซึ่งหมายถึงไม่เกิดช่องว่างหลังปูนเกร้าท์ หรือซีเมนต์เกร้าท์แห้ง การใช้งานปูนเกร้าท์ เช่น เทฐานโครงสร้าง เทซ่อมรูโพรง เทเพื่อปิดช่องว่างต่างๆ เมื่อใช้งานอย่างถูกวิธี จะให้กำลังอัดที่สูงอย่างรวดเร็ว สามารถใช้กับแทนเครื่องจักรที่มีน้ำหนักมาห หรือฐานรางรถไฟ หรือฐานแบบหล่อคอนกรีตขนาดใหญ่

### 2. คุณสมบัติของปูนเกร้าท์

- รับกำลังอัดสูงประมาณ 600-700 ksc
- มีประสิทธิภาพในการไหลตัวที่ดี สามารถแทรกตัวเข้าสู่ซอกมุมต่างๆ ได้อย่างดีเยี่ยม
- ไม่เกิดการแยกชั้น แยกตัว และไม่มีน้ำเยิ้มบนผิวหน้า
- เมื่อปูนเซ็ตตัวและแห้งจะไม่เกิดการหดตัว
- ทนต่อแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนได้ดี

### 3. รูปแบบการใช้งานของปูนเกร้าท์

คุณสมบัติในการรับแรงสั่นสะเทือนที่ดีของปูนเกร้าท์ทำให้ปูนชนิดนี้เหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในงานที่ต้องรับน้ำหนักเยอะ หรืองานที่จำเป็นต้องเจอแรงสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งประเภทงานดังกล่าวนั้นเป็นงานที่คอนกรีตธรรมดา ไม่สามารถรับแรงได้โดยที่คอนกรีตไม่เสียหายหรือแตกร้าว นอกจากนี้ คุณสมบัติในการไหลตัวยังทำให้ปูนเกร้าท์เหมาะใช้ในงานที่มีพื้นที่เป็นซอกมุมหรือรูโพรงอีกด้วย ตัวอย่างงานที่เหมาะสม อาทิ

1. งานเทฐานเครื่องจักร
2. งานเทฐานเสาฐานจอตรถและฝิ่งเสารั้ว
3. งานเทฐานรองคานสะพาน
4. งานเทยึดติดเสาเหล็กและเสาคอนกรีต
5. งานเทซ่อมรอยต่อแผ่นคอนกรีต
6. งานซ่อมรูโพรง

#### 4. ข้อควรระวังของการใช้ซีเมนต์เกรด้าท์

เลี้ยงแดดร้อน ลมแรง ชัลเฟต และกรดหลีกเลี่ยงการใช้งานในบริเวณที่มีลมแรง เพื่อไม่ให้ผิวปูนสัมผัสกับลมโดยตรง และไม่ควรงานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเกินไป รวมไปถึงการเลี้ยงใช้วัสดุที่มีชัลเฟต และกรดต่างๆ เพราะปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของปูนชนิดนี้ได้ทั้งสิ้น

#### 2.5 ปูนซีเมนต์(Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของ อเมริกา (ASTM C. 150) และของ อังกฤษ(British Standard ; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก.15 ของไทย ได้แบ่งปูนซีเมนต์เป็น 5 ประเภท ซึ่งในโครงการนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Normal Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Normal Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น คาน เสา พื้น ถนน เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับเกลือชัลเฟต

ปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต(C3S)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดรแคลเซียมซิลิเกต(C2S)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต(C3A)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์(C3AF)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 Polycarboxylate ether (PCE)

ADVA® Cast 2727 TH เป็นสารผสมเพิ่มลดน้ำช่วงสูงที่ใช้โพลิเมอร์ซึ่งออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังต้นสูงที่เหนือกว่าในงานหล่อสำเร็จรูป ADVA Cast 2727 TH ไม่มีส่วนผสมของคลอไรด์ เป็นสูตรที่สอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับส่วนผสมทางเคมีสำหรับคอนกรีต: ASTM C 494, Type F หนึ่งลิตรมีน้ำหนักประมาณ 1.07 กก. ± 0.02 กก.

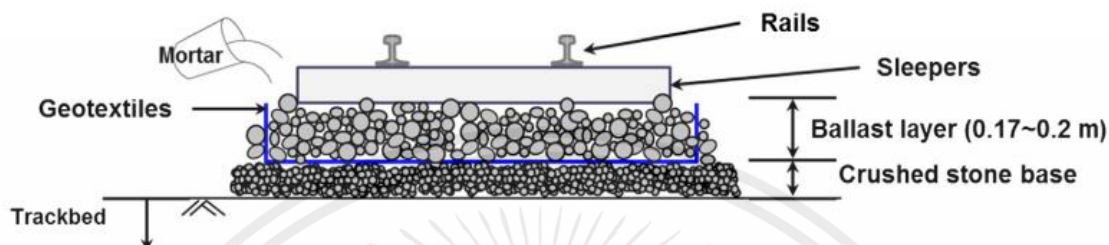
- 1.มีความสามารถในการลดน้ำสูงมาก (เป็นผลให้ความตึงน้ำสูง ให้กำลังอัดสูง และลดอัตราการซึมผ่าน)
- 2.มีความสามารถในการไหลตัวดีเยี่ยม
- 3.ลดการหดตัวระหว่างการบ่ม และลดการคืบเมื่อคอนกรีตแข็งตัว

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Snehal Afiniwala, et al.(2013) ทำการศึกษาผลกระทบด้านปริมาณของเถ้าลอย (Fly Ash Type F) ต่อความสามารถในการไหลของคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ง่าย โดยการเปรียบเทียบเถ้าลอยที่มีคุณภาพต่างกันมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 50,55 และ 60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 ทำการทดสอบค่าความสามารถในการไหลแผ่ (Slump flow), V-funnel, L-box และ U-box พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการไหล ค่าความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ENAARC(2002) ทั้งยังเพิ่มการยึดเกาะของส่วนผสม ลดการเอี่ยมและการแยกตัว ทั้งยังเป็นการประหยัดและใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์

2.7.2 N. Bouzoubaa and M. Lachemib (2001) ศึกษาการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly Ash Type F) ในปริมาณมากในงานคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย โดยมีปริมาณการแทนที่ปริมาณ) ซีเมนต์ร้อยละ 40,50 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.45 เพื่อทำการทดสอบค่าความสามารถในการทำงานได้และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด พบว่า คุณสมบัติของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นในด้านความหนืด ด้านเสถียรภาพ และการพัฒนาด้านกำลังรับแรงอัดโดยส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้งานร่วมกับคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ง่าย คือ ส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 และอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 สามารถต้านทานกำลังรับแรงอัดได้ถึง 35 เมกะปาสคาล

2.7.3 Il-Wha Lee, Sukhoon Pyo (2016) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับการใช้มอด้าเกราทสำหรับ การแปลงรางบัลลาสต์รถไฟเป็นรางคอนกรีต โดยได้ทำการใช้มอด้าเกราทในบริเวณที่เป็น ชั้นหินโรยทางของทางรถไฟ (Ballast Layer) เพื่อเปลี่ยนรางบัลลาสต์เป็นคอนกรีต



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

โดยใช้ส่วนผสมตั้งต้นจากงานวิจัยดังนี้

**Table 1**  
Details of mix proportions (by mass).

Cement	Water	HRWRA <sup>§</sup>	Set-control agent	Sand A <sup>1</sup>	Sand B <sup>2</sup>
1	0.40	0.027	0.0014	0.33	0.34

<sup>§</sup> HRWRA: High range water reducing agent.

<sup>1</sup> Maximum grain size = 1.2 mm.

<sup>2</sup> Maximum grain size = 0.42 mm.

รูปที่ 2.3 ส่วนผสมตั้งต้นจากงานวิจัย

จากนั้นได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อฉีดมอด้าลงในโมลและทำการทดสอบค่ากำลัง ตัวอย่างที่ได้ทำการฉีดมอด้าลงไปจะมีความแข็งแรงกว่าโมลที่ใส่คอนกรีต เช่นเดียวกันกับก็คาดว่าโครงสร้างจริงที่ทำการฉีดมอด้าลงไปจะมีความแข็งแรงมากกว่าที่ใส่คอนกรีต

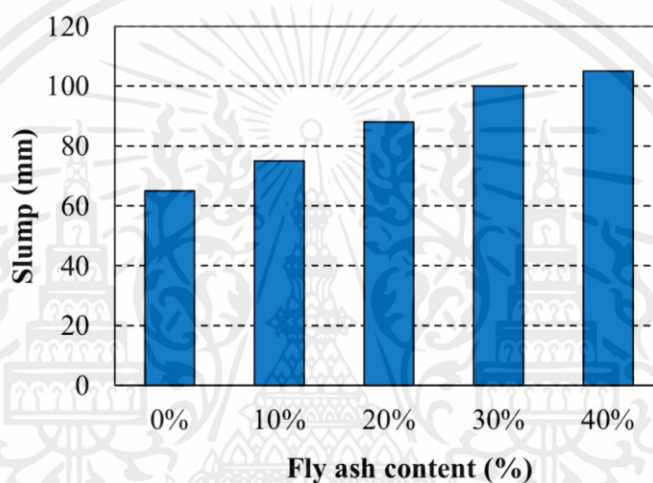
**Table 3**  
Compressive strength of the structural test.

Specimen	Materials	Compressive strength (MPa)				
		2 h	1 day	3 days	7 days	28 days
Specimen made in cylindrical molds	Mortar	12.3	24.1	30.4	34.6	49.4
	Concrete	9.0	16.0	21.4	26.7	31.7
Cored specimen from the structure	Concrete	-	11.0	22.1	28.4	33.4

รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบจากการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 N Ghazali<sup>1</sup>และคณะ (2021) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบผลของเถ้าลอยแทนซีเมนต์บางส่วนต่อความสามารถในการทำงานและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาชนิดน้ำมันปาล์มโดยจะเห็นได้ว่าในตารางที่ 1 เราจะใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วน 10% 20% 30% 40% เราจะเห็นได้ว่าเห็นได้ว่าเมื่อเราใส่เถ้าลอย (Fly Ash) มากเท่าไรคอนกรีตก็จะมีเกรนที่โตมากขึ้นตามสังเกตได้จากรูปทั้ง 3 รูป จะพบว่ารูปแรกที่ใส่เถ้าลอย 0% จะมีความเหลวของซีเมนต์ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับรูปตรงกลางและด้านขวาที่ใส่เถ้าลอยที่ 20% และ 40% แต่เมื่อเรามาดูในส่วน ของกำลังรับแรงอัดและแรงดัดจะพบว่าเถ้าลอยสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ถึงเพียงแค่ 10-20% จึงสามารถสรุปได้ว่าควรที่จะใช้เถ้าลอยไม่เกิน 20% เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 2.5 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % เถ้าลอยและการยุบตัว



รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ใส่เถ้าลอยที่ 0%,20%,40%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

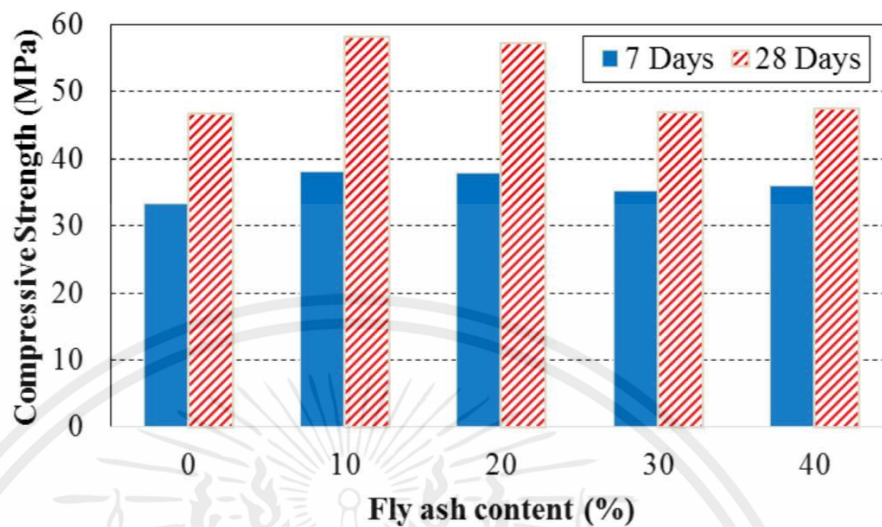


Figure 7. Compressive strength result

รูปที่ 2.7 รูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง % เถ้าลอยและกำลังรับแรงอัด

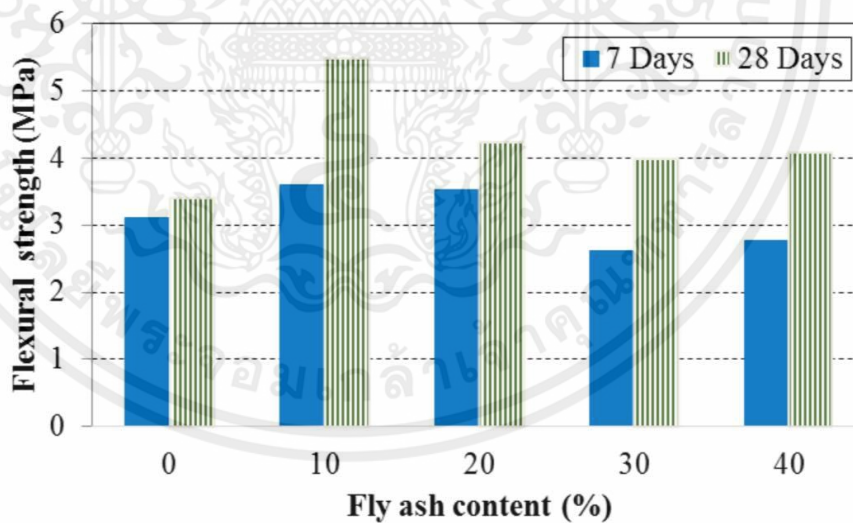
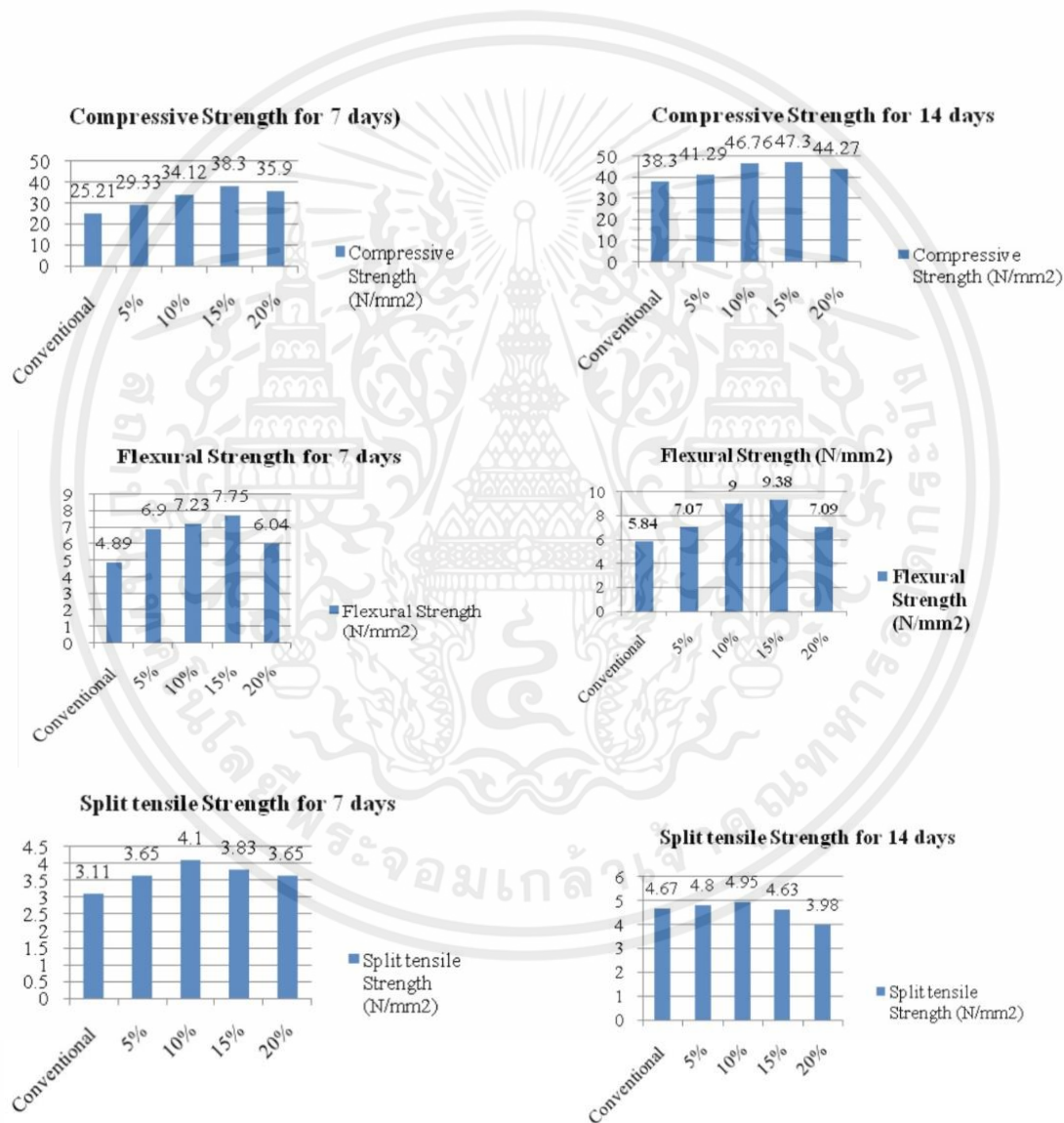


Figure 8. Flexural strength result

รูปที่ 2.8 รูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง % เถ้าลอยและกำลังรับแรงดัด

2.7.5 R.Selvapriya (2019) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการแทนที่ซีเมนต์ในคอนกรีตด้วยซิลิกาฟุ่มโดยแทนที่ด้วยอัตราส่วน 0% 5% 10% 15% และ 20% จากนั้นได้ทำการทดสอบ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังดัด จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะบ่มคอนกรีต 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงสุดอยู่ที่ 15% เช่นเดียวกับกำลังรับแรงดัด ที่จะได้ค่าสูงสุดที่ 15% แต่กำลังรับแรงดึงจะสูงสุดอยู่ที่ 10% จากการสังเกตกราฟ พบว่าคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังไปตั้งแต่ 1-15% และเมื่อใส่ซิลิกาฟุ่มไปถึง 20% กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังดึง กลับลดลงเช่นเดียวกับการบ่มคอนกรีตที่ 14 วัน ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าซิลิกาฟุ่มแทนที่ซีเมนต์ได้ไม่เกิน 15% จึงได้ประสิทธิภาพสูงสุด



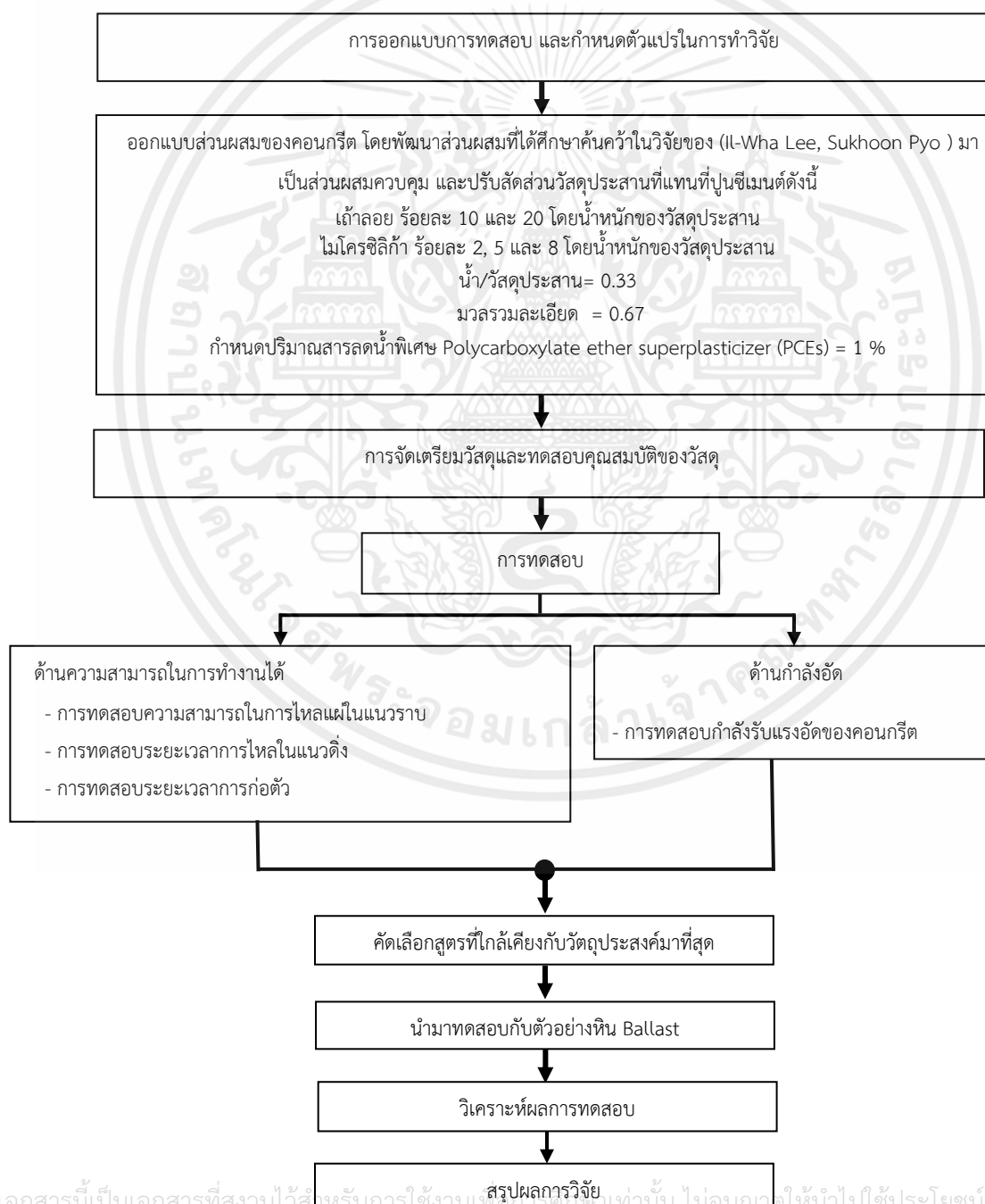
รูปที่ 2.9 รูปกราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % ซิลิกาฟุ่ม และกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง ทั้ง 7 และ 14 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์และวัสดุผสม การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ การทดสอบหาค่าการตัวตัวของมอร์ตาร์ การทดสอบการไหลแผ่แนวราบและแนวตั้งของมอร์ตาร์ และการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่น

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบการทดสอบและกำหนดตัวแปรในการทำวิจัย

การออกแบบการทดสอบและกำหนดตัวแปรในการวิจัยมีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

#### 3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติด้านความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

3.2.1.1 ทดสอบคุณสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (Mini Slump Flow Test) ตามมาตรฐาน NF EN196-1

3.2.1.2 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ (J-14 funnel) ตามมาตรฐาน JSCE-F531

3.2.1.3 ทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์ (setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C191

#### 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3.2.2.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของมอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยทำการทดสอบเมื่อทำการบ่มลูกปูนมอร์ตาร์ที่ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

3.2.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นหรือค่ายังโมดูลัส (Modulus of elasticity or Yongs Modulus : E) หน่วยที่ได้เหมือนกับความเค้น (N/m)<sup>2</sup> ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine – UTM (M1000/RF-2)

### 3.3 การออกแบบส่วนผสมของซีเมนต์เกรดเร็ว

ส่วนผสมของซีเมนต์เกรดเร็วที่ใช้ในงานวิจัย เป็นส่วนผสมที่พัฒนามาจากส่วนผสมของงานวิจัย

Experimental investigation on the application of quick-hardening mortar for converting railway ballasted track to concrete track on operating line เป็นส่วนผสมควบคุม และแปรผันปริมาณถ้าลอยใน อัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และปริมาณไมโครซิลิกาในอัตราร้อยละ 2, 5 และ 8 โดย น้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมปริมาณน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.33 ควบคุมปริมาณมวลรวม โดยมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (โดยน้ำหนัก) เท่ากับ 0.67 และใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด

Polycarboxylate ether superplasticizer (PCEs) เท่ากับ 1% ทำการผสม และทดสอบค่าความสามารถ

### 3.4 วัสดุและคุณสมบัติ

#### 3.4.1 ปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราทีพีไอ (สีแดง) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (ORDINARY PORTLAND CEMENT TYPE 1) มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานก่อสร้างงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป เช่น งานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน สนามบิน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงประเภทต่างๆ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14

#### 3.4.2 ซิลิกาฟุ่ม



รูปที่ 3.2 ซิลิกาฟุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอลิโพรพิลีนจะ ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่วัสดุพอลิโพรพิลีนมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ ประโยชน์ของซิลิกาฟุ่ม

- ลดการเยิ้ม(Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีตสด
- เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว
- เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมาก ส่งผลให้มีความ ทนทานสูง การซึมผ่านน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก มาตรฐาน ASTM C618 และมีความถ่วงจำเพาะ 2.168

รายการ	การทดสอบ
1.ซีตปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก	0.3
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก	20
3.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก	0.389
4.ซีตปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง	18.75
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง	20
6.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง	0.349
7.น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้	40
8.ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกต้องแทนที่	18.45
9.ความถ่วงจำเพาะ	2.16

ตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะไมโครซิลิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4.3 เถ้าลอย



รูปที่ 3.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย ในประเทศไทยได้มาจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ จากโรงไฟฟ้า มีลักษณะที่เรียกว่า เป็นวัสดุ ปอซโซลาน คือ มีแร่ธาตุอลูมิน่า และซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก วัสดุนี้ไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน เหมือนกับปูนซีเมนต์ แต่ปัจจุบันใส่เถ้าลอยเพื่อช่วยลดต้นทุน และเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น หรือ ถ้าเถ้าลอยมีความละเอียดมากพอเมื่อผสมกับน้ำ และทำปฏิกิริยาเคมีกับต่างก็สามารถมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อม ประสานได้เช่นเดียวกัน

ที่มา โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จ.ระยอง มาตรฐาน ASTM C 618 และ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.13

รายการ	การทดสอบ
1.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก	0.6
2.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก	20
3.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งแรก	0.392
4.ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง	18.9
5.อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง	20
6.น้ำหนักซีเมนต์และถาดครั้งหลัง	0.353
7.น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้	39
8.ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่	18.3
9.ความถ่วงจำเพาะ	2.13

ตารางที่ 3.2 ความถ่วงจำเพาะเถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 Polycarboxylate ether superplasticizer (PCEs)



รูปที่ 3.4 Polycarboxylate ether superplasticizer (PCEs)

มีลักษณะ ของเหลวสีน้ำตาลเข้มความหนาแน่น 1.07 กิโลกรัมต่อลิตร (ที่อุณหภูมิ+20 C) ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.25-2.30

### 3.4.5 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมหลักในงานคอนกรีต น้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและไม่เจือปนต่างๆ ที่ผลต่อความแข็งแรงและความทนทานของมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบ น้ำที่ใช้ทำการทดสอบเป็นน้ำประปา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.4.6 มวลรวมละเอียด



รูปที่ 3.5 ทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นทรายหยาบ มีลักษณะเป็นทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ขึ้นไป มีสีน้ำตาลออกเหลือง และมีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.68 มีค่าความถ่วงจำเพาะทรายอบแห้ง 2.505 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.54 มีสภาพอิมตัวผิวแห้ง 2.539 มีค่าสารอินทรีย์เจือปนโดยการพิจารณาจากแผ่นกระดาษสารอินทรีย์เบอร์ 2 ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน ASTM C40



รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ในทราย

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบน ตะแกรง
เบอร์ 4	7.81	1.57	1.57
เบอร์ 8	28.84	5.79	7.36
เบอร์ 16	80.67	16.19	23.55
เบอร์ 30	144.04	28.92	52.47
เบอร์ 50	161.65	32.45	84.92
เบอร์ 100	67.21	13.49	98.41
ถาด	7.90	1.58	99.99
รวม	498.12	1.58	268.28
ค่าโมดูลัสความละเอียด		2.68	

ตารางที่ 3.3 โมดูลัสความละเอียดของทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4.7 มวลรวมหาย



รูปที่ 3.7 หินบัสลาสต์

หินหินบัสลาสต์ ที่ใช้ในการทดสอบที่มีขนาด 40-50 มิลลิเมตร มีค่าโมดูลัสความละเอียด 7.27 และมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.27

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 2"	1305	43.485	43.485
เบอร์ 1 ½"	1204	40.120	83.605
เบอร์ 1"	492	16.395	100
เบอร์ ¾"	0	0	100
เบอร์ ½"	0	0	100
เบอร์ 3/8"	0	0	100
เบอร์ 4	0	0	100
ถาด	0	0	100
รวม	3001	100	727.09
ค่าโมดูลัสความละเอียด		7.27	

ตารางที่ 3.4 โมดูลัสความละเอียดของหินหินบัสลาสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.5 การออกแบบส่วนผสม

No.	Specimen Code	Porland Cement	Fly Ash	Silica Flume	PCEs	W/B	Sand <i>kg</i> <i>/m<sup>3</sup></i>
		<i>kg/m<sup>3</sup></i>	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	%by binder		
1	control	1081.374	0	0	10.814	356.853	724.521
2	FA10MS0	958.004	106.449	0	10.645	351.283	713.221
3	FA20MS0	838.506	209.626	0	10.481	345.884	702.248
4	FA0MS02	1056.684	0	21.565	10.782	355.822	722.427
5	FA0MS05	1019.915	0	53.680	10.736	354.286	719.308
6	FA0MS08	983.462	0	850518	10.690	352.764	716.217
7	FA10MS02	934.089	106.146	21.229	10.615	350.283	711.182
8	FA10MS05	898.411	105.695	52.848	10.570	348.795	708.159
9	FA10MS08	863.035	105.248	84.199	10.525	347.319	705.163
10	FA20MS02	815.253	209.039	20.904	10.452	344.915	700.281
11	FA20MS05	780.616	208.164	52.041	10.408	343.471	697.351
12	FA20MS08	746.269	207.297	82.919	10.365	342.040	694.445

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงส่วนผสมของแต่ละการทดสอบ ต่อ 1 ลบ.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอักษรชื่อย่อของเถ้าลอยเป็นภาษาอังกฤษ, ตัวเลขบอกจำนวนร้อยละเถ้าลอย, ตัวอักษรชื่อย่อของไมโครซิลิกาเป็นภาษาอังกฤษ, ตัวเลขบอกจำนวนร้อยละไมโครซิลิกา ยกตัวอย่างชื่อเรียกขึ้นตัวอย่าง FA20MS02

FA คือ เถ้าลอย (Fly ash)

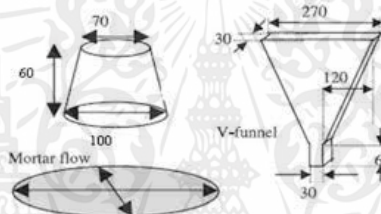
10 คือ ร้อยละปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์

MS คือ ไมโครซิลิกา (Micro-silica)

02 คือ ร้อยละปริมาณไมโครซิลิกาที่ใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์

### 3.6 การทดสอบ

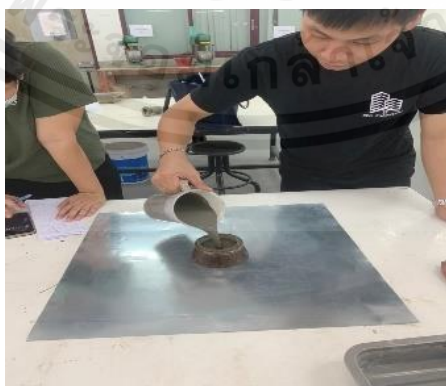
#### 3.6.1 ทดสอบคุณสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ตาร์(Mini Slump Flow Test)ตามมาตรฐาน NF EN196-1



รูปที่ 3.8 เครื่องมือการทดสอบการไหลแผ่

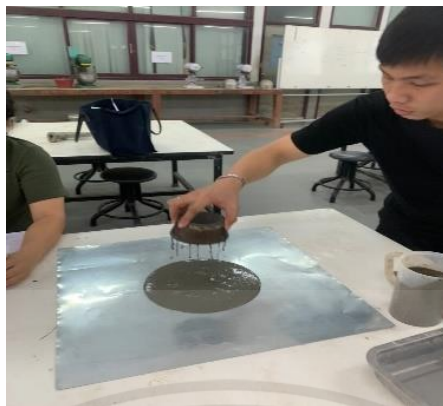
วิธีการทดสอบนี้สามารถหาค่าเวลาการไหลของซีเมนต์เกร้าท์และการขยายตัวช่วงต้น  
ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำแบบการทดสอบวางบนแผ่นรองโดยวางตรงกลางของแผ่น
2. นำซีเมนต์เกร้าท์ที่ผสมเสร็จภายในระยะเวลา 8 นาที เทลงในแบบการทดสอบและปาดหน้าให้เรียบ



รูปที่ 3.9 การทดสอบการไหลแผ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การทดสอบการไหลแผ่

3. ยกแบบการทดสอบขึ้นพร้อมจับเวลา รอการไหลของซีเมนต์เกร้าท์หยุดและหยุดเวลา



รูปที่ 3.11 การทดสอบการไหลแผ่

4. ทำการวัดระยะ 2 แนวแกน X และ Y

### วิธีการคำนวณ

นำค่าที่วัดได้ทั้ง 2 แนวแกนมาหาค่าเฉลี่ย

### 3.6.2 การทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์ (J-14 funnel) ตามมาตรฐาน JSCE-F531



รูปที่ 3.12 เครื่องมือทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์

วิธีการทดสอบนี้เพื่อหาความหนืดของมอร์ตาร์สามารถทดสอบโดยกรวย มาตรฐานรูปตัววี (V-funnel) มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.11

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำซีเมนต์เกร้าท์ที่ผสมเสร็จภายในระยะเวลา 8 นาที เทซีเมนต์เกร้าท์ลงในกรวยจนเต็ม

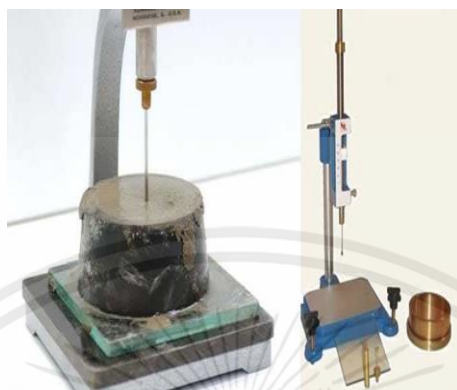


รูปที่ 3.13 ทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์

2. จากนั้นปล่อยให้ ซีเมนต์เกร้าท์ไหลจนกระทั่งผู้ทดสอบมองเห็นแสงลอดจากปลายกรวย ระยะเวลาที่มอร์ตาร์ไหลตั้งแต่เริ่มจนเมื่อผู้ทดสอบเห็นแสงคือเวลา ที่บ่งบอกความหนืดของมอร์ตาร์ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้เวลาน้อยหมายความว่ามอร์ตาร์นั้นมีความหนืดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 ทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์ (setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C191



รูปที่ 3.14 เครื่องมือทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์

วิธีการทดสอบนี้เพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เกร้าท์

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำซีเมนต์เกร้าท์ที่ผสมเสร็จภายในระยะเวลา 8 นาที มาเทลงในกรวยการทดสอบ
2. ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1hr โดยไม่ให้กระทบกระเทือน หลังจากนั้นทำการทดสอบโดยใช้เข็มไวแคตขนาด 2 mm. หาระยะเวลาจรม



รูปที่ 3.15 ทดสอบหาค่าการก่อตัวของมอร์ตาร์

3. จากนั้นทิ้งไว้อีก 1 hr และทำตามขั้นตอนที่ 2 จนกว่าระยะจรมของเข็มเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ให้ลดเวลาลงเหลือ 30 min. และทำจนกว่าจะได้ระยะจรมของเข็มไวแคตที่ 25 mm. หรือน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ทดสอบหาค่าการก่ตัวของมอร์ตาร์

3.6.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของมอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 ลูกบาศก์



รูปที่ 3.17 เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

วิธีการทดสอบนี้เพื่อหาค่ากำลังอัดของซีเมนต์เกร้าท์ โดยทำการทดสอบเมื่อทำการบ่มลูกปูนที่ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำซีเมนต์เกร้าท์ที่ผสมเสร็จภายในระยะเวลา 8 นาที มาเทลงในแบบโมล 5x5x5 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

2. ทิ้งไว้ให้ซีเมนต์เกร้าท์เซตตัวเป็นระยะเวลา 24 hr หรือ 1 วัน
3. จากนั้นนำลูกปูนที่แกะออกจากแบบไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28 วัน



รูปที่ 3.19 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

4. เมื่อลูกปูนครบกำหนดเวลานำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Test Machine) แบบตั้งพื้นเป็นระบบไฮดรอลิกส์แบบมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังตามมาตรฐาน ASTM E4 SB1610 GRADE1

#### วิธีการคำนวณ

1. ค่าที่อ่านได้จากเครื่องกด มีหน่วยเป็น KN
2. โดยนำ 1000 ไปคูณหน่วยที่ได้จะเหลือ N
3. เปลี่ยน N ให้เป็น kg โดยการนำค่า 9.81 ไปหาร จะได้หน่วยเป็น kg
4. นำค่าที่ได้มีหน่วยเป็น kg ไปหารกับขนาดหน้าตัดรับแรงกด จะได้ค่ามีหน่วยเป็น  $kg/cm^2$  หรือ ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นหรือค่า Young's Modulus (Modulus of elasticity or Yongs Modulus : E)



รูปที่ 3.20 เครื่องมือการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

วิธีการทดสอบนี้เพื่อหาค่าความยืดหยุ่นของก้อนตัวอย่างซีเมนต์เกร้าท์  
ขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบโดยนำแท่งตัวอย่างซีเมนต์เกร้าท์ที่ผสมกับหินบลาสต์ บ่มด้วยอากาศที่มีอายุ 3 วัน นำกระดาษทรายเบอร์: 100 และ เบอร์: 1000 มาขัด บริเวณที่จะแผ่นสเตรนเกอร์ดด้านแกน X และ Y ให้เรียบเสมอกัน นำแผ่นสเตรนเกอร์ติดด้านแกน X และ Y ด้วยกาวร้อน ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง นำเข้าเครื่องทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



รูปที่ 3.21 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการคำนวณ

หน่วยที่ได้เหมือนกับความเค้น ( $\text{N/m}^2$ ) ส่วนสมการที่ใช้คำนวณความเค้นต่อความเครียด เป็นดังนี้

$$E = \frac{\text{ความเค้น (s)}}{\text{ความเครียด (e)}}$$

เมื่อ  $s = \frac{F}{A}$  และ  $e = \frac{d}{l}$  แล้ว ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นก็สามารถคำนวณได้อีกวิธีดังนี้

$$E = \frac{(F/A)}{(d/l)}$$

$$E = \frac{Fl}{Ad}$$

## บทที่ 4

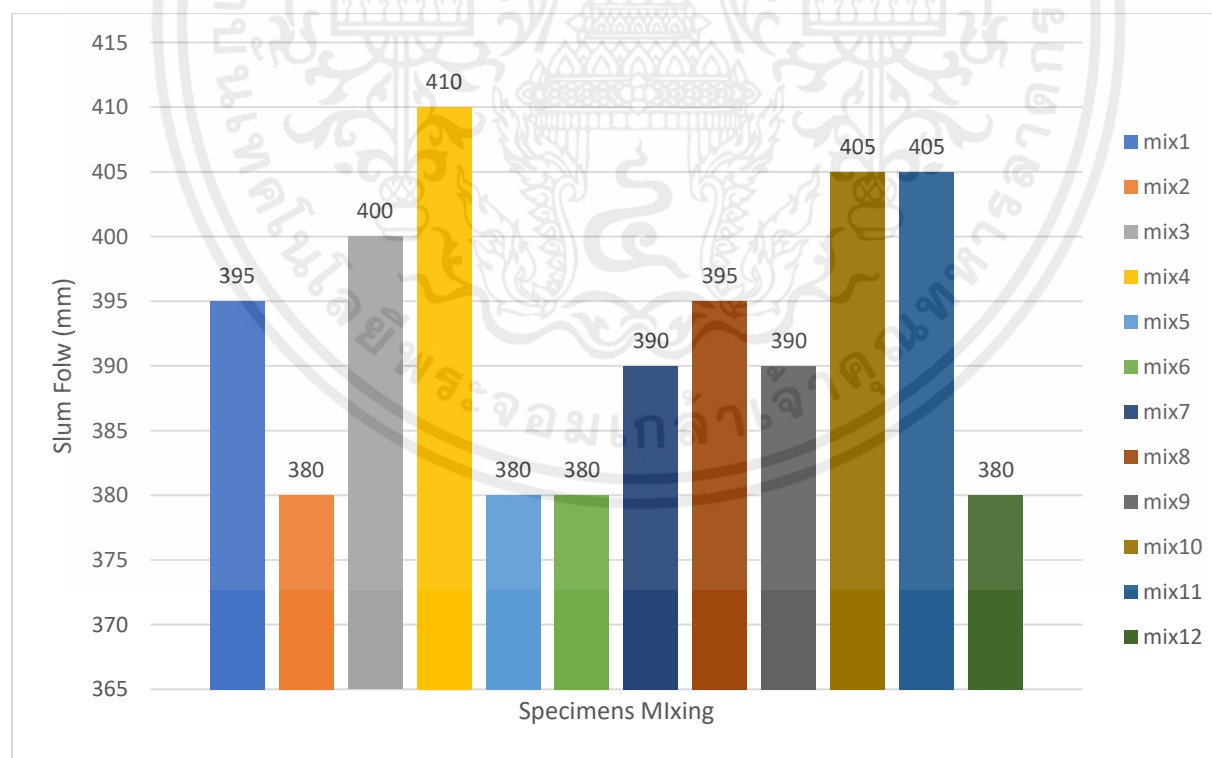
### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการผสมตัวอย่างซีเมนต์เกรดโทโดยมีอัตราน้ำซีเมนต์เท่ากับ 0.33 และสารลดน้ำที่ 1% โดยใช้การแทนที่ Micro silica : Fly ash ในซีเมนต์ในปริมาณ 0%:0% , 0%:10% , 0%:20% , 2%:0% , 5%:0% , 8%:0% , 2%:10% , 5%:10% , 8%:10% , 2%:20% , 5%:20% และ 8%:20% โดยทำการทดสอบการไหลแผ่ในแนวราบ การทดสอบการไหลแผ่ในแนวตั้ง การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว และการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วันตามลำดับ เพื่อเลือกมิกซ์ที่ดีที่สุด และนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน โดยใช้หินขนาด 2” และได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบซีเมนต์เกรดโท

##### 4.1.1 การทดสอบการไหลแผ่ในแนวราบ

ผลการทดสอบค่าการไหลตัวของซีเมนต์เกรดโท ที่มีอัตราส่วนผสม Fly ash และ Micro silica แทนที่ปูนซีเมนต์ตามลำดับ



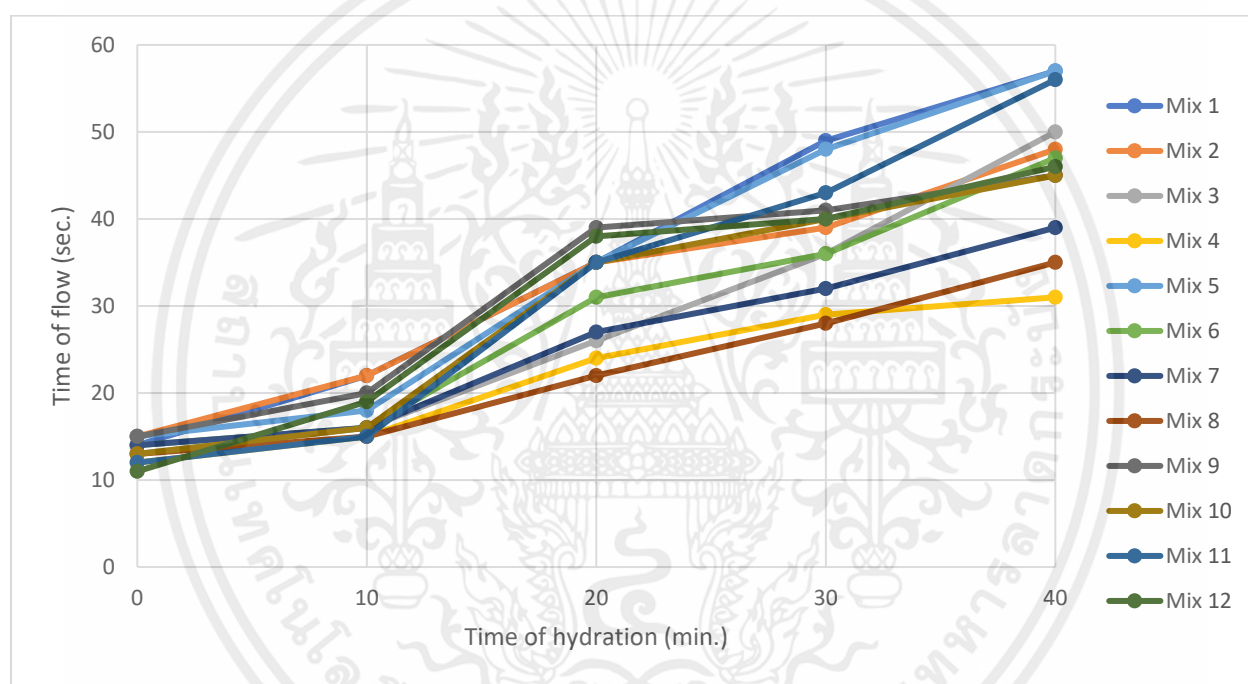
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดสอบ Mini slump flow test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบพบว่า Fly ash และ Micro silica ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%:0% , 0%:10% , 0%:20% , 2%:0% , 5%:0% , 8%:0% , 2%:10% , 5%:10% , 8%:10% , 2%:20% , 5%:20% และ 8%:20% ให้ค่าการไหลตัวของซีเมนต์เกรทท์เท่ากับ 395, 380, 400, 410, 380, 380, 390, 395, 390, 405, 405 และ 380 มิลลิเมตร ตามลำดับ

#### 4.1.2 การทดสอบการไหลแผ่ในแนวตั้ง

ผลการทดสอบค่าระยะเวลาการไหลตัวของซีเมนต์เกรทท์ ที่มีอัตราส่วนผสม Fly ash และ Micro silica แทนที่ปูนซีเมนต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบ J-14 V-funnel flow test

จากรูปที่ 4.2 ผลการทดสอบพบว่า Fly ash และ Micro silica ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%:0% , 0%:10% , 0%:20% , 2%:0% , 5%:0% , 8%:0% , 2%:10% , 5%:10% , 8%:10% , 2%:20% , 5%:20% และ 8%:20% ที่ 0, 10, 20, 30, และ 40 นาที ให้ค่าระยะเวลาการไหลตัวของซีเมนต์ดังตาราง

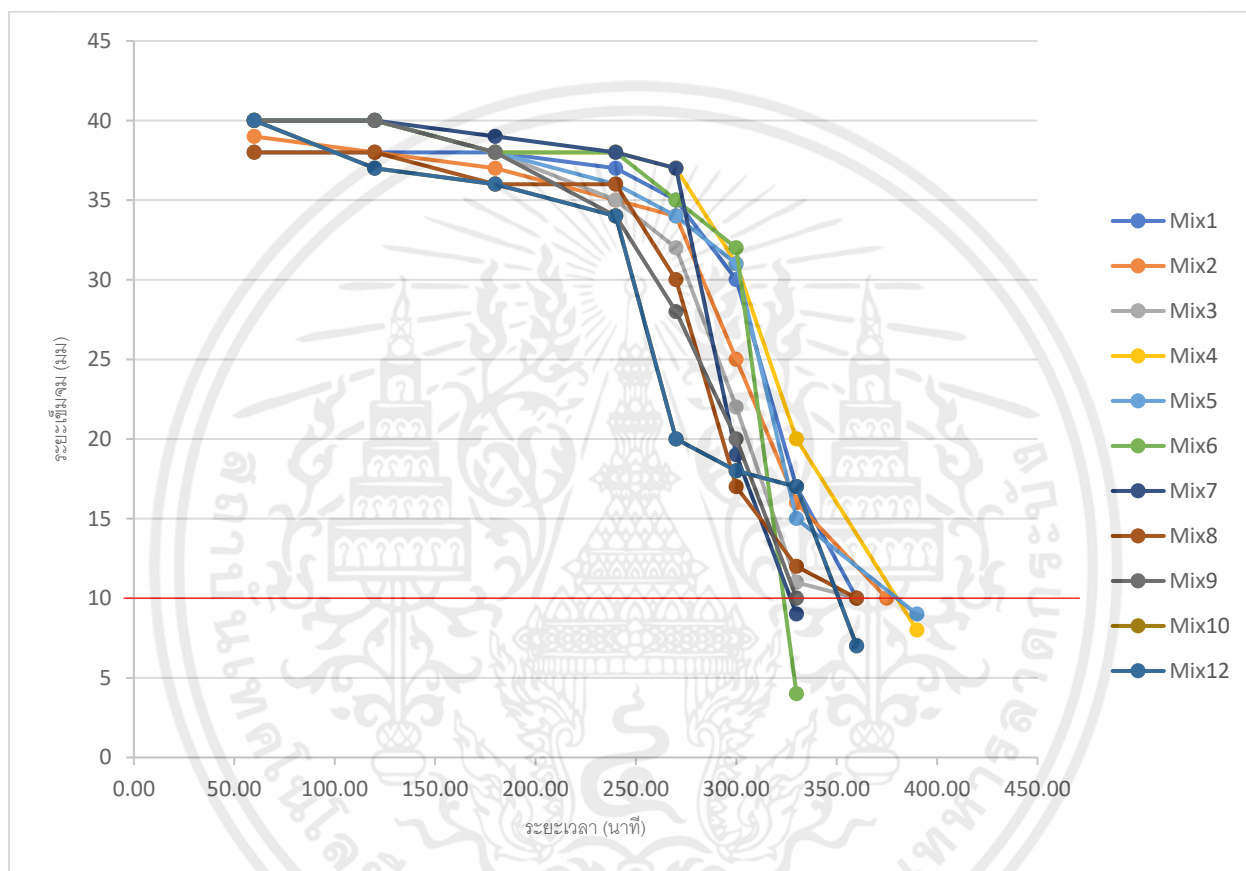
Specimens Mixing	ค่าระยะเวลาการไหลตัว				
	ที่ 0 นาที (Sec)	ที่ 10 นาที (Sec)	ที่ 20 นาที (Sec)	ที่ 30 นาที (Sec)	ที่ 40 นาที (Sec)
1	14	22	35	49	57
2	15	22	35	39	48
3	13	16	26	36	50
4	12	15	24	29	31
5	15	18	35	48	57
6	14	16	31	36	47
7	14	16	27	32	39
8	13	15	22	28	35
9	15	20	39	41	45
10	13	16	35	40	45
11	12	15	35	43	56
12	11	19	38	40	46

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาการไหลในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เกราทที่มีอัตราส่วนผสม Fly ash และ Micro silica แทนที่ปูนซีเมนต์ตามลำดับ



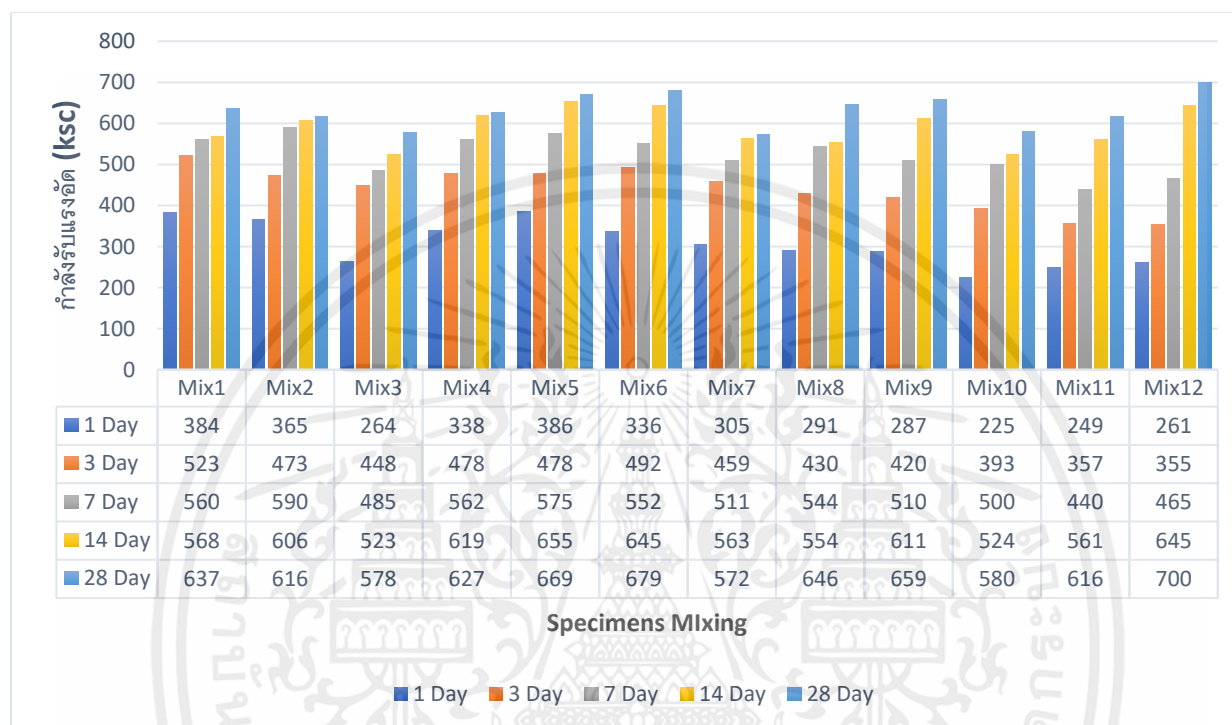
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบ Setting time

จากรูปที่ 4.3 ผลการทดสอบพบว่า Fly ash และ Micro silica ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%:0% , 0%:10% , 0%:20% , 2%:0% , 5%:0% , 8%:0% , 2%:10% , 5%:10% , 8%:10% , 2%:20% , 5%:20% และ 8%:20% ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นของซีเมนต์เกราทเท่ากับ 360, 375, 360, 380, 380, 320, 325, 360, 330, 330, 390 และ 350 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เกราทที่มีอัตราส่วนผสม Fly ash และ Micro silica แทนที่ปูนซีเมนต์ตามลำดับ



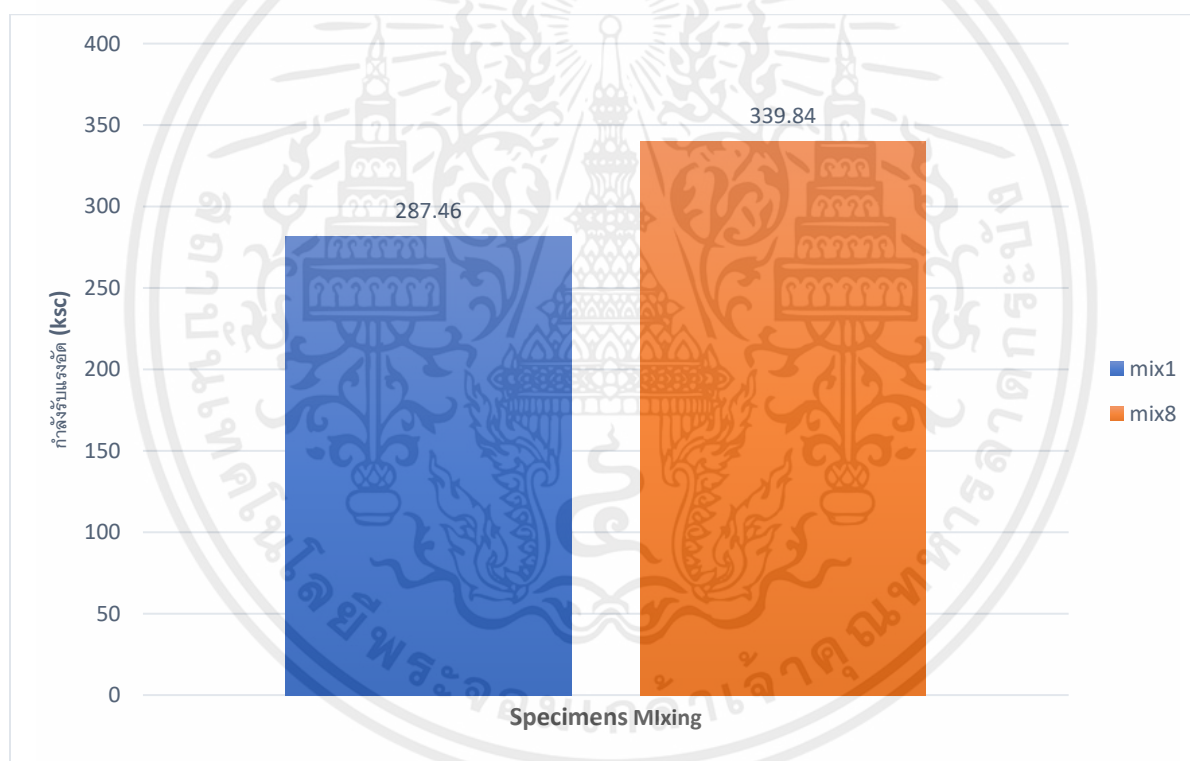
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบ Compressive strength

จากรูปที่ 4.4 ผลการทดสอบพบว่า Fly ash และ Micro silica ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0%:0% , 0%:10% , 0%:20% , 2%:0% , 5%:0% , 8%:0% , 2%:10% , 5%:10% , 8%:10% , 2%:20% , 5%:20% และ 8%:20% ที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เกราทแสดงดังข้อมูล

## 4.2 ผลการทดสอบคอนกรีต

### 4.2.1 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด

จากการพิจารณามิกซ์ที่ดีที่สุด 1 มิกซ์ จากทั้งหมด 12 มิกซ์ ได้แก่ มิกซ์ที่ 8 เนื่องจากค่าจากการทดสอบของมิกซ์ที่ 8 เป็นค่าที่ผ่านตามาตรฐานการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบ ในขณะที่มิกซ์ที่ 1 ถึง 7 และ มิกซ์ที่ 9 ถึง 12 เป็นค่าที่ไม่ผ่านตามาตรฐานการทดสอบจนครบ 4 การทดสอบ จึงพิจารณาเลือกมิกซ์ที่ 8 เป็นมิกซ์ที่ดีที่สุด และทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทำการเปรียบเทียบกับมิกซ์ที่แย่ที่สุด ได้แก่ มิกซ์ที่ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบ Compressive strength

จากรูปที่ 4.4 ผลการทดสอบพบว่า มิกซ์ที่ 1 และ มิกซ์ที่ 8 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 287.46 ksc. และ 339.84 ksc. ที่อายุ 3 วัน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E)

จากการทดสอบหาค่า E หรือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ยังมีค่า E มาก แสดงว่าวัสดุมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวเหยียดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย ในขณะที่มีความเค้นมากระทำ ค่าการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8

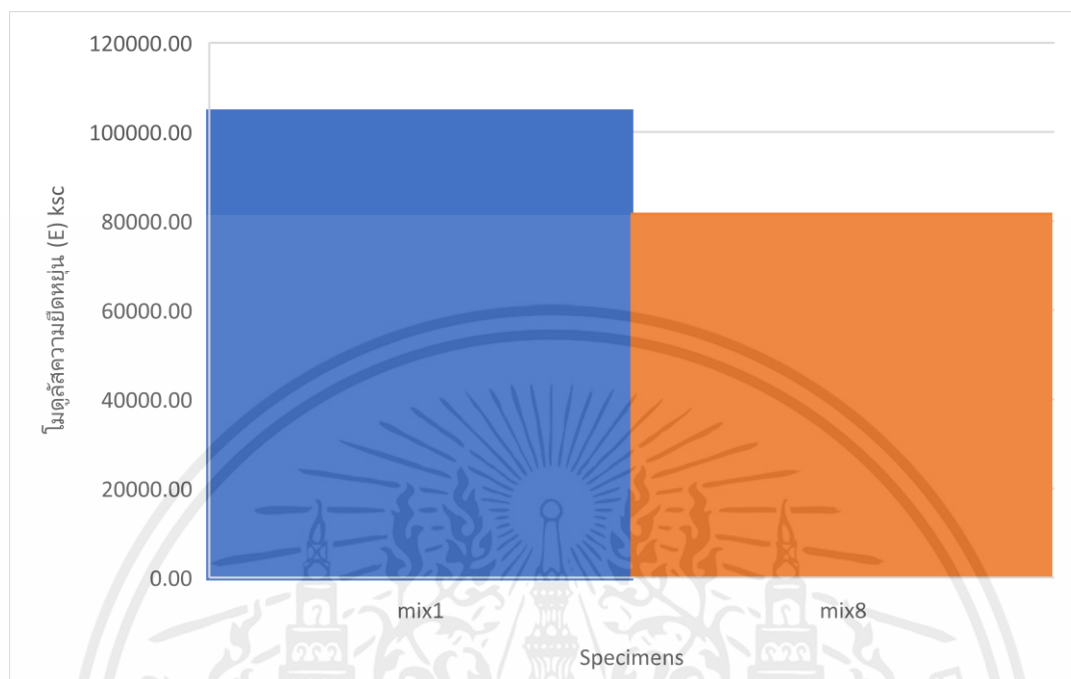
ตัวอย่างที่	X	Y
1	2602.0	2555.1
2	2823.9	2898.7

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สูตร Mix 1

ตัวอย่างที่	X	Y
1	3910.4	3739.1
2	4362.2	4399.2

ตารางที่ 4.3 ค่าการทดสอบการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สูตร Mix 8

ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ของมิกซ์ที่ 8 นำมาเทียบกับมิกซ์ที่ 1



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบ Modulus of elasticity

จากรูปที่ 4.6 ผลการทดสอบพบว่า มิกซ์ที่ 1 และ มิกซ์ที่ 8 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 104359.04 ksc และ 81898.70 ksc ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการพัฒนาชั้นหินโรยทางรถไฟด้วยวิธีซีเมนต์เกราทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางรถไฟ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลที่ได้จากการดำเนินงาน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปของงานวิจัยตามวัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้โดยสามารถแบ่งเป็นประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้

#### 5.1 ข้อสรุปงานวิจัย

5.1.1 จากการพิจารณามิกซ์ที่ดีที่สุด 1 มิกซ์ จากทั้งหมด 12 มิกซ์ ได้แก่ มิกซ์ที่ 8 เนื่องจากค่าจากการทดสอบของมิกซ์ที่ 8 เป็นค่าที่ผ่านตามมาตรฐานการทดสอบทั้ง 4 การทดสอบ ในขณะที่มิกซ์ที่ 1 ถึง 7 และ มิกซ์ที่ 9 ถึง 12 เป็นค่าที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานการทดสอบจนครบ 4 การทดสอบ จึงพิจารณาเลือกมิกซ์ที่ 8 เป็นมิกซ์ที่ดีที่สุด จากนั้นได้ทำการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นผลการทดสอบพบว่า มิกซ์ที่ 1 และ มิกซ์ที่ 8 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเท่ากับ 104359.04 ksc และ 81898.70 ksc ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า มิกซ์ที่ 8 มีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่ามีความยืดหยุ่นสูงกว่า มิกซ์ที่ 1 ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานกับหินโรยทางในทางรถไฟ

5.1.2 สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์มอร์ต้าเกราทที่พัฒนาขึ้น คือส่วนผสมมิกซ์ที่ 8 ที่มีเถ้าลอย 10% และ ซิลิกาฟูม 5% โดยสัดส่วนนี้มีกำลังอัด ความสามารถเทได้ และระยะเวลาการก่อตัว ได้ตรงตามมาตรฐาน ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งาน กำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 646 ksc ที่อายุ 28 วัน ซึ่งมากกว่า มิกซ์ที่ 1 และความสามารถในการเทได้ และระยะเวลาการก่อตัวก็ยังสามารถดีกว่า

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้จากการทดสอบ สามารถนำไปต่อยอด และทดสอบต่อไปได้ แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติงานจริง เนื่องจากยังต้องทดสอบในอีกหลายอย่าง เช่น การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และทดสอบในระดับสเกลที่ใหญ่กว่า ทั้งนี้ยังคงต้องศึกษาในเรื่องของการระบายน้ำเพิ่มเติม การสั้นของทางรถไฟในขณะรถวิ่ง จึงต้องศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเพื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง และยังต้องนำค่า E ที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าจากมาตรฐานอ้างอิงที่ [20] หากผู้วิจัยท่านใดจะนำไปศึกษาต่ออยากจะทำให้ดูมาตรฐานค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจากงานวิจัยดังกล่าว

### เอกสารและสิ่งอ้างอิง

[1] Il-Wha Lee, Sukhoon Pyo (2016). Experimental investigation on the application of quick-hardening mortar for converting railway ballasted track to concrete track on operating line. Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, South Korea

[2] Il-Wha Lee, Sukhoon Pyo , Young-Ho Jung (2016). Development of quick-hardening infilling materials for composite railroad tracks to strengthen existing ballasted track. a Korea Railroad Research Institute, 176 Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, South Korea b Sigma STI Ltd. Co., 58-6 Sinman-ro 409beon-gil, Gwangju-si, Gyeonggi-do, 12723, South Korea

[3] Takahisa NAKAMURA, Yoshitsugu MOMOYA, Katsumi MURAMOTO, Kazuki ITOU (2014) Development of Railway Roadbed Improvement Method for Existing Lines by Reusing Deteriorated Ballast. Track Structure & Geotechnology Laboratory, Track Technology Division

[4] N Ghazali<sup>1</sup> and team (2021) Effect of Fly Ash as Partial Cement Replacement on Workability and Compressive Strength of Palm Oil Clinker Lightweight Concrete. Faculty of Civil Engineering Technology, University Malaysia Pahang, 26300 Kuantan, Pahang, Malaysia Department of Civil Engineering, College of Engineering, University Malaysia Pahang, 26300 Kuantan, Pahang, Malaysia

[5] R. Selvapriya (2019) Silica fume as Partial Replacement of Cement in Concrete. Structural Engineering, Paavai Engineering College, Pacha, Namakkal-637018 Tamil Nadu, India.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[6] K.P. Ramaswamy, Muhammed A. Siddik and M. Nazeer. WORKABILITY AND STRENGTH STUDIES ON FLY ASH MODIFIED MASONRY MORTARS. Dept. of Civil Engineering, TKM College of Engineering, Kollam

[7] Mohamed Lamine Zeggar\*, Noor Azline, N. Azizi Safiee(2019) Fly ash as supplementary material in concrete. Housing Research Centre, Faculty of Engineering, University Putra Malaysia,43400UPM

[8] P.K. Woodward, J. Kennedy, O. Laghrouche, D. P. Connolly and G. Medero(2014). STUDY OF RAILWAY TRACK STIFFNESS MODIFICATION BY POLYURETHANE REINFORCEMENT OF THE BALLAST. Professor, Institute for Infrastructure & Environment School of the Built Environment, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK

[9] นคร จันทสร (2015). โอกาสของผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในอุตสาหกรรมระบบราง. ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ ปทุมธานี

[10] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2007) ชีลิกาฟูม. วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

[11] ปิยรัตน์ เปาเล้ง. (2019)การพัฒนาเทคนิคในการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน.ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[12] ฐาปนี ศุภกิจวัฒนา.(2016) การเพิ่มสมรรถนะด้านความต้านทานการเกิดการเข็มและการแยกตัวสำหรับคอนกรีตงานเข็มเจาะ ด้วยวัสดุประสานร่วมสามชนิด. ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] สยาม ยิ้มสิริ (2016) กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ: กรณีศึกษาของทางรถไฟสายเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [14] ณพนัย คำเชื่อน,ธนากร รุ่งเรือง,มีเดช อนันตวงศ์ (2014) การเปรียบเทียบเพื่อหาการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีต ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [15] ผศ.ดร.สำเร็จ รักซ้อน และ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ (2014) ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. แอ่งเกลือออปโซ. พิมพ์ครั้งที่ 5.
- [16] วินิต ช่อวิเชียร (2012) คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology).
- [17] ป.สัมพันธ์พาณิชย์ ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2013) ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท). พิมพ์ครั้งที่ 7.
- [18] ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา. คู่มือปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [19] สมภพ สุวรรณกวิน. (1996). ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง. ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[20] Xiangyu Qu , Meng Ma \* , Minghang Li, Yanmei Cao and Weining Liu (2019) Analysis of the Vibration Mitigation Characteristics of the Ballasted Ladder Track with Elastic Elements . School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 17121095@bjtu.edu.cn (X.Q.); 17115295@bjtu.edu.cn (M.L.); ymcao@bjtu.edu.cn (Y.C.); wnlou@bjtu.edu.cn (W.L.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

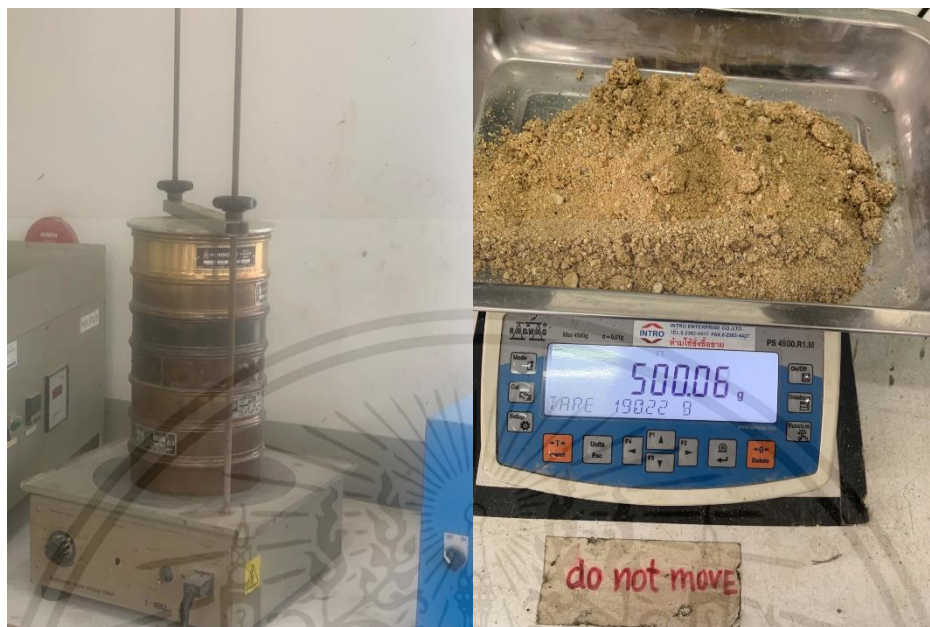


ภาพผนวกที่ ก1 ทดสอบหาสารอินทรีย์ในทราย



ภาพผนวกที่ ก2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก3 การวิเคราะห์หาส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดด้วยตะแกรง



ภาพผนวกที่ ก4 การวิเคราะห์หาส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบด้วยตะแกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก5 การทดสอบการดูดซึ่มของมวลรวมหยาบ



ภาพผนวกที่ ก6 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

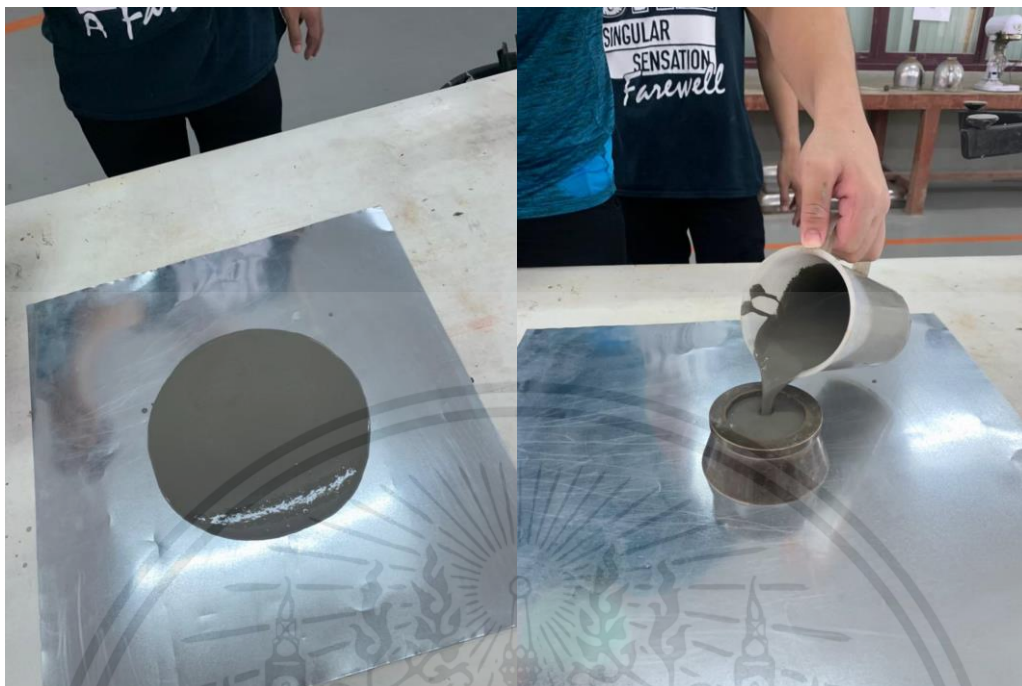


ภาพผนวกที่ ก7 ผสม mortar



ภาพผนวกที่ ก8 เทแบบหล่อคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก9 ทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ก10 ทดสอบการกำลังอัดของมอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก11 ทดสอบการไหลในแนวดิ่ง (j-funnel)

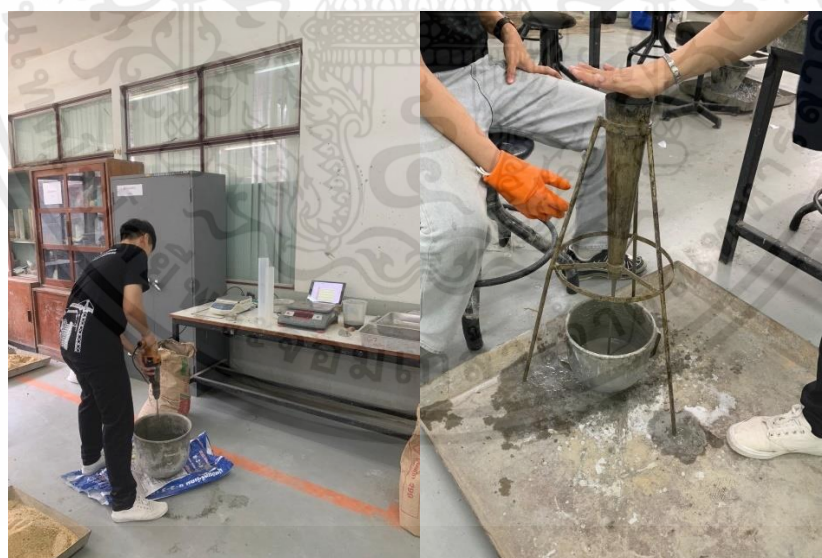


ภาพผนวกที่ ก12 ทดสอบการหาระยะก่อดำของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก13 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น



ภาพผนวกที่ ก14 ผสมและทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก15 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น



ภาพผนวกที่ ก16 การแตกของชิ้นตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	ดณุพล สังข์หนูช
วัน เดือน ปี เกิด	13 กันยายน 2543
สถานที่เกิด	สุโขทัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	60/1 ม.10 ต.กกแรต อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย 64170
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	ศิวะ จันท์แดง
วัน เดือน ปี เกิด	26 กันยายน 2540
สถานที่เกิด	เชียงราย
ที่อยู่ปัจจุบัน	111/7 บ.สันป่าคอง อ.ป่าแดด-จุน ต.สันมะค่า อ.ป่าแดด จ.เชียงราย 57190
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	ศุภัช บัวแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	4 กุมภาพันธ์ 2543
สถานที่เกิด	อุทัยธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	2/117 ถ.รักษารัตน์ ม.11 ต.อุทัยใหม่ อ.เมือง จ.อุทัยธานี 61000
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้