

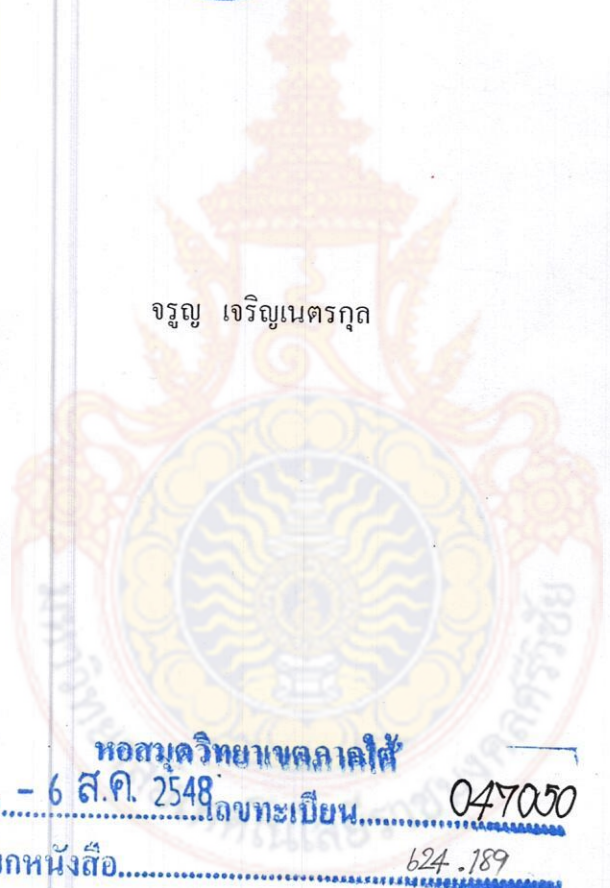
วิทย์ ๗๕

๖ ๐๐๐๐๕๕๖๔

การศึกษาศักยภาพของเก้าอี้เดี่ยวไม้ยางพารามาใช้ในงานคอนกรีต



จรูญ เจริญเนตรกุล



หอสมุดวิทยาศาสตร์

รับเมื่อ - 6 ส.ค. 2548 โดยทะเบียน..... 047050

เลขเรียกหนังสือ..... 624.189

๑ ๗๖  
๒๕๔๖

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้

พ.ศ. 2546

หนังสือนี้เป็นสมบัติของห้องสมุด  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตภาคใต้  
ผู้ใดพบเห็นกรุณาส่งคืน จักขอบคุณยิ่ง

ชื่อโครงการ  
ผู้วิจัย

การศึกษาศักยภาพของเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพารามาใช้ในงานคอนกรีต  
นายจรูญ เจริญเนตรกุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบในด้านกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราของมอร์ตาร์ โดยนำเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยนำหน้ากั้วสตุประสาน ทั้งนี้จะแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  $W/(C+R)$  เท่ากับ 0.550, 0.600, 0.610, 0.630 และ 0.640 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยนำไปแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 3, 7, 14, 28 และ 60 วันตามลำดับ

ผลการศึกษาในด้านกำลังอัดพบว่ามอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราทุกส่วนผสมและทุกที่อายุการทดสอบจะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน และเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราร้อยละของวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดต่ำลง โดยมีมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นร้อยละ 10 ของหน้ากั้วสตุประสาน (R10C) และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นร้อยละ 10 ของหน้ากั้วสตุประสาน (R10N) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 245.98 กก./ซม.<sup>2</sup> และ 245.60 กก./ซม.<sup>2</sup> ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐานมากที่สุด หรือคิดเป็นร้อยละกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานเท่ากับ 85.93 และ 85.80 ตามลำดับ

คำสำคัญ (keywords) : เถ้าซีเมนต์ไม่ยางพารา / มอร์ตาร์ / กำลังอัด

Title The Feasibility Study of Using Rubber Sawdust in Concrete Work  
Candidate Mr. Charoon Charoennatrkul

### ABSTRACT

This research is a study of the effect of compressive force and quantity of replacement of rubber sawdust of mortar. The methods were consequently done as follows. Firstly, two materials were mixed: rubber sawdust dried through moisture resistant chemical and rubber sawdust that was not dried through moisture resistant chemical. Portland cement Type 1 was partly replaced by the latter with the ratio of compound weight at 10%, 20% 30% 40% and 50%. Accordingly the ratio of water and the compound material  $W/(C+R)$  was respectively changed into 0.550, 0.600, 0.610, 0.630 and 0.640. This was compared with the standard mortar of Portland cement Type1 by emerging in water for 3, 7, 14, 28 and 60 days.

The findings indicated that the mixture between mortar of Portland cement Type1 and the rubber sawdust at every rate and period of testing gave less value of compressive force than the standard mortar. Moreover, when the amount of the sawdust with percentage of compound material increased, the compressive force decreased. The mortar of rubber sawdust dried through moisture resistant chemical with 10% of compound material (R10C) and the mortar of rubber sawdust that was not dried through moisture resistant chemical with 10% of compound material (R10N) resulted in compressive force of 245.98 kg/cm<sup>2</sup> and 245.60 kg/cm<sup>2</sup>. This gave the closest value to the standard mortar with the percentage of 85.93 and 85.80 respectively.

**KEYWORDS:** rubber sawdust, mortar, compressive force

## กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความกรุณาจาก แผนกวิชาช่างก่อสร้าง คณะวิชาโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุและเครื่องมือต่างๆ ในการวิจัย อีกทั้งได้รับคำแนะนำ แนวทางในการจัดทำรูปแบบ การนำเสนอผลงาน ตลอดจนช่วยแก้ไข ปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี จากนายเกียรติคุณ สิทธิชัย และคณะผู้บริหารของวิทยาเขตภาคใต้ทุกท่าน

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่บริษัท แอส แอนด์ พี เฟรสดิ่ง จำกัด ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างเก้าอี้เหล็ยไม้ยางพารา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ย่อมเป็นผลมาจาก บุคคลและหน่วยงานที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นายจรูญ เจริญเนตรกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปประกอบ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 แนวทางการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 กำลังอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์	3
2.1 ปูนซีเมนต์	3
2.2 กรรมวิธีการผลิต	3
2.3 องค์ประกอบทางเคมี	4
2.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์	5
2.5 การก่อตัวและการแข็งตัว	7
2.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	7
2.7 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	9
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	10
2.9 วัสดุปอซโซลาน	10
บทที่ 3 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	12
3.1 วัสดุที่นำมาใช้ทดสอบ	12
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	12
3.3 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาลำลังอัดของมอร์ตาร์	17

3.4	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ของถั่วเขียวไม่ย่างพารา	20
3.5	วิธีการศึกษา	21
บทที่ 4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	24
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และถั่วเขียวไม่ย่างพาราที่ใช้ทดสอบ	24
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และถั่วเขียวไม่ย่างพารา	26
4.3	ความสามารถในการไหลของมอร์ต้าร์	27
4.4	กำลังอัดของมอร์ต้าร์	28
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
5.1	สรุปผลการทดลอง	36
5.2	ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง		37
ภาคผนวก		
ก.	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของถั่วเขียวไม่ย่างพารา	39
ข.	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียวไม่ย่างพารา	45
ค.	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตัวอย่าง	47
ประวัติผู้เขียน		

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.3 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	9
3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	21
3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 2 กรณี	22
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าซีลีอูไม้อย่างพารา	27
4.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีลีอูไม้อย่างพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและค่าการไหล	29
4.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าซีลีอูไม้อย่างพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังของมอร์ตาร์มาตรฐาน	29
4.4 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีลีอูไม้อย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและค่าการไหล	31
4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีลีอูไม้อย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน	32
ก. 1 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน	48
ก. 2 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 10C	49
ก. 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 20C	50
ก. 4 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 30C	51
ก. 5 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 40C	52
ก. 6 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 50C	53
ก. 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 10N	54
ก. 8 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 20N	55
ก. 9 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 30N	56
ก. 10 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 40N	57
ก. 11 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R 50N	58

## สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องร้อนตะแกรงสำหรับมวลรวมละเอียด	13
3.2 เตาอบไฟฟ้า	13
3.3 เครื่องผสมซีเมนต์	14
3.4 อุปกรณ์การไหลแผ่ของมอร์ตาร์	14
3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด	15
3.6 แสดงที่ตั้งบริษัท แอส แอนด์ พี เฟรสติ้ง	15
3.7 กองซีลื้อยไม้ยางพารา	16
3.8 ถ้ำซีลื้อยไม้ยางพาราที่ปล่อยลงจากเตาเผา	16
3.9 รูปเตาเผาไฟฟ้าสำหรับเผาซีลื้อยไม้ยางพารา	17
4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำซีลื้อยไม้ยางพารา	24
4.2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ Type 1 ขยาย 1,500 เท่า	25
4.3 ภาพขยายอนุภาคถ้ำซีลื้อยไม้ยางพาราไม่แยกขนาด ขยาย 300 เท่า	25
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุมอร์ตาร์ของถ้ำซีลื้อยไม้ยางพารา ที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของกำลังอัดมาตรฐานกับอายุของมอร์ตาร์ ที่ผสมถ้ำซีลื้อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น	34
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุมอร์ตาร์ของถ้ำซีลื้อยไม้ยางพารา ที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์	35
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานกับอายุของมอร์ตาร์ ที่ ผสมถ้ำซีลื้อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น	35



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในภาคใต้ได้มีอุตสาหกรรมในการแปรรูปไม้ยางพาราเพื่อทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ ทั้งนี้ในการแปรรูปไม้ยางพาราดังกล่าว ชี้อื้อเยื่อเหลือจากการแปรรูปซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปซึ่งจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงแก่ม้อต้มนอกมาในลักษณะของถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพาราและชี้อื้อเยื่อบางส่วนจะถูกทางโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการผลิตปลากระป๋องนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการเลื่อยและไสไม้ในจังหวัดสงขลาที่มีรายชื่อโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไม้ยางพารา ประเภทกิจการไม้แปรรูป, ไม้ไส และทำเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพาราทั้งหมด 178 โรงงาน [1]

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในงานก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยทั่วไปคุณสมบัติของคอนกรีตจะพิจารณาในด้านกำลังอัดและความสามารถในการเทได้ ถ้าหากเราสามารถหาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้งานคอนกรีตก็สามารถช่วยในด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

โดยถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพาราหากสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีต, งานก่อสร้าง โดยนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ก็จะลดค่าใช้จ่ายลงได้ โดยทั่วไปเราจะคำนึงถึงกำลังอัดและในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุปอชโซลานมาใช้ในการผลิตมอร์ต้าร์จะพบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ไม่ผสมวัสดุที่เป็นสารปอชโซลาน ยังพบอีกว่าการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ต้าร์ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุปอชโซลาน ที่ใช้ในการแทนที่ของปูนซีเมนต์ การเกิดการกัดกร่อนจะทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการนำถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพารามาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในมอร์ต้าร์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยแบ่งถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพาราออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและถ่านชี้อื้อเยื่อไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น มาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยควบคุมค่าการไหลแผ่คงที่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบในด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารามาใช้ในงานคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

การวิจัยนี้ใช้เถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราจากโรงงานแปรรูปไม่ย่างพารา บริเวณ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา โดยจะเก็บเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา 2 ลักษณะ คือ เถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ย่างพาราผ่านการอบน้ำยากันความชื้น และเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อมาตรฐานรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 2.75 ทำการหล่อมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราทั้ง 2 ประเภทในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้ง 3 กลุ่มจะควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วง 105 ถึง 115 และทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์หลังจากบ่มในน้ำประปาที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วันตามลำดับ

## 1.4 แนวทางการศึกษา

นอกจากบทที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยแล้ว ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงความหมายของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราและปฏิกิริยาปอซโซลานและข้อสรุปของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้บทที่ 3 จะได้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมตัวอย่าง เถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา ขั้นตอนและวิธีการทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ สำหรับผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลจะนำไปใช้ในบทที่ 4 ส่วนบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ นอกจากนี้ยังได้รวบรวมรายละเอียดของข้อมูลการทดสอบทั้งหมดไว้ในภาคผนวกอีกด้วย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ของการนำเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารามาใช้ในงานคอนกรีต

1.5.2 ทราบถึงผลกระทบในด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น

## บทที่ 2

### กำลังอัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงความหมาย สารประกอบหลักและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลาน และในที่สุดท้ายจะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปูนซีเมนต์

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีกและโรมัน คำว่า "ซีเมนต์" มาจากภาษาลาติน มีความหมายทั่วไป คือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่างๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วยความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี พ.ศ. 2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทา เหมือนกับหินที่ใช้ก่อสร้างบริเวณเมืองพอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษจึงเรียกวัตถุนี้ว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ รวมทั้งได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

#### 2.2 กรรมวิธีการผลิต

2.2.1 Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)

2.2.2 Argillaceous Material ได้แก่ ซิลิกา อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของดินคำหรือดินเหนียว (Clay) และดินดาน

2.2.3 Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือศิลาแลง (Laterite)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกออกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

2.2.3.1 กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)

2.2.3.2 กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

## 2.3 องค์ประกอบทางเคมี

2.3.1 เมื่อวัตถุดิบต่างๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอน ดังนี้

2.3.1.1 น้ำระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

2.3.1.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกขับออกจากหินปูนและ ดินสอพอง เหลือไว้เพียง  $\text{CaO}$

2.3.1.3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง  $\text{CaO}$  จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินาและเหล็กออกไซด์ จากดินคำหรือดินเหนียวและดินดาน

2.3.1.4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

2.3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.3.2.1 ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์

2.3.2.2 ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  และยิบซั่มปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [2]

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
$\text{SiO}_2$	17 - 25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3 - 8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.5 - 5.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 - 1.3
$\text{TiO}_2$	0.1 - 0.4
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.1 - 0.2
$\text{SO}_3$	1 - 3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบ ที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียม อลูมินेट (Tricalcium Aluminate)	3 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

## 2.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์

### 2.4.1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์จะประกอบด้วย

2.4.1.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสี่เหลี่ยมมุมฉาก คุณสมบัติของ C<sub>3</sub>S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C<sub>3</sub>S ถูกกระทบ โดยปริมาณไฮดรอกไซด์ ปริมาณ C<sub>3</sub>S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

2.4.1.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C<sub>2</sub>S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC<sub>2</sub>S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC<sub>2</sub>S มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C<sub>3</sub>S ปริมาณ C<sub>2</sub>S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15-35

2.4.1.3 ไตรแคลเซียมอลูมินेट (C<sub>3</sub>A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมสี่เหลี่ยมมุมฉาก C<sub>3</sub>A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก

ประมาณ 850 จุดต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ  $C_3A$  จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดก่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมี  $C_3A$  อยู่ในปริมาณร้อยละ 7-15

2.4.1.4 เตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จุดต่อกรัม กำลังอัดของ  $C_4AF$  ก่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_4AF$  อยู่ในปริมาณร้อยละ 5-10

#### 2.4.2 สารประกอบรองของปูนซีเมนต์ประกอบด้วย

2.4.2.1 ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสเกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

ก. อัลคาไลที่ออกไซด์ อันได้แก่  $Na_2O$  และ  $K_2O$

ข. ปริมาณ  $C_3A$

ค. ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2.4.2.2 Free Lime ( $CaO$ ) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

ก. เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  ได้หมด

ข. ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ซีเมนต์ แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัว เนื่องจาก Lime

2.4.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี  $MgCO_3$  ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้  $MgO$  และ  $CO_2$  แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ  $MgO$  และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ  $CaO$  คือปริมาณจะเพิ่มขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

2.4.2.4 อัลคาไลที่ออกไซด์ ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้น้ำรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลที่มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิด

การขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่ต้องจำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

## 2.5 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เรียกช่วงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัว ถึงแม้ว่ามันจะยังเพิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น” (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น” (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ “จุดแข็งตัวสุดท้าย” (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า “เวลาการก่อตัวสุดท้าย” (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การแข็งตัว” (hardening)

## 2.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.6.1 การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

2.6.1.1 อาศัยสารละลายซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2.6.1.2 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

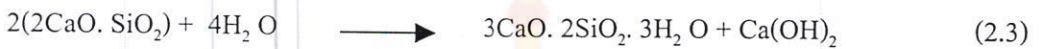
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณา

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลังของซีเมนต์แต่ละประเภท

### 2.6.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต ( $C_2S, C_2S$ )

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  และ Calcium Silicate hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

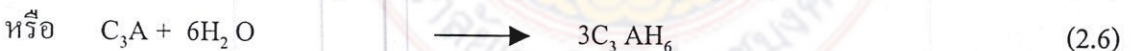
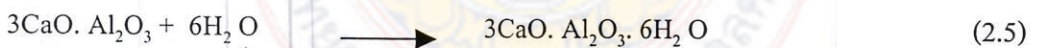


จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

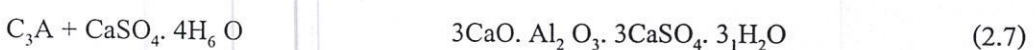
$Ca(OH)_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือ มี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

### 2.6.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมอลูมินेट ( $C_3A$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเกิดขึ้นทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



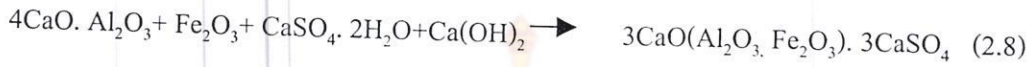
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot H_2O$ ) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดอัดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดขึ้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังสมการ





#### 2.6.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C<sub>4</sub>AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>4</sub>AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C<sub>4</sub>AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ Ca(OH)<sub>2</sub> ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุร้อยละ 80 ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C <sub>3</sub> S	10
C <sub>2</sub> S	100
C <sub>3</sub> S	6
C <sub>4</sub> AF	50

#### 2.7 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด “Dormant Period” อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง ในขณะนั้นซีเมนต์เพสต์ยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง “Dormant period” ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

## 2.8 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนี้ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

2.8.1 อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.8.2 องค์ประกอบของซีเมนต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

2.8.3 ความละเอียดของซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

2.8.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง

2.8.5 อุณหภูมิอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

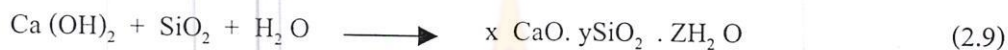
2.8.6 น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

## 2.9 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานตาม ACI 116 R ได้ให้คำจำกัดความไว้ หมายถึงวัสดุที่มีธาตุซิลิกาหรือซิลิกา อลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดสูงและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างอัลคาไลน์ที่อุณหภูมิปกติ ได้สารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่พบ ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าภูเขาไฟ เป็นต้น ปอซโซลานแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) [3]

### 2.9.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำปฏิกิริยารวมตัวกับซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จนทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ตามลำดับดังสมการ



โดยที่ค่า  $x, y, z$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของ C-S-H ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสานส่งผลให้พาสต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานทำให้มีมากขึ้น สำหรับการทดสอบหาค่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น จะหาได้จากอัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานกับมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า "ดัชนีกำลัง" [4]

### บทที่ 3

#### การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบโดยจะแสดงถึงวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการศึกษา ขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่นำมาใช้ทดสอบ

วัสดุหลักที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

3.1.1 ไม้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา จากโรงงานผลิตไม้ยางเพื่อทำเฟอร์นิเจอร์ของบริษัท แอสแอนด์ พี เฟรสติง ต.ทุ่งคำเสา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15 - 2532 [ 5 ]

3.1.3 ทรายหยาบสำหรับผสมคอนกรีต ใช้ทรายจากแม่น้ำที่เป็นน้ำจืดในพื้นที่ จ.สงขลา โดยร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 เป็นไปตาม ASTM C 33 - 97 [6]

3.1.4 น้ำใช้น้ำประปา

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดส่วนละเอียดของมวลรวมละเอียด

3.2.2 เครื่องร่อนตะแกรงสำหรับมวลรวมละเอียด (ดูรูปที่ 3.1)

3.2.3 เครื่องมือหาค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

3.2.4 เตอบไฟฟ้า (ดูรูปที่ 3.2)

3.2.5 เครื่องผสมซีเมนต์ (ดูรูปที่ 3.3)

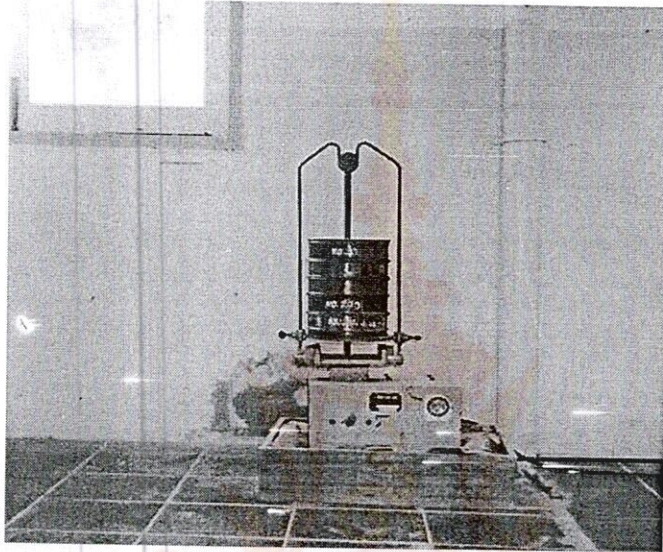
3.2.6 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ละเอียด 0.01 g

3.2.7 อุปกรณ์การไหลผ่านของมอร์ตาร์ (ดูรูปที่ 3.4)

3.2.8 การหล่อแท่งตัวอย่าง ขนาด 50x50x50 มม.

3.2.9 เครื่องทดสอบกำลังอัด (ดูรูปที่ 3.5)

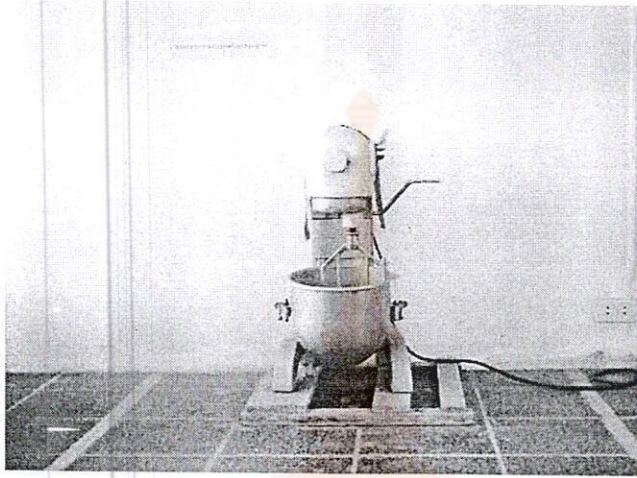
- 3.2.10 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope)
- 3.2.11 เครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer)
- 3.2.12 เครื่องวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนซ์ของรังสีเอกซ์ (XRF)



รูปที่ 3.1 เครื่องร้อนตะแกรงสำหรับมวลรวมละเอียด



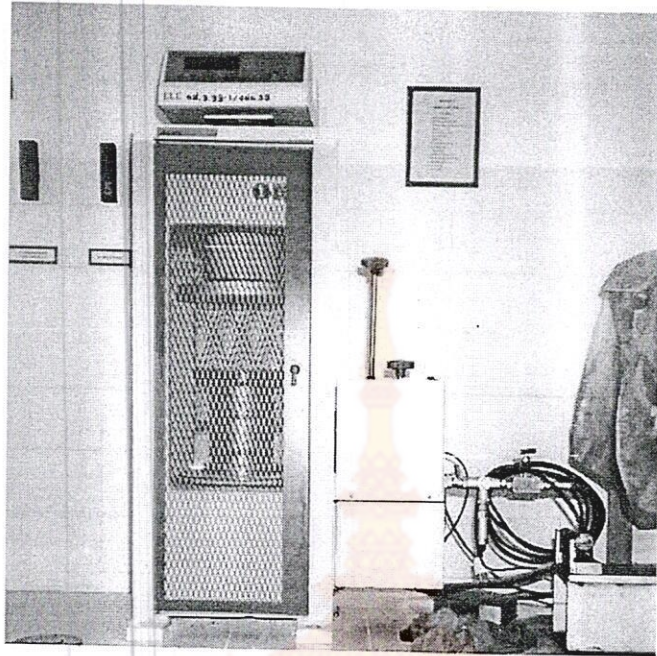
รูปที่ 3.2 เตาอบไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมซีเมนต์



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การไหลแผ่ของมอร์ตาร์



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด

047050

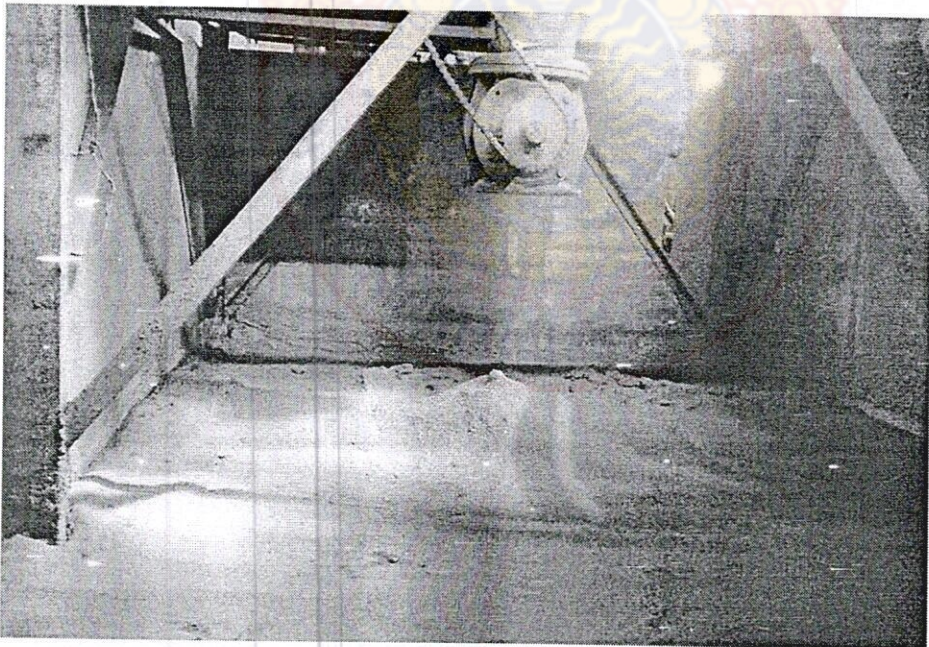
๑.  
๖๒4-189  
๑/๙๓  
๒54๖



รูปที่ 3.6 แสดงที่ตั้งบริษัท แอส แอนด์ พี เฟรสดิ่ง

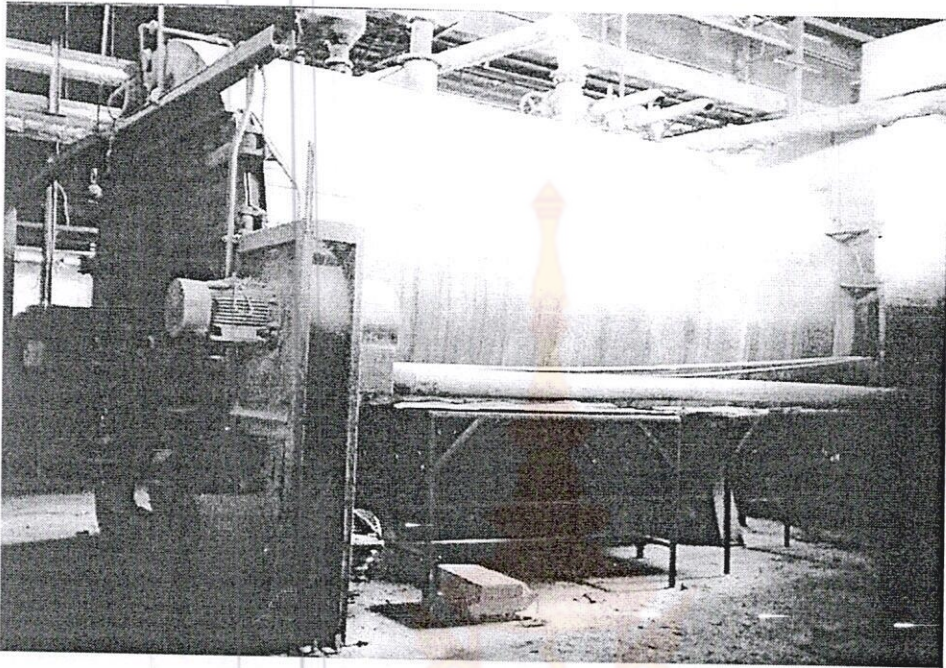


รูปที่ 3.7 กองขี้เถ้าขี้เถ้าไม้อย่างพารา



รูปที่ 3.8 เถ้าขี้เถ้าไม้อย่างพาราที่ปล่อยลงจากเตาเผา





รูปที่ 3.9 รูปเตาเผาไฟฟ้าสำหรับเผาชี้เลื่อยไม้ยางพารา

### 3.3 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาค่าลึงอัดของมอร์ตาร์

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ส่วนคละของมวลรวมละเอียด ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100

การวิเคราะห์ส่วนคละของทราย จะใช้ตะแกรง (Sieve) เป็นตัวหลักปกติจะต้องมีการควบคุมขนาดคละให้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการที่สุด ถ้าหากมีส่วนคละที่เหมาะสม คือ มีขนาดที่แตกต่างกันอย่างพอเหมาะ ทำให้ควบคุมคุณภาพคอนกรีตได้ตามต้องการ

ตะแกรง (Sieve) ที่ใช้มีขนาดมาตรฐานทั่วไป คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ทำด้วยทองเหลือง มีหมายเลขขนาดตะแกรงเป็นเบอร์ติดอยู่ข้างตะแกรง

##### 3.3.1.1 วิธีทดสอบ

การวิเคราะห์หาส่วนคละของทรายทำได้โดยการร่อนตัวอย่างทรายที่เป็นตัวแทนของทั้งกอง ผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว (20 ซม.) ไม่ควรใช้ตะแกรงขนาดใหญ่กว่านี้ร่อนทราย การร่อนอาจใช้เครื่องร่อนหรือจะร่อนด้วยมือก็ได้

(ก) ก่อนนำไปร่อน จะต้องตากทรายให้แห้ง

(ข) เททรายที่ต้องการร่อนลงบนตะแกรงที่ซ้อนกัน จากขนาดตะแกรงเบอร์ 16, เบอร์ 100 และถาดรองแล้วนำไปร่อนบนเครื่องร่อน ให้ร่อนจนน้ำหนักทรายที่ผ่านตะแกรงใดๆ ในช่วงการร่อน 1 นาที มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ปกติแล้วจะต้องร่อนนานประมาณ 10 นาที

(ค) ใช้แปรงลวดทำความสะอาดตะแกรงเบอร์ 16 แล้วใช้แปรงอ่อนทำความสะอาดตะแกรงเบอร์ 100 ควรหมั่นตรวจสภาพตะแกรงบ่อยๆ เพื่อป้องกันการใช้ตะแกรงขาดหรือหย่อนยาน

### 3.3.2. การดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (Absorption of Fine Aggregate)

#### 3.3.2.1 วิธีทดสอบ

(ก) แบ่งตัวอย่างออกมาจากกองมา 1200 ถึง 1500 กรัม โดยใช้วิธีแบ่งสี่ (Quatering) ให้ได้ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของทรายในกอง แล้วเทตัวอย่างทรายลงในถาด แล้วเติมน้ำจนท่วมทราย ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ระบายน้ำทิ้งแล้วตั้งถาดทรายบนเตาเพื่อเร่งให้แห้งเร็วขึ้นระหว่างนี้ต้องระวังให้เสียน้ำส่วนละเอียดไปมากนักและต้องไม่ให้ทรายแห้งจนเกินไป เมื่อความชื้นลดลงพอประมาณแล้วให้เอาผ้ามาซับความชื้นออกอีก ในช่วงนี้อาจใช้พัดลมหรือเครื่องเป่าลมร้อนเป่าเหนือบริเวณทรายที่แผ่กระจายอยู่ก็ได้ จะช่วยให้ทรายแห้งเร็วขึ้นควรกวนตัวอย่างทรายตลอดเวลาเพื่อให้ทรายแห้งได้จนทั่ว จนกระทั่งทรายทั้งก้อนตัวอย่างอยู่ในสภาพ Saturated Surface Dry (S.S.D)

(ข) จุดที่ทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้งมีวิธีพิจารณาดังต่อไปนี้

วิธีใช้แบบรูดทราย วิธีนี้เป็นที่นิยมทดสอบกันมากที่สุดมีวิธีการทดสอบโดยกรอกตัวอย่างทรายลงในแบบโลหะรูดทรายหั่วตัดจนเต็มกรวย กระทุ้งเบาๆ ด้วยเหล็กกระทุ้ง (Tammer) โดยถือเหล็กกระทุ้งให้สูงจากตัวอย่างดินประมาณ 5 มม. ปล่อยให้เหล็กกระทุ้งเองจำนวน 25 ครั้ง เมื่อกระทุ้งครบ 25 ครั้งแล้ว ให้ยกเอาแบบโลหะออกในแนวตั้ง ถ้ายังมีความชื้นอิสระอยู่ทรายจะรักษารูปกรวยไว้ให้ใช้เครื่องเป่าลมร้อน (Dryer) เป่าต่อไปให้ทั่วกองทราย ซึ่งจะต้องนำทรายที่ทดสอบในกรวยนำมารวมกันในกองทั้งหมดก่อนแล้วจึงเป่าลมร้อนลงไป แล้วจึงทำการทดสอบแบบกรวยต่อไป โดยทดสอบเป็นระยะๆ จนเมื่อยกแบบออกแล้วทรายจะไหลแผ่ออกเป็นบริเวณรอบๆ กองกรวยทราย ซึ่งเป็นลักษณะที่ทรายจะกองเฉพาะรอบๆ ผิววนอก แล้วไหลมากองที่ฐานไม้ใช้กลายมาแบนราบทั้งกอง ที่จุดนี้คือจุดที่ทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง [7]

(ค) นำทรายที่อยู่ในสภาพอัดตัวผิวแห้งไปชั่งน้ำหนัก นำไปเข้าเตาอบทิ้งไว้ 24 ชม. นำทรายที่ผ่านการอบมาชั่งน้ำหนัก นำค่ามาคำนวณตามสมการ

$$\text{การดูดซึมน้ำ (percent Absorption)} = (B-A) \times 100/A \quad (3.1)$$

A = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง, กรัม

B = น้ำหนักตัวอย่างที่จุ่มอัดตัวผิวแห้ง, กรัม

### 3.3.3 การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์และการเทลงแบบหล่อ

#### 3.3.3.1 วิธีการทดสอบ

หลังจากทำการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ตามมาตรฐานแล้ว ให้ทำการทดสอบการไหลแผ่ตามวิธีการดังนี้

(ก) ทำความสะอาด Flow Table และ Flow Mold ตามมาตรฐาน ASTM C - 230 [8] ให้เรียบร้อย ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ Flow Mold ทางด้านฐานไว้ให้ละเอียดถึง 0.01 มม. วาง Flow Mold ไว้ตรงกลางในวงกลมบนแผ่นของ Flow Table

(ข) ไล่ซีเมนต์มอร์ตาร์ลงใน Flow Mold เป็น 2 ชั้น ชั้นแรกสูงประมาณ 25 มม. แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง (Tampor) 20 ครั้ง ให้ซีเมนต์มอร์ตาร์แผ่เต็มแบบ แล้วไล่อีกชั้นหนึ่งจนล้น กระทุ้งอีก 20 ครั้งแล้วปาดซีเมนต์มอร์ตาร์ให้เรียบเสมอบนของ Flow Mold ขึ้นตรงๆ ซึ่งก็จะเหลือแต่กองของซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่บนแผ่น Flow Table กำหนดให้ใช้เวลาในข้อ 2 นี้ทั้งหมด 60 วินาทีหลังการผสม

(ค) หมุนให้แทนของ Flow Table สูง  $\frac{1}{2}$  นิ้ว (1.27 ซม.) กระแทก 25 ครั้ง ใน 15 วินาทีเสร็จแล้ว วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไหลแผ่อยู่บนแทนจำนวน 4 ค่าตามแนวเส้นเฉลี่ยออกมาเป็นค่าเดียว

(ง) หล่อซีเมนต์มอร์ตาร์ลงบนก้อนทดสอบ จะทำให้เสร็จใน 2 - 2  $\frac{1}{2}$  นาที หลังจากผสมซีเมนต์มอร์ตาร์เสร็จแล้วไล่ซีเมนต์ลงไปแบบหล่อ เป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มม.\* โดยไล่ลงในช่องหล่อก่อนทดสอบก่อน

(จ) กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง (Tampor) 32 ครั้งใน 10 วินาที โดยให้กระทุ้งเป็น 4 รอบ โดยแต่ละรอบให้ตั้งฉากกับรอบอื่นๆ น้ำหนักในการกระทุ้งให้แรงพอที่จะให้มอร์ตาร์แผ่ไปทั่วแบบหล่อเท่านั้น เมื่อกระทุ้งครบ 4 รอบแล้ว จึงไปกระทุ้งช่องต่อไป

(ฉ) เมื่อกระทุ้งครบทุกช่องแล้วให้ใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เหลือลงในแบบหล่อเล็กน้อย

(ช) ใช้เกรียงปาดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่สันติดขอบแบบลงมาในแบบ แล้วปาดผิวให้เรียบรื้อย เพื่อยกเกรียงด้านในเล็กน้อยไปทางขวาของขอบแบบหล่อแต่ละช่องเพียงครั้งเดียว

(ซ) เพื่อให้ผิวหน้าแบบหล่อเรียบยิ่งขึ้น ให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ อีกหนึ่งครั้งตลอดตามยาวของแบบหล่อ โดยเพื่อยกด้านในเล็กน้อยตัดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบเสมอบนของแบบหล่อ โดยใช้ขอบด้านตรงของเกรียงวางเกือบตั้งฉากกับแบบหล่อแล้วขยับเกรียงไป - มาตลอดความยาวของแบบหล่อ

(ฅ) หลังจากหล่อเสร็จเรียบรื้อยแล้วให้เก็บตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบหล่อไว้ในห้องบ่มชื้น โดยผิวหน้าให้สัมผัสกับความชื้นแต่ไม่ให้ถูกหยดน้ำเป็นเวลา 20 - 24 ชม.

### 3.3.4 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

#### 3.3.4.1 วิธีทดสอบ

(ก) วัดขนาดของหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อนไว้เวลานำก้อนตัวอย่างไปทดสอบห้ามใช้ด้านข้างที่มีผิวหน้าเรียบทั้งสองหน้ารับแรงอัด ถ้าหน้าบนและล่างของก้อนตัวอย่างไม่เรียบ ให้ฝนให้เรียบและขนานกัน

(ข) นำก้อนทดสอบเข้าเครื่องทดสอบ ให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของเส้นทดสอบและผิวก้อนตัวอย่างสัมผัสกับเป็นกด เดินเครื่องทดสอบในอัตราที่เหมาะสมสม่ำเสมอ จนกระทั่งก้อนทดสอบแตก โดยใช้เวลาทดสอบประมาณ 5 - 30 วินาทีต่อตัวอย่าง (ห้ามปรับกลไกควบคุมเครื่องทดสอบในขณะที่ก้อนทดสอบตัวอย่างถูกกดอย่างรวดเร็วก่อนที่จะแตก)

## 3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพารา

3.4.1 วิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพารา โดยใช้เครื่อง Laser particle Size Analyzer (COULTER LS 230) ซึ่งขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่ได้จะมีหน่วยเป็นไมครอน

3.4.2 ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าซีเมนต์ไม่ยางพาราทุกขนาด ความละเอียดโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer โดยองค์ประกอบที่ได้จะเป็นสารประกอบออกไซด์

3.4.3 การถ่ายภาพขยายกำลังสูง เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของเก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM : JEOL JSM - 5800LV)

### 3.5 วิธีการศึกษา

3.5.1 การวิจัยครั้งนี้ใช้สัญลักษณ์ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
RO	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์
R10C	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R10N	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R20C	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R20N	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R30C	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R30N	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R40C	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R40N	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R50C	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
R50N	มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
W/C	อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์
W/(C+R)	อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ + ไข่ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

3.5.2 ไข่ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่นำมาทดสอบเป็นได้จากโรงงานทำเฟอร์นิเจอร์ จากบริษัท แอสแอนด์ พี เฟรสคิง จำกัด ต.ทุ่งตำเสา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เป็นไข่ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ได้ทำการคัดแยกขนาดมีลักษณะเป็นไข่ละเอียดสีเทา

3.5.3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เริ่มจาก W/C = 0.5 นำมาหาค่าอัตราการไหลของมอร์ตาร์ โดยเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมไข่ขี้เลื่อยไม้ยางพารา เริ่มจาก W/(C+R) = 0.5 นำมาหาค่าอัตราการไหลของมอร์ตาร์โดยเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำจนอัตราการไหลอยู่ที่  $110 \pm 5$

จากนั้นจะนำอัตราส่วนที่ผสมได้ มาใช้ในการกำหนดอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ ซึ่งใช้ทราย i : 2.75 มาผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่นำไข่ขี้เลื่อยไม้ยางพารามาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสม ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 2 กรณี

Mix Symbol	Mix Proportion (by Weight)					Flow (%)
	Type of Cement I	Type of SA		W/(C+R)	Sand	
		SAC	SAN			
R0	1.00	-	-	0.55	2.75	113
R10C	0.90	0.10	-	0.60	2.75	110
R10N	0.90	-	0.10	0.60	2.75	110
R20C	0.80	0.20	-	0.61	2.75	108
R20N	0.80	-	0.20	0.61	2.75	108
R30C	0.70	0.30	-	0.63	2.75	105
R30N	0.70	-	0.30	0.63	2.75	105
R40C	0.60	0.40	-	0.64	2.75	109

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 2 กรณี (ต่อ)

Mix Symbol	Mix Proportion (by Weight)					Flow (%)
	Type of Cement I	Type of SA		W/(C+R)	Sand	
		SAC	SAN			
R40N	0.60	-	0.40	0.64	2.75	109
R50C	0.50	0.50	-	0.64	2.75	109
R50N	0.50	-	0.50	0.64	2.75	109



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

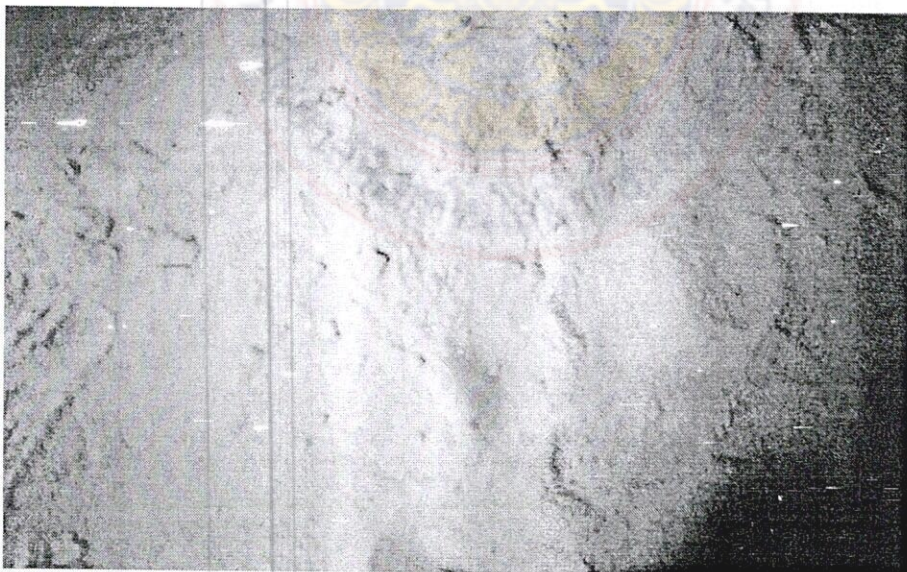
บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบ และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าซีลี้อยไม้ยางพารา ได้แก่ ความละเอียด การกระจายตัวของอนุภาคพวยขยายกำลังสูง, ค่าการไหลของมอร์ตาร์และผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในน้ำประปาที่ส่วนผสมและอายุต่าง ๆ

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าซีลี้อยไม้ยางพาราที่ใช้ทดสอบ

##### 4.1.1 ลักษณะรูปร่างของเถ้าซีลี้อยไม้ยางพารา และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

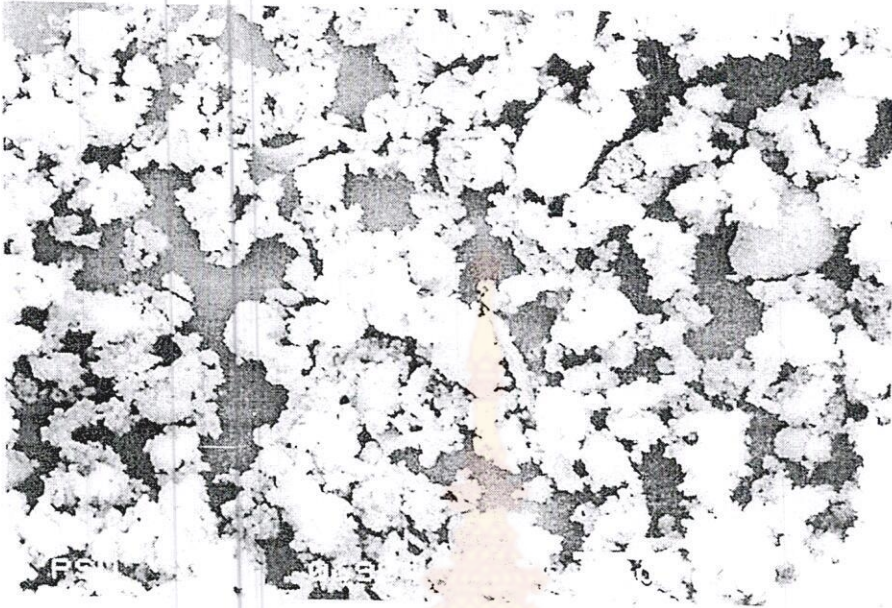
ลักษณะของเถ้าซีลี้อยไม้ยางพารา มีอนุภาคหยาบกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคของปูนซีเมนต์จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.3 พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระ สำหรับเถ้าซีลี้อยไม้ยางพารามีลักษณะเป็นรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดแตกต่างกัน เป็นลักษณะคล้ายวัตถุที่มีความพรุน

รูปร่างของเถ้าซีลี้อยไม้ยางพาราและปูนซีเมนต์ เมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM : JEOL JSM - S800LV)



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าซีลี้อยไม้ยางพารา





รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ Type 1 ขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคเก้าอี้เลื่อยไม้ยางพาราไม่แยกขนาด ขยาย 350 เท่า

#### 4.1.2 การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราและปูนซีเมนต์

ผลการสุ่มทดสอบตัวอย่างเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราชนิดเดียวกันจำนวน 5 ตัวอย่าง พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราอยู่ในเกณฑ์สูง กล่าวคือ ขนาดของอนุภาคแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยขนาดเล็ที่สุดของอนุภาคเท่ากับ 0.375 ไมครอน และมีขนาดโตสุดเท่ากับ 716.80 ไมครอน ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.91 ไมครอน ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 21.3 ไมครอน ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราไม่สม่ำเสมอ

#### 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าไครแคลเซียมออกไซด์ ( $C_3A$ ) เท่ากับ 9.22 สำหรับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 64.97 ส่วนเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารามีแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 54.45 จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ของปูนซีเมนต์มีปริมาณสูงกว่าเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพารา ได้สรุปว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์เทียบเท่า ( $CaO - Equivalent$ ) ในวัสดุประสานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลาน กล่าวคือ มอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานในอัตราส่วนแทนที่เท่ากัน กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอชโซลานจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ของวัสดุปอชโซลานนั้น โดยที่วัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าจะให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงด้วย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา

Chemical Composite		Cement I	Rubber sawdust ash (SA)
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	(%)	20.80	2.33
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	5.50	0.41
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	3.16	1.12
Calcium Oxide, CaO	(%)	64.97	54.45
Magnesium Oxide, MgO	(%)	1.06	15.19
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	(%)	0.08	1.92
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	(%)	0.55	18.85
Sulfur Trioxide, SO <sub>2</sub>	(%)	2.96	2.42
Loss On Ignition, LOI	(%)	2.89	-
Tricalcium Aluminate, C <sub>2</sub> A	(%)	9.22	-

ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมี โดยรวมจะเห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในส่วนประกอบ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งสารประกอบทั้งสองเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตในปฏิกิริยาปอซโซลาน

#### 4.3 ความสามารถในการไหลของมอร์ต้าร์

ความสามารถในการไหลของมอร์ต้าร์ แยกพิจารณาออกเป็น 3 กรณี คือ มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ที่ไม่มีวัสดุประสาน, มอร์ต้าร์ของวัสดุประสานระหว่างเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผสมน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์ และมอร์ต้าร์ของวัสดุประสานระหว่างเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผสมน้ำยากันความชื้น

4.3.1 ความสามารถในการไหลของมอร์ต้าร์ของวัสดุประสานระหว่างเถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผสมน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์

โดยใช้อัตราของ R10C, ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหลของมอร์ตาร์มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 110 พบว่าค่าการไหลของตัวอย่าง R20C ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.61 มีค่าการไหล 108 ค่าการไหลของตัวอย่าง R30C ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.63 มีค่าการไหล 105 ค่าการไหลของตัวอย่าง R40C ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 มีค่าการไหล 109 ค่าการไหลของตัวอย่าง R50C เท่ากับ R40C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการไหลต่ำลง และค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผสมน้ำยากันความชื้นอัตราส่วนผสมน้อยกว่าค่าการไหลของมอร์ตาร์มาตรฐานค่อนข้างมาก ซึ่งใช้ปริมาณน้ำที่เท่ากันในส่วนผสม

4.3.2 ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ของวัสดุประสานระหว่างเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผสมน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์

โดยใช้อัตราของ R10N ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหลมีค่าเท่ากับ 110 ค่าการไหลของตัวอย่าง R20N ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.61 มีค่าการไหล 108 ค่าการไหลของตัวอย่าง R30N ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.63 มีค่าการไหล 105 ค่าการไหลของตัวอย่าง R40N ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 มีค่าการไหล 109 ค่าการไหลของตัวอย่าง R50N เท่ากับ R40N

จากค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผสมน้ำยากันความชื้น การไหลของมอร์ตาร์ทั้งสองลักษณะเหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำยากันความชื้นที่มีอยู่ในซีเมนต์ไม่เพียงพอไม่มีผลต่อค่าการไหลของมอร์ตาร์

#### 4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ และการทดลองได้แยกการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ใช้วัสดุประสาน, มอร์ตาร์ของวัสดุประสานผสมเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผสมน้ำยากันความชื้น และมอร์ตาร์ของวัสดุประสานผสมเถ้าซีเมนต์ไม่เพียงพอที่ผสมน้ำยากันความชื้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ลอยไม้ยางพารา ที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้นและค่าการไหล

Specimen	Compressive Strength (ksc)					Flow
	3 - day	7 - day	14 - day	28 - day	60 - day	
R0	170.98	229.29	254.98	258.85	286.24	113
R10C	124.36	165.68	194.0	209.72	245.98	110
R20C	84.95	86.17	120.29	156.58	169.22	108
R30C	64.56	69.45	105.56	119.20	123.82	105
R40C	73.80	76.49	83.86	97.11	104.52	109
R50C	47.84	62.66	65.85	89.72	95.82	109

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าซีเมนต์ลอยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละของกำลังของมอร์ต้าร์มาตรฐาน

Specimen	Percentage Compressive Strength (%)				
	3 - day	7 - day	14 - day	28 - day	60 - day
R0	100	100	100	100	100
R10C	72.73	72.26	76.08	81.01	85.93
R20C	49.69	37.58	47.18	60.49	59.12
R30C	37.76	30.29	41.40	46.05	43.26
R40C	43.16	33.36	32.89	38.09	36.51
R50C	27.98	27.32	25.83	34.66	33.48

#### 4.4.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ลอยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน (R0) และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์ลอยไม้ยางพาราที่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้นกับปูนซีเมนต์ที่อายุต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงกำลังของมอร์ต้าร์ของวัสดุผสมเมื่อคิดเป็นร้อยละของกำลังอัดมาตรฐาน

พิจารณากำลั่งอัดของมอร์ตาร์ R10C ซึ่งมีเถ้าซีลี้อยู่ที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น ร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 90 ที่อายุ 3 วันมีกำลั่งอัดเท่ากับ 124.36 กก./ชม<sup>2</sup>. คิดเป็น ร้อยละ 72.73 ของกำลั่งอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน และเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น การพัฒนากำลั่งอัดก็ เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ กล่าวคือเมื่ออายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน มีกำลั่งอัดเท่ากับ 165.68, 194.00, 209.72 และ 245.98 กก./ชม<sup>2</sup>. ถ้าคิดเป็นร้อยละของกำลั่งอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานกำลั่งจะลดลง ที่ 7 วัน และหลังจาก 7 วันขึ้นไปร้อยละกำลั่งอัดก็พัฒนาเพิ่มขึ้น นั่นคือจะมีการพัฒนากำลั่งอัด เป็นร้อยละของมอร์ตาร์มาตรฐานเท่ากับ 72.26, 76.08, 81.02 และ 85.93 ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ียงพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นเป็นร้อยละ 20 (ตัวอย่าง R20C) ยิ่งทำให้กำลั่งของมอร์ตาร์มีค่าต่ำลง และเมื่ออายุตัวอย่างมากขึ้นการพัฒนาของ กำลั่งอัดที่เป็นร้อยละของมาตรฐานในช่วง 3 ถึง 14 วัน ก่อนข้างจะคงที่ และเมื่ออายุ 28 ถึง 60 วัน ร้อยละของกำลั่งอัดก็คงที่อีกครั้ง กล่าวคือเมื่ออายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน จะมีกำลั่งอัด เท่ากับ 84.95, 86.17, 120.29, 156.58 และ 169.22 กก./ชม<sup>2</sup>. คิดเป็นร้อยละของกำลั่งอัดมอร์ตาร์ เท่ากับ 46.68, 37.58, 47.18, 60.49 และ 59.12 ตามลำดับ

เมื่อเถ้าซีลี้อยู่ไม่ียงพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นเพิ่มเป็นร้อยละ 30 (ตัวอย่าง R30C) กำลั่งอัดในช่วงต้นจะมีการเพิ่มกำลั่งอัดน้อย ในช่วงอายุการบ่ม 3 ถึง 7 วัน และเมื่ออายุ มากขึ้นในการพัฒนากำลั่งอัดก็เพิ่มขึ้นคือ เมื่ออายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ได้กำลั่งอัดเท่ากับ 64.56, 69.45, 105.56, 119.20 และ 123.82 กก./ชม<sup>2</sup>. คิดเป็นร้อยละของกำลั่งอัดมอร์ตาร์ มาตรฐานเท่ากับ 37.76, 30.29, 41.40, 46.05 และ 43.26 ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าซีลี้อยู่ไม่ียงพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นเป็นร้อยละ 40 (ตัวอย่าง R40C) กำลั่งอัดลดลงจากมอร์ตาร์มาตรฐานมาก และการพัฒนากำลั่งอัดในช่วง 3 ถึง 28 วันเพิ่มขึ้นน้อยมาก โดยมีกำลั่งอัดในอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วันดังนี้ 73.80, 76.49, 83.86, 87.11 และ 104.52 กก./ชม<sup>2</sup>. เมื่อนำกำลั่งอัดมาเทียบคิดเป็นร้อยละของมอร์ตาร์มาตรฐาน การพัฒนากำลั่งอัดเป็นร้อยละของมอร์ตาร์มาตรฐานเท่ากับ 27.98, 27.33, 25.30, 34.66 และ 33.48 ตามลำดับ

เมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าซีลี้อยู่ไม่ียงพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นอยู่ใน อัตราส่วนร้อยละ 50 กำลั่งอัดของมอร์ตาร์ต่ำลงมาก โดยกำลั่งที่ 3 วันมีค่าน้อยที่สุดและเมื่อเทียบ เป็นร้อยละของกำลั่งอัดในช่วงอายุ 3 ถึง 14 ก่อนข้างคงที่ โดยมีกำลั่งอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังนี้ 47.84, 62.66, 65.85, 89.72 และ 95.82 กก./ชม<sup>2</sup>. และเมื่อคิดเป็นร้อยละ มีค่าดังนี้ 27.98, 27.33, 25.83, 34.66 และ 33.48 ตามลำดับ

พิจารณาระหว่างกำลังอัดมอร์ตาร์ตัวอย่างกับองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างของส่วนผสมเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พบว่า ตัวอย่างซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นกับปูนซีเมนต์ ถึงแม้ว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่มีสารประกอบเหมือนกัน โดยเฉพาะปริมาณ CaO ใกล้เคียงกันมาก ไม่ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.4.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้น แสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนตารางที่ 4.5 แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ไม่ผสมน้ำยากันความชื้นเมื่อคิดเป็นร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขี้เถ้าไม่ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยากันความชื้นและค่าการไหล

Specimen	Compressive Strength (ksc)					Flow
	3 - day	7 - day	14 - day	28 - day	60 - day	
R0	170.98	229.29	254.98	258.85	286.24	113
R10N	122.32	164.46	193.94	209.38	245.60	110
R20N	86.58	88.35	121.10	156.60	169.35	108
R30N	65.72	73.39	104.72	119.06	124.23	105
R40N	74.07	77.59	82.26	96.91	103.70	109
R50N	46.33	62.90	65.96	91.06	95.96	109

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้น เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน

Specimen	Percentage Compressive Strength (%)				
	3 - day	7 - day	14 - day	28 - day	60 - day
R0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
R10N	71.54	71.73	76.06	80.89	85.80
R20N	50.64	38.53	47.49	60.50	66.42
R30N	38.44	32.01	41.07	45.99	43.40
R40N	43.32	33.84	32.26	37.44	36.23
R50N	27.10	27.43	25.87	35.71	33.52

พิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ R10N ซึ่งมีเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราร้อยละ 10 เมื่ออายุ 3 วันมีกำลังอัดเท่ากับ 122.32 กก./ซม<sup>2</sup>. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 71.54 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นการพัฒนา กำลังอัดก็เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ กล่าวคือ เมื่ออายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 164.46, 193.94, 209.38 และ 245.60 กก./ซม<sup>2</sup>. ซึ่งคิดเป็นร้อยละของ กำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานได้เท่ากับ 71.73, 76.06, 80.89 และ 85.80 ตามลำดับ

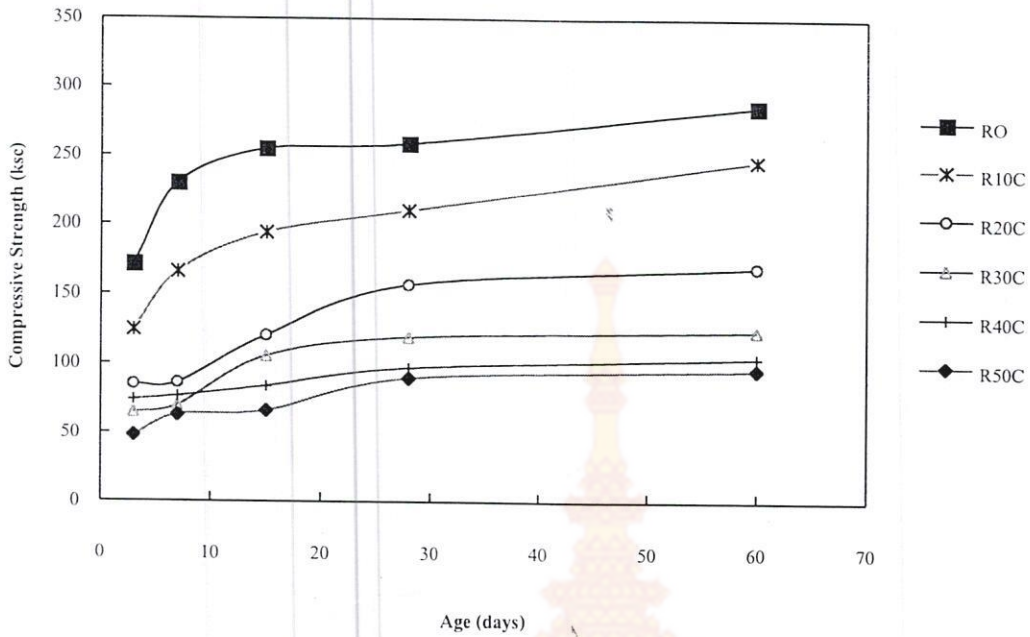
เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้นเป็นร้อยละ 20 กำลังของมอร์ตาร์ต่ำลงกว่าที่ร้อยละ 10 เหมือนกับกรณีของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ผ่านการอบ นํ้ายากันความชื้น แต่เมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นการพัฒนา กำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เช่น ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน จะมีค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เท่ากับ 86.58, 88.35, 121.10, 156.60 และ 169.35 กก./ซม<sup>2</sup>. ซึ่งคิดเป็นร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานเท่ากับ 50.64, 38.53, 47.49, 60.50 และ 59.16 ตามลำดับ

เมื่อปริมาณของเถ้าซีลี้อยู่ไม่ย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบนํ้ายากันความชื้นเป็นร้อยละ 30, 40 และ 50 (ตัวอย่าง R30N, R40N และ R50N) ยิ่งทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าต่ำลงอีก แต่เมื่ออายุตัวอย่างมากขึ้นก็มีการพัฒนา กำลังอัดสูงไปเรื่อย ๆ เช่นดังตัวอย่าง R30N กำลังอัดที่ บ่มอายุ 60 วันมีค่าเท่ากับ 124.23 กก./ซม<sup>2</sup>. และคิดเป็นร้อยละ 43.40, ส่วน R40N ค่ากำลังอัดมี การพัฒนาตามอายุการบ่มจนถึง 60 วันมีค่าเท่ากับ 103.70 กก./ซม<sup>2</sup> คิดเป็นร้อยละ 36.23 และตัวอย่าง R50N เป็นค่ากำลังอัดที่ 3 วันเท่ากับ 46.33 กก./ซม<sup>2</sup>. คิดเป็นร้อยละ 33.52 ตามลำดับ

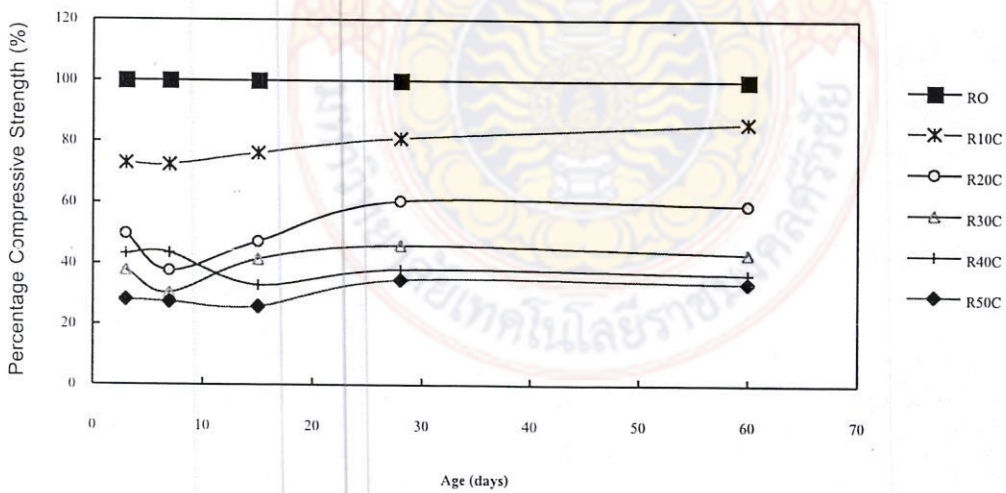


กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าซีลี้อยู่ไม่อย่างพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยักันความชื้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน พบว่ากำลังอัดจะต่ำลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้น ๆ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงตามการเพิ่มของปริมาณเถ้าซีลี้อยู่ หรือกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าซีลี้อยู่ลดลง

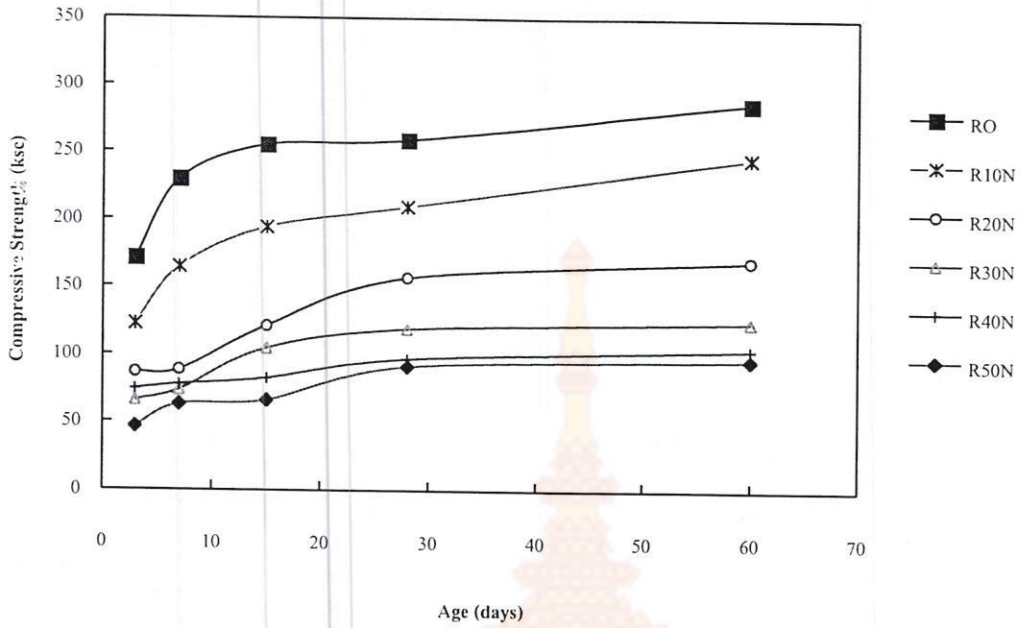




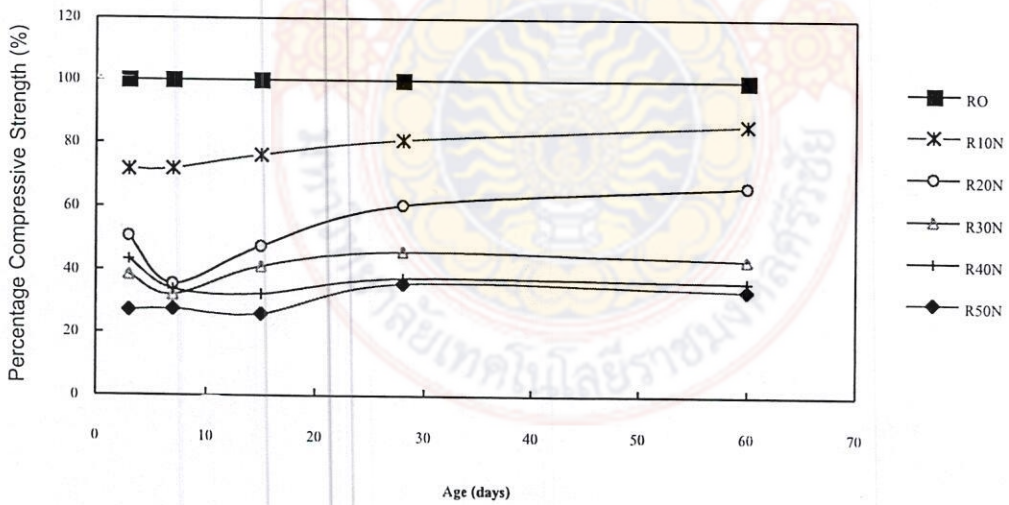
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุมอร์ตาร์ของส่วนผสมระหว่าง  
 ใถ้จีลื้อยไม่ยงพารทึผ่านกรอบน้ำยักันควมซึ้นกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานกับอายุของ  
 มอร์ตาร์ที่ผสมใถ้จีลื้อยไม่ยงพารทึผ่านกรอบน้ำยักันควมซึ้น



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุมอร์ตาร์ของส่วนผสมระหว่าง  
 ใ้ฉี่เลี้ยงไม่ยงพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยักันความชื้นกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานกับ  
 อายุของมอร์ตาร์ที่ผสมใ้ฉี่เลี้ยงไม่ยงพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยักันความชื้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาดูดการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 5.1.1 เถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพารามีแคลเซียมออกไซด์สูงพอๆ กับปูนซีเมนต์มาก
- 5.1.2 รูปร่างของอนุภาคของเถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพารามีลักษณะเหลี่ยมๆ มนๆ ปะปนเป็นจำนวนมาก ในขณะที่อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆ
- 5.1.3 เมื่อใช้เถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน พบว่าเพศค์ของส่วนผสมจะต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น
- 5.1.4 เมื่อใช้เถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับปูนซีเมนต์จะให้ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ต่ำเมื่ออายุต้นๆ แต่เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์จะเพิ่มกำลังอัด การผสมเถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพาราของตัวอย่าง R10C และ R10N ที่อายุการบ่ม 60 วัน มีค่ากำลังอัดสูงถึง 245.98 และ 245.60 กก./ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 85.93 และ 85.80 ตามลำดับ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 มอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปาเป็นระยะเวลา 60 วัน กำลังอัดที่เกิดขึ้นยังไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรทดสอบตัวอย่างมอร์ต้าร์ในระยะยาวต่อไป
- 5.2.2 ควรทำการศึกษาผลกระทบของมอร์ต้าร์ในด้านอื่นนอกเหนือจากกำลังอัด เช่น การกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกหรือสารซัลเฟต
- 5.2.3 ควรศึกษาการนำเถ้าจี้เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ในงานคอนกรีตที่เป็นอิฐบล็อกที่เป็นวัสดุมวลเบา

## เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดสงขลา, 2545, "รายงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา", กองเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, สงขลา, 10 มกราคม 2546.
2. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, "คอนกรีตเทคโนโลยี", 2544. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, หน้า 9 - 18.
3. ดำรงค์ดี ปิติสุข, สมคิด เกื้อกุล และสุพจน์ ช้างสาร. "การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเถ้าลอย", 2545, ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมอุตสาหการโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล สงขลา, หน้า 14.
4. วิรุจ พัฒนาศรีรัตน์, "การกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเสียชุมชนต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ" , 2544, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 14.
5. American Society for Testing and Materials, "ASTM C 618 : standard Specification for Coal fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzdon for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", in 1997 Annual Book of ASTM Standards Vol.0402, Philadelphia, ASTM, pp. 296 - 298.
6. จิรชาติ เจ้าสินเจริญ , 2543, "การศึกษาแร่ผสมเพิ่มของเถ้าลอยและเถ้าจากไม้ยางพารา" โครงการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 73.
7. ดนุพล ตันนโยภาส และ จิรชาติ เจ้าสินเจริญ, 2543, "ปูนผสมเถ้าลอย และเถ้าขี้เถ้า ไม้ยางพารา", โครงการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 491.
8. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 33 : Standard Specification for Concrete Aggregater" in 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 10 - 16.

ภาคผนวก ก.

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของถั่วลิสงที่เลี้ยงไม่ยั้งพารา





F-RES-0031/T ฉบับที่ 3 บังคับใช้ 01/11/45

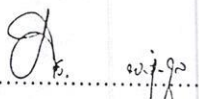
เลขที่ 2124/46 หน้า 1/1

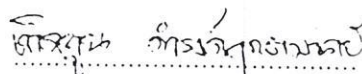
รายงานผลการวิเคราะห์

ชื่อและที่อยู่ผู้ให้บริการ : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ สงขลา  
 เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 3132/46  
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 มกราคม 2546  
 วันที่ทำการวิเคราะห์/ทดสอบ : 17 มกราคม 2546  
 วิธีการวิเคราะห์ : อ้างอิง WI-RES-LPSA-001  
 เครื่องมือวิเคราะห์ : Laser Particle Size Analyzer (COULTER LS230)  
 เทคนิคการวิเคราะห์ : การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์  
 สภาพการวิเคราะห์ : การวัดการกระจายของขนาดอนุภาคตัวอย่างด้วยของเหลว (น้ำ)  
 Run Speed 50% Model Garnet.rfd วัดซ้ำ 5 ครั้ง  
 รายละเอียดตัวอย่าง : ใต้อันเกลือไม่ยางพารา จำนวน : 1 ตัวอย่าง  
 ผลการวิเคราะห์ :

ใต้อันเกลือไม่ยางพารา	ขนาดอนุภาค 0.375 ถึง 716.8 ไมครอน			
	Volume (%)	Mean (µm)	Mode (µm)	S.D. (µm)
การวัดครั้งที่ 1 313246.S01	100	56.55	23.81	91.23
การวัดครั้งที่ 2 313246.S03	100	52.33	23.81	84.43
การวัดครั้งที่ 3 313246.S04	100	52.13	23.81	81.28
การวัดครั้งที่ 4 313246.S05	100	51.00	23.81	76.96
การวัดครั้งที่ 5 313246.S06	100	52.54	23.81	81.98

\* มีเอกสารแนบจำนวน 1 ชุด

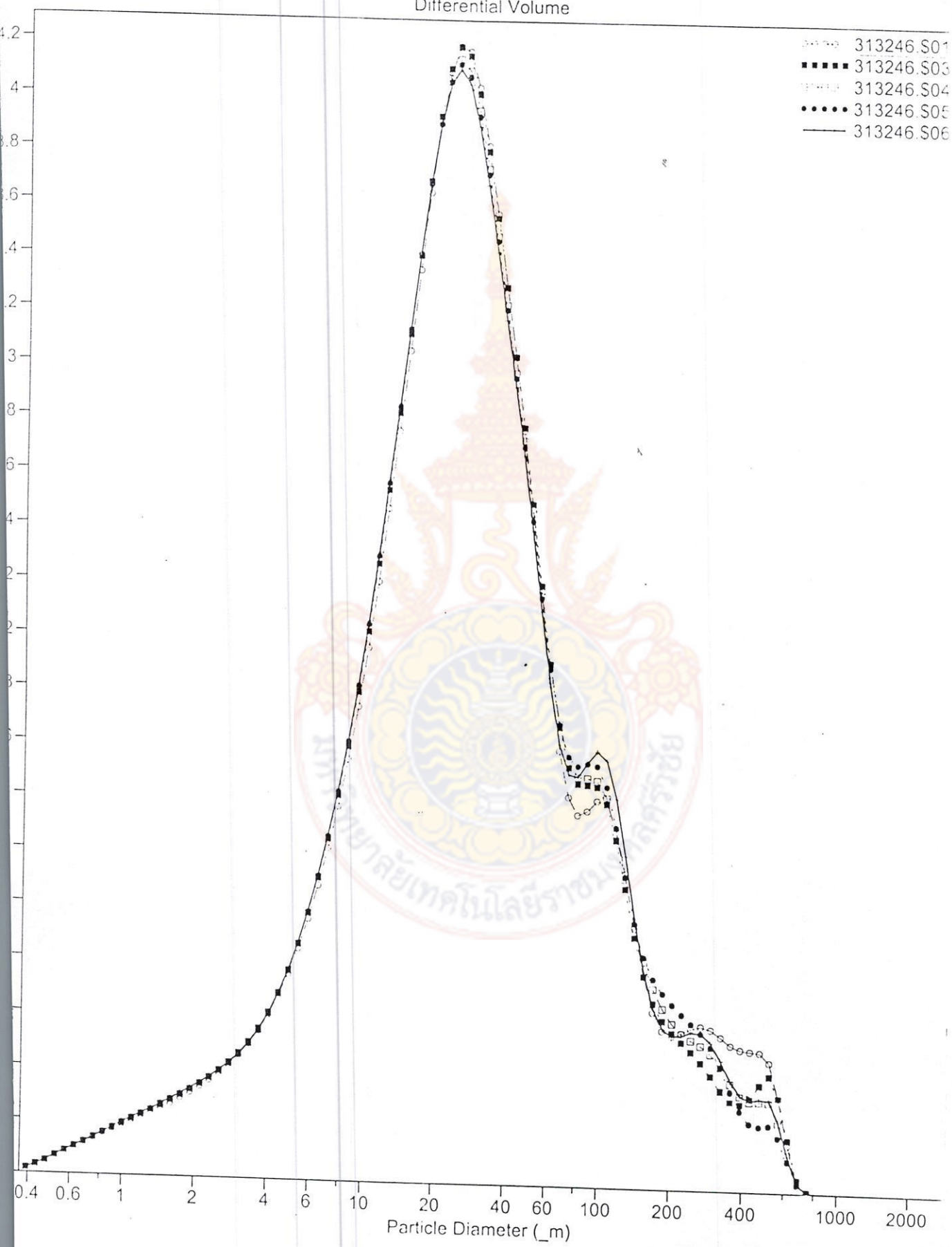
  
 (นายสุธี มั่งคั่งกุล)  
 ผู้วิเคราะห์

  
 (เทิดทูน ดำรงกัฏฐามาศย์)  
 ผู้ตรวจสอบ

หมายเหตุ ผลการวิเคราะห์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ส่งมาวิเคราะห์เท่านั้น ไม่สามารถให้บริการรับรองตัวอย่างประเภทเดียวกันที่มีได้นำมาวิเคราะห์ และข้อมูลดิบที่ได้จากการวิเคราะห์จะจัดเก็บอย่างน้อย 1 เดือน

ห้ามทำสำเนาผลการวิเคราะห์นี้เป็นบางส่วน โดยไม่ได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

### Differential Volume





Volume Statistics (Arithmetic) 313246.\$01

Calculations from 0.375  $\mu$ m to 2,000  $\mu$ m

Volume:	100%		
Mean:	56.55 $\mu$ m	S.D.:	91.23 $\mu$ m
Median:	25.98 $\mu$ m	C.V.:	161%
Mode:	23.81 $\mu$ m		

Volume Statistics (Arithmetic) 313246.\$03

Calculations from 0.375  $\mu$ m to 2,000  $\mu$ m

Volume:	100%		
Mean:	52.33 $\mu$ m	S.D.:	84.43 $\mu$ m
Median:	25.46 $\mu$ m	C.V.:	161%
Mode:	23.81 $\mu$ m		

Volume Statistics (Arithmetic) 313246.\$04

Calculations from 0.375  $\mu$ m to 2,000  $\mu$ m

Volume:	100%		
Mean:	52.13 $\mu$ m	S.D.:	81.28 $\mu$ m
Median:	25.48 $\mu$ m	C.V.:	156%
Mode:	23.81 $\mu$ m		

Volume Statistics (Arithmetic) 313246.\$05

Calculations from 0.375  $\mu$ m to 2,000  $\mu$ m

Volume:	100%		
Mean:	51.00 $\mu$ m	S.D.:	76.96 $\mu$ m
Median:	25.44 $\mu$ m	C.V.:	151%
Mode:	23.81 $\mu$ m		

Volume Statistics (Arithmetic) 313246.\$06

Calculations from 0.375  $\mu$ m to 2,000  $\mu$ m

Volume:	100%		
Mean:	52.54 $\mu$ m	S.D.:	81.98 $\mu$ m
Median:	25.34 $\mu$ m	C.V.:	156%
Mode:	23.81 $\mu$ m		

Channel Number	Particle Diameter (Lower) _m	313246.\$01 Diff. Volume %	313246.\$03 Diff. Volume %	313246.\$04 Diff. Volume %	313246.\$05 Diff. Volume %	313246.\$06 Diff. Volume %
46	24.95	4.17	4.15	4.10	4.07	4.05
47	27.39	4.04	4.02	3.96	3.93	3.90
48	30.07	3.82	3.80	3.74	3.71	3.67
49	33.01	3.57	3.55	3.48	3.46	3.42
50	36.24	3.30	3.29	3.23	3.21	3.17
51	39.78	3.04	3.04	2.98	2.96	2.93
52	43.67	2.77	2.78	2.73	2.71	2.68
53	47.94	2.48	2.50	2.47	2.44	2.40
54	52.62	2.17	2.20	2.19	2.16	2.11
55	57.77	1.86	1.92	1.92	1.90	1.83
56	63.41	1.60	1.68	1.70	1.69	1.62
57	69.61	1.43	1.54	1.56	1.58	1.51
58	76.42	1.36	1.48	1.50	1.54	1.50
59	83.89	1.38	1.47	1.50	1.55	1.55
60	92.09	1.42	1.47	1.49	1.54	1.60
61	101.1	1.41	1.41	1.43	1.47	1.56
62	111.0	1.32	1.27	1.30	1.32	1.43
63	121.8	1.15	1.09	1.13	1.13	1.21
64	133.7	0.95	0.91	0.96	0.96	0.98
65	146.8	0.77	0.77	0.83	0.84	0.79
66	161.2	0.64	0.67	0.73	0.76	0.66
67	176.9	0.58	0.61	0.66	0.71	0.59
68	194.2	0.56	0.57	0.60	0.67	0.56
69	213.2	0.57	0.54	0.57	0.64	0.56
70	234.0	0.59	0.50	0.55	0.61	0.57
71	256.9	0.60	0.47	0.53	0.57	0.57
72	282.1	0.59	0.42	0.50	0.52	0.54
73	309.6	0.56	0.37	0.45	0.45	0.48
74	339.9	0.53	0.32	0.39	0.36	0.40
75	373.1	0.52	0.31	0.35	0.29	0.35
76	409.6	0.51	0.34	0.33	0.24	0.33
77	449.7	0.51	0.39	0.33	0.24	0.34
78	493.6	0.47	0.42	0.32	0.24	0.33
79	541.9	0.34	0.34	0.25	0.20	0.25
80	594.8	0.17	0.19	0.13	0.11	0.13
81	653.0	0.040	0.046	0.033	0.028	0.031
82	716.8	0.0041	0.0050	0.0035	0.0031	0.0032
83	786.9	0	0	0	0	0
84	863.9	0	0	0	0	0
85	948.3	0	0	0	0	0
86	1,041	0	0	0	0	0
87	1,143	0	0	0	0	0
88	1,255	0	0	0	0	0
89	1,377	0	0	0	0	0
90	1,512	0	0	0	0	0
91	1,660	0	0	0	0	0
92	1,822	0	0	0	0	0
	2,000					

Volume %	313246.\$01 Particle Diameter _m <	313246.\$03 Particle Diameter _m <	313246.\$04 Particle Diameter _m <	313246.\$05 Particle Diameter _m <	313246.\$06 Particle Diameter _m <
10	6.351	6.220	6.230	6.216	6.181
25	13.79	13.49	13.46	13.42	13.34
50	25.98	25.46	25.48	25.44	25.34
75	51.81	50.24	51.12	51.31	51.48
90	128.5	115.8	118.8	118.3	119.5

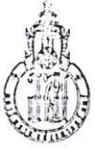
  

Channel Number	313246.\$01 Particle Diameter (Lower) _m	313246.\$03 Diff. Volume %	313246.\$04 Diff. Volume %	313246.\$05 Diff. Volume %	313246.\$06 Diff. Volume %
1	0.375	0.017	0.018	0.018	0.018
2	0.412	0.030	0.031	0.031	0.031
3	0.452	0.045	0.046	0.046	0.046
4	0.496	0.065	0.066	0.067	0.067
5	0.545	0.083	0.084	0.085	0.085
6	0.598	0.099	0.10	0.10	0.10
7	0.656	0.12	0.12	0.12	0.12
8	0.721	0.13	0.14	0.14	0.14
9	0.791	0.15	0.15	0.16	0.16
10	0.868	0.17	0.17	0.17	0.17
11	0.953	0.18	0.19	0.19	0.19
12	1.047	0.20	0.21	0.21	0.21
13	1.149	0.22	0.22	0.23	0.23
14	1.261	0.23	0.24	0.24	0.25
15	1.384	0.25	0.26	0.26	0.27
16	1.520	0.27	0.28	0.28	0.29
17	1.668	0.29	0.30	0.30	0.31
18	1.832	0.31	0.32	0.32	0.33
19	2.011	0.33	0.34	0.34	0.35
20	2.207	0.36	0.37	0.37	0.37
21	2.423	0.38	0.39	0.39	0.39
22	2.660	0.41	0.42	0.42	0.42
23	2.920	0.45	0.46	0.45	0.46
24	3.205	0.49	0.50	0.50	0.50
25	3.519	0.54	0.55	0.55	0.55
26	3.863	0.60	0.61	0.61	0.61
27	4.240	0.67	0.68	0.68	0.68
28	4.655	0.75	0.77	0.76	0.77
29	5.110	0.85	0.86	0.86	0.87
30	5.610	0.95	0.98	0.98	0.99
31	6.158	1.08	1.11	1.11	1.12
32	6.760	1.22	1.25	1.26	1.27
33	7.421	1.37	1.41	1.42	1.44
34	8.147	1.55	1.60	1.61	1.63
35	8.943	1.74	1.80	1.81	1.83
36	9.818	1.96	2.02	2.04	2.06
37	10.78	2.21	2.27	2.29	2.31
38	11.83	2.47	2.54	2.55	2.58
39	12.99	2.76	2.82	2.84	2.86
40	14.26	3.05	3.12	3.12	3.14
41	15.65	3.35	3.41	3.41	3.42
42	17.18	3.64	3.69	3.68	3.68
43	18.86	3.90	3.93	3.91	3.90
44	20.71	4.09	4.11	4.07	4.05
45	22.73	4.19	4.19	4.14	4.10

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเต้าจี้เลื่อยไม้ยางพารา





F-RES-003I/T ฉบับที่ 3 บังคับใช้ 01/11/45

เลขที่ 2138/46 หน้า 1 / 1

รายงานผลการวิเคราะห์

ชื่อและที่อยู่ผู้ให้บริการ : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ จังหวัดสงขลา  
 เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 3134/46  
 วันที่รับตัวอย่าง : 14 มกราคม 2546  
 วันที่ทำการวิเคราะห์/ทดสอบ : 21 มกราคม 2546  
 วิธีการวิเคราะห์ : อ้างอิง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002  
 เครื่องมือวิเคราะห์ : เอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (PHILIPS PW2400)  
 เทคนิคการวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometry  
 สภาพการวิเคราะห์ : X-ray tube : Rh tube X-ray path : Vacuum  
 Application : GPSEM IQ Sample preparation : Pressed powder  
 Objective : Semiquantitative measurement  
 รายละเอียดตัวอย่าง : ซึ่เต้า จำนวน : 1 ตัวอย่าง  
 ผลการวิเคราะห์ :

ตัวอย่าง : เต้าซีลี้อยไม้ยางพารา

ที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น(%)	ที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น(%)
1	Na <sub>2</sub> O	1.92	7	K <sub>2</sub> O	18.85
2	MgO	15.19	8	CaO	54.45
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41	9	MnO <sub>2</sub>	0.95
4	SiO <sub>2</sub>	2.33	10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.12
5	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.28	11	Rb	0.03
6	SO <sub>3</sub>	2.42	12	SrO	0.05

\* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ c:\customer\46\3134

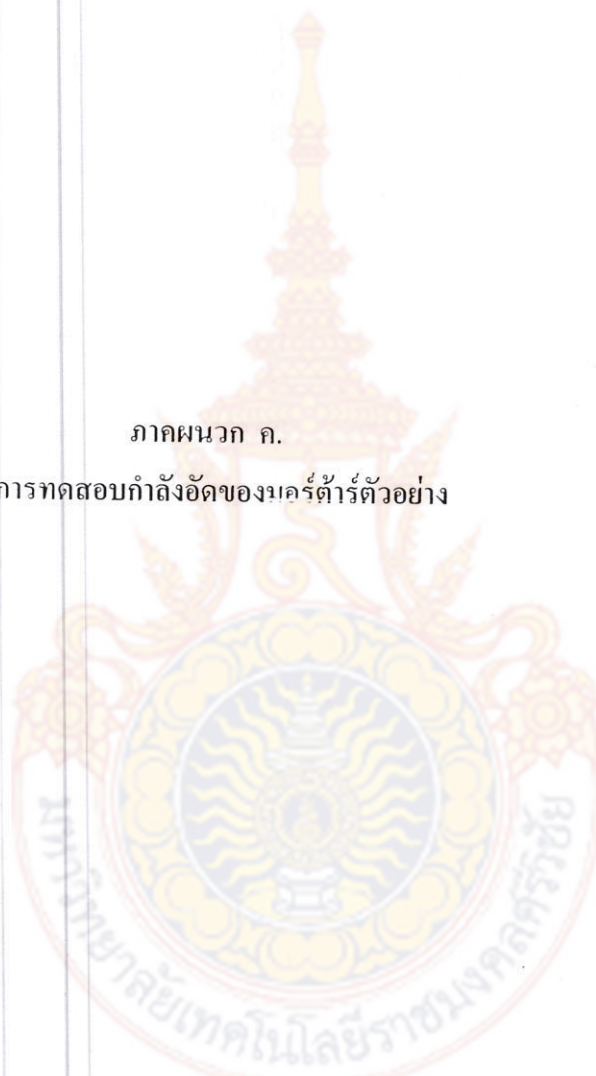
(นางสาวหิขรา สุกดริตน์)  
ผู้วิเคราะห์

(นายเทิดทูน ดำรงค์ฤทธิษามาตย์)  
ผู้ตรวจสอบ

หมายเหตุ ผลการวิเคราะห์นี้ได้มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ส่งมาวิเคราะห์เท่านั้น ไม่สามารถให้บริการรับรองตัวอย่างประเภทเดียวกันที่มีได้นำมาวิเคราะห์ และข้อมูลดิบที่ได้จากการวิเคราะห์จะจัดเก็บอย่างน้อย 1 เดือน

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตัวอย่าง



ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้ารมาตรฐาน

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
Ro	1	289.90	3	4250.76	170.030	
	2	289.40	3	4138.63	165.55	170.98
	3	290.40	3	4434.25	177.37	
	1	294.80	7	5779.82	231.19	
	2	292.50	7	5657.49	226.30	229.29
	3	293.90	7	5759.43	230.38	
	1	291.60	14	6360.86	254.43	
	2	287.50	14	6391.44	255.66	254.98
	3	295.50	14	6371.05	254.84	
	1	290.70	28	6508.66	260.35	
	2	286.50	28	6442.41	257.70	258.85
	3	294.10	28	6462.79	258.51	
	1	289.90	60	7155.96	286.24	
	2	288.40	60	7186.54	287.46	286.24
	3	291.60	60	7125.38	285.02	

ตารางที่ ๑.๒ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R10C

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R10C	1	280.30	3	3139.65	125.59	
	2	276.70	3	3129.46	125.18	124.36
	3	283.30	3	3058.10	122.32	
	1	279.90	7	4291.54	171.66	
	2	283.80	7	4097.86	163.91	165.68
	3	276.20	7	4036.70	161.47	
	1	275.60	14	4852.19	194.09	
	2	278.20	14	4862.39	194.50	194.00
	3	278.20	14	4834.86	193.39	
	1	278.60	28	5219.16	208.77	
	2	278.30	28	5239.55	209.58	209.72
	3	278.40	28	5270.13	210.81	
	1	279.40	60	6136.50	245.46	
	2	284.50	60	6116.21	244.65	245.98
	3	283.80	60	6195.72	247.83	



ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R20C

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGTH (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R20C	1	265.60	3	2191.64	87.67	
	2	267.90	3	2089.70	83.59	84.95
	3	261.90	3	2089.70	83.59	
	1	276.20	7	2201.83	88.07	
	2	271.20	7	2212.03	88.48	86.17
	3	266.80	7	2048.93	81.96	
	1	283.90	14	3058.10	122.32	
	2	267.00	14	3007.14	120.29	120.29
	3	268.70	14	2956.17	118.25	
	1	275.90	28	2883.79	155.35	
	2	272.00	28	3934.76	157.39	156.58
	3	275.90	28	3924.57	156.99	
	1	269.30	60	4260.96	170.44	
	2	269.50	60	4199.80	167.99	169.22
	3	269.50	60	4230.38	169.22	

ตารางที่ ๓.๔ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R30C

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R30C	1	259.00	3	1559.63	62.39	
	2	260.30	3	1630.99	65.24	64.56
	3	258.89	3	1651.38	66.06	
	1	265.00	7	1641.18	65.65	
	2	264.00	7	1722.73	68.91	69.45
	3	264.35	7	1845.06	73.80	
	1	262.50	14	2629.97	105.20	
	2	260.00	14	2656.68	106.27	105.56
	3	267.00	14	2630.00	105.20	
	1	263.50	28	2976.55	119.06	
	2	264.00	28	2956.17	118.25	119.20
	3	266.90	28	3007.14	120.29	
	1	264.20	60	3109.07	124.36	
	2	270.40	60	3098.89	123.96	123.82
	3	263.50	60	3078.49	123.14	

ตารางที่ ๕ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R40C

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R40C	1	255.90	3	1845.06	73.80	
	2	256.90	3	1845.71	73.83	73.80
	3	256.80	3	1844.28	73.77	
	1	260.00	7	1906.23	76.25	
	2	257.60	7	1926.61	77.06	76.49
	3	261.50	7	1904.28	76.17	
	1	262.06	14	2120.29	84.81	
	2	262.10	14	2059.12	82.36	83.86
	3	258.00	14	2110.09	84.40	
	1	252.00	28	2436.29	97.45	
	2	251.70	28	2426.10	97.04	97.11
	3	253.00	28	2420.95	96.84	
	1	259.00	60	2589.19	103.57	
	2	257.40	60	2619.78	104.79	104.52
	3	257.30	60	2629.97	105.20	

ตารางที่ ค. 6 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร R50C

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R50C	1	252.00	3	1151.89	46.08	
	2	258.70	3	1162.08	46.48	47.84
	3	258.60	3	1274.21	50.97	
	1	260.50	7	1549.44	61.98	
	2	260.00	7	1590.21	63.61	62.66
	3	260.45	7	1559.63	62.39	
	1	255.50	14	1630.99	65.24	
	2	251.00	14	1651.38	66.06	65.85
	3	255.10	14	1656.47	66.26	
	1	256.90	28	2214.07	88.56	
	2	253.00	28	2313.97	92.56	89.72
	3	255.30	28	2201.35	88.05	
	1	257.20	60	2395.51	95.82	
	2	258.80	60	2385.32	95.41	95.82
	3	257.50	60	2405.71	96.23	

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ R10N

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHTH (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R10N	1	277.40	3	3037.72	121.51	
	2	279.00	3	3058.10	122.32	122.32
	3	280.30	3	3078.49	123.14	
	1	279.50	7	4128.44	165.14	
	2	284.80	7	4097.86	163.91	164.46
	3	284.10	7	4108.05	164.32	
	1	278.20	14	4873.40	194.94	
	2	278.20	14	4834.86	193.39	193.94
	3	279.80	14	4836.90	193.48	
	1	279.20	28	5219.16	208.77	
	2	283.00	28	5234.45	209.38	209.38
	3	283.80	28	5249.75	209.99	
	1	279.30	60	6136.60	245.46	
	2	284.52	60	6136.60	245.46	245.60
	3	283.80	60	6146.79	245.87	

ตารางที่ ๓.๘ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R20N

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R20N	1	265.60	3	2140.67	85.63	
	2	671.90	3	2181.44	87.26	86.58
	3	261.90	3	2171.25	86.85	
	1	268.70	7	2222.22	88.89	
	2	268.30	7	2212.03	88.48	88.35
	3	276.50	7	2191.64	87.67	
	1	275.60	14	2956.17	118.25	
	2	273.50	14	3068.30	122.73	121.10
	3	271.90	14	3058.10	122.32	
	1	275.90	28	3883.79	155.35	
	2	275.90	28	3934.76	157.39	156.60
	3	268.10	28	3926.61	157.06	
	1	268.40	60	4250.76	170.03	
	2	268.72	60	4240.57	169.62	169.35
	3	268.50	60	4209.99	168.40	

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R30N

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R30N	1	255.90	3	1630.99	65.24	
	2	256.50	3	1641.18	65.65	65.72
	3	262.80	3	1656.47	66.26	
	1	264.20	7	1834.86	73.39	
	2	264.20	7	1839.96	73.60	73.39
	3	268.40	7	1829.76	73.19	
	1	263.10	14	2619.76	104.79	
	2	264.70	14	2609.58	104.38	104.72
	3	261.20	14	2624.87	104.99	
	1	267.00	28	2976.55	119.06	
	2	266.90	28	2986.75	119.47	119.06
	3	267.20	28	2966.36	118.65	
	1	265.20	60	3098.88	123.96	
	2	266.30	60	3109.07	124.36	124.23
	3	262.10	60	3109.07	124.36	

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ R40N

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R40N	1	249.60	3	1845.06	73.80	
	2	252.80	3	1845.06	73.80	74.07
	3	252.80	3	1865.44	74.62	
	1	257.60	7	1936.79	77.47	
	2	252.90	7	1946.92	77.88	77.59
	3	251.20	7	1935.78	77.43	
	1	254.50	14	2028.54	81.14	
	2	254.50	14	2050.97	82.04	82.26
	3	256.50	14	2089.70	83.59	
	1	251.70	28	2426.09	97.04	
	2	252.00	28	2426.09	97.04	96.91
	3	253.00	28	2415.90	96.64	
	1	257.40	60	2579.00	103.16	
	2	256.32	60	2609.58	104.38	103.70
	3	255.40	60	2589.19	103.57	



ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ R50N

COMPRESSIVE STRENGTH OF RUBBER SAWDUST ASH MORTAR

SPECIMENT	NO	WEIGHT (g)	Age (day)	ULTIMATE LOAD (kg)	COMPRESSIVE STRENGTH (ksc)	AVERAGE
R50N	1	252.40	3	1152.75	46.11	
	2	257.50	3	1160.32	46.41	46.33
	3	258.50	3	1161.40	46.46	
	1	260.41	7	1547.43	61.90	
	2	259.78	7	1590.22	63.61	62.90
	3	260.45	7	1579.64	63.19	
	1	254.40	14	1640.98	65.64	
	2	257.50	14	1650.37	66.01	65.96
	3	258.40	14	1655.48	66.22	
	1	256.78	28	2222.22	88.89	
	2	253.04	28	2303.77	92.15	91.06
	3	257.30	28	2303.77	92.15	
	1	257.20	60	2415.90	96.64	
	2	258.70	60	2395.51	95.82	95.96
	3	257.49	60	2385.32	95.41	

## ประวัติ

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายจรูญ นามสกุล เจริญเนตรกุล  
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Charoon Charoennatrkul
2. รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ -
4. ตำแหน่งปัจจุบัน หัวหน้าแผนกวิชาช่างก่อสร้าง อาจารย์สอนประจำสาขาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้
5. หน่วยงานและที่อยู่ติดต่อได้สะดวก  
แผนกวิชาช่างก่อสร้าง คณะวิชาโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้  
ต. บ่อทราย อ. เมือง  
จ. สงขลา 90000  
โทรศัพท์ 074-440763 โทรสาร 074-324245  
E-mail : [charoon2515@hotmail.com](mailto:charoon2515@hotmail.com)
6. ประวัติการศึกษา  
พ.ศ. 2545 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
วิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศไทย  
พ.ศ. 2544 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิชา  
เอก วิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ ประเทศไทย  
พ.ศ. 2538 ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม  
โยธา วิชาเอก วิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ประเทศไทย
7. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
สาขาวิชาทางด้านการทดสอบและวัสดุวิศวกรรม  
สาขาวิชาทางด้านการควบคุมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก  
ที่สัมผัสน้ำทะเล
8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ  
งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว  
การประชุมวิชาการระดับชาติ  
1) จรูญ เจริญเนตรกุล และ สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, 2545, “เปรียบเทียบการ  
ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยวิธีค้อนยิงคอนกรีตและวิธีวัดความเร็วคลื่น

อัลตราโซนิก” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3.  
หน้า 313-314

2) จริญญา เจริญเนตรกุล และ สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์, 2545, “ความคงทนของ  
ทำเทียบเรือคอนกรีตเสริมเหล็ก” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย  
ครั้งที่ 3, หน้า 317-318

3) สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์ และ จริญญา เจริญเนตรกุล, 2545, “การกัดกร่อนขอ  
ทำเทียบเรือคอนกรีตเสริมเหล็ก” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, หน้า  
STR233-238

4) สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์ และ จริญญา เจริญเนตรกุล, 2545, “ผลกระทบกำลัง  
อัด ณ ตำแหน่งต่างๆบนแผ่นพื้นและคานคอนกรีตด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย” การประชุมวิชา  
การวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, หน้า STR227-232

5) จริญญา เจริญเนตรกุล, 2546, “การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซีเมนต์  
ยางตารา” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, หน้า MAT 19-24

#### 9. ประวัติการปฏิบัติงานทางด้านวิศวกรรม

เป็นผู้ทดสอบและตรวจสอบการทดสอบวัสดุ ปฐพีกลศาสตร์ คอนกรีตเทคโนโลยี และการ  
ทดสอบวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ ของโครงการก่อสร้างของหน่วยงานต่างๆทั่วภาคใต้ มากกว่า 100 โครงการ

