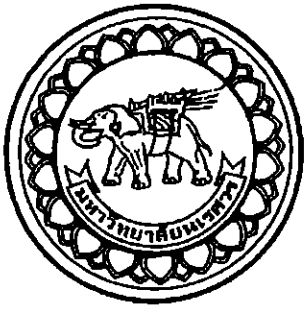


การพัฒนากากเถ้าชานอ้อยสำหรับการเป็นวัสดุปอซโซลาน

Development of the sugarcane bagasse ash waste as a pozzolanic material

นายกฤติเดช สีสมศักดิ์ รหัส 54361190

นายภัทรเมศ หอมสมบัติ รหัส 54361350

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 30 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน 16905207
เลขเรียกหนังสือ วร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ว277 ร1
2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	**การพัฒนากากเถ้าชานอ้อยสำหรับการเป็นวัสดุปอซโซลาน**	
ผู้ดำเนินโครงงาน	**นายกฤติเดช สีสมศักดิ์**	**รหัส** 54361190
	นายภัทรเมศ หอมสมบัติ	รหัส 54361350
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2557	

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การพัฒนากากเถ้าชานอ้อยสำหรับการเป็นวัสดุปอซโซลาน	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกฤติเดช สีสมศักดิ์	รหัส 54361190
	นายภัทรเมศ หอมสมบัติ	รหัส 54361350
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	
ปีการศึกษา	2557	

.....

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการพัฒนาเถ้าชานอ้อยให้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ การศึกษาได้เน้นเกี่ยวกับคุณสมบัติเถ้าชานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 618 และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าชานอ้อยอ้างอิงผลการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109, ASTM C 187, ASTM C 191 ในการทดสอบทางวิศวกรรมจะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนระหว่าง 0-30% โดยน้ำหนัก การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะทดสอบตัวอย่างที่มีอายุบ่ม 1, 3, 7, 14, 28 และ 50 วัน ผลที่ได้คือเถ้าชานอ้อย มีผลรวมของสารประกอบ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณ 79% ซึ่งสามารถจัดให้เป็นประเภทผลิตปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C 618 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยมีซิลิกาอสัณฐาน โครงสร้างจุลภาคของเถ้าชานอ้อย พบว่าเป็นรูปทรงเหลี่ยมและเกิดการกระจายอนุภาคค่อนข้างสูง ความต้องการน้ำ,ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีสัดส่วนของเถ้าชานอ้อยผสมอยู่ร้อยละต่างๆเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีเถ้าชานอ้อยผสมอยู่มีแนวโน้มลดลง เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อย 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน มานำใช้ในการคำนวณหา pozzolanic activity index ได้เท่ากับ 79% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีเถ้าชานอ้อย

Project title	Development of the sugarcane bagasse ash waste as a pozzolanic material	
Name	Mr. Krittidet Sisomsuk	ID. 54361190
	Mr. Phattharamet Homsombat	ID. 54361350
Project advisor	Dr. Phongthorn Julphunthong	
Major	Civil Engineering	
Department	Civil Engineering	
Academic year	2014	

Abstract

This research studied has a development of the sugarcane bagasse ash waste to replace cement. The study investigated about physical abilities of sugarcane bagasse ash waste in order for used as pozzolanic materials. Therefore the study of the physical and the engineering abilities of sugarcane bagasse ash waste were based on ASTM C 618, ASTM C 109, ASTM C 187, and ASTM C191 standards conditions

The case study would replace cement by a bagasse ash waste. The replacing percentages are between 0-30% by weight. The compressive strength would be tests by times as 1, 3, 7, 14, 28 and 50 days.

The result showed that the sugarcane bagasse ash waste exhibites a total compounds of SiO_2, Al_2O_3 and Fe_2O_3 for 79%, which is categorized into natural pozzolan as ASTM C 618 standard specified. The X-Ray diffraction patterns indicated that sugarcane bagasse ash waste shows an amorphous phase. The microstructure analysis shows sugarcane bagasse ash waste is square shape and particle distribution is relatively high. When the Portland cement replaced with sugarcane bagasse ash waste, a water requirement, initial setting time and final setting time were increased. The compressive strength the samples with increasing ash percentage tended to decrease when compared to the sample without bagasse ash waste mixed proportion. Therefore, the research study conducted to calculate pozzolanic activity index of the 20% replacing percentage with 28 days curing shows 79%.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้ความอนุเคราะห์จากบริษัทและบุคลากรที่เชี่ยวชาญในงานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน อย่างไรก็ตามผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บริษัท น้ำตาลพิษณุโลก ที่ให้ความอนุเคราะห์ สนับสนุนวัสดุเถ้าชานอ้อย ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงคำชี้แนะในขั้นตอนการทำงานจนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายกฤติเดช สีสมศักดิ์
นายภัทรเมศ หอมสมบัติ
29 เมษายน 2558

สารบัญ

หน้า

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

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 4
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน 5
1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ 5
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ 6
1.7 งบประมาณ 7

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 8
2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ 8
2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) 17
2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก 22
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอซโซลาน 23
2.5 ข้อสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 26

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 27
3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง 27
3.2 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร 27

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ 30
3.4 การทดสอบกำลังดึงมอร์ตาร์ 33

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 35

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 42

บรรณานุกรม 43
ภาคผนวก 44

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรูปแบบต่างๆ 4

1.2 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ 6

2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10

2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10

2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก 11

2.4 เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ 15

2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 17

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก 19

2.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Microsilica (MS) 20

2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ 21

3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์เพสต์ 28

3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์รับแรงอัด 6 ก้อน 32

3.3 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์รับแรงดึง 6 ก้อน 34

4.1 องค์ประกอบทางเคมี , ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของ ซีเมนต์, เถ้าชานอ้อย 36

4.2 Water/binder ratio, เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial sitting time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final sitting time) ของ Cement paste และ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยที่ร้อยละต่างๆ 37

4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ 38

4.4 ผลการทดสอบแรงดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ 39

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 แผนที่ตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย (ข้อมูล พ.ศ.2556) 2

2.1 หลักการทำงานของเครื่อง XRD 25

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เถ้าชานอ้อย 35

4.2 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของเถ้าชานอ้อย 36

4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาการบ่มของการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ 40

4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของมอร์ตาร์กับระยะเวลาการบ่มของการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ 41

บทที่ 1

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นวัสดุที่พบเห็นหรือใช้ในชีวิตประจำวันตลอดมา อาทิเช่น นำมาสร้างเป็นอาคารบ้านเรือน สะพาน ถนน และอื่นๆอีกมากมาย โดยการผลิตคอนกรีตนั้น จะมีส่วนผสมหลัก คือ ปูนซีเมนต์, น้ำ และมวลรวม โดยจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันพร้อมสัดส่วนผสม คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) หรือเรียกว่าเพสต์ (Paste) ประกอบด้วยปูนซีเมนต์, น้ำและฟองอากาศ, มอร์ตาร์ (Mortar) ประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์ผสมทรายและคอนกรีต (Concrete) ประกอบด้วยมอร์ตาร์ผสมกับหิน โดยมีน้ำเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาเมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำลงไปเทในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นก็แปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต

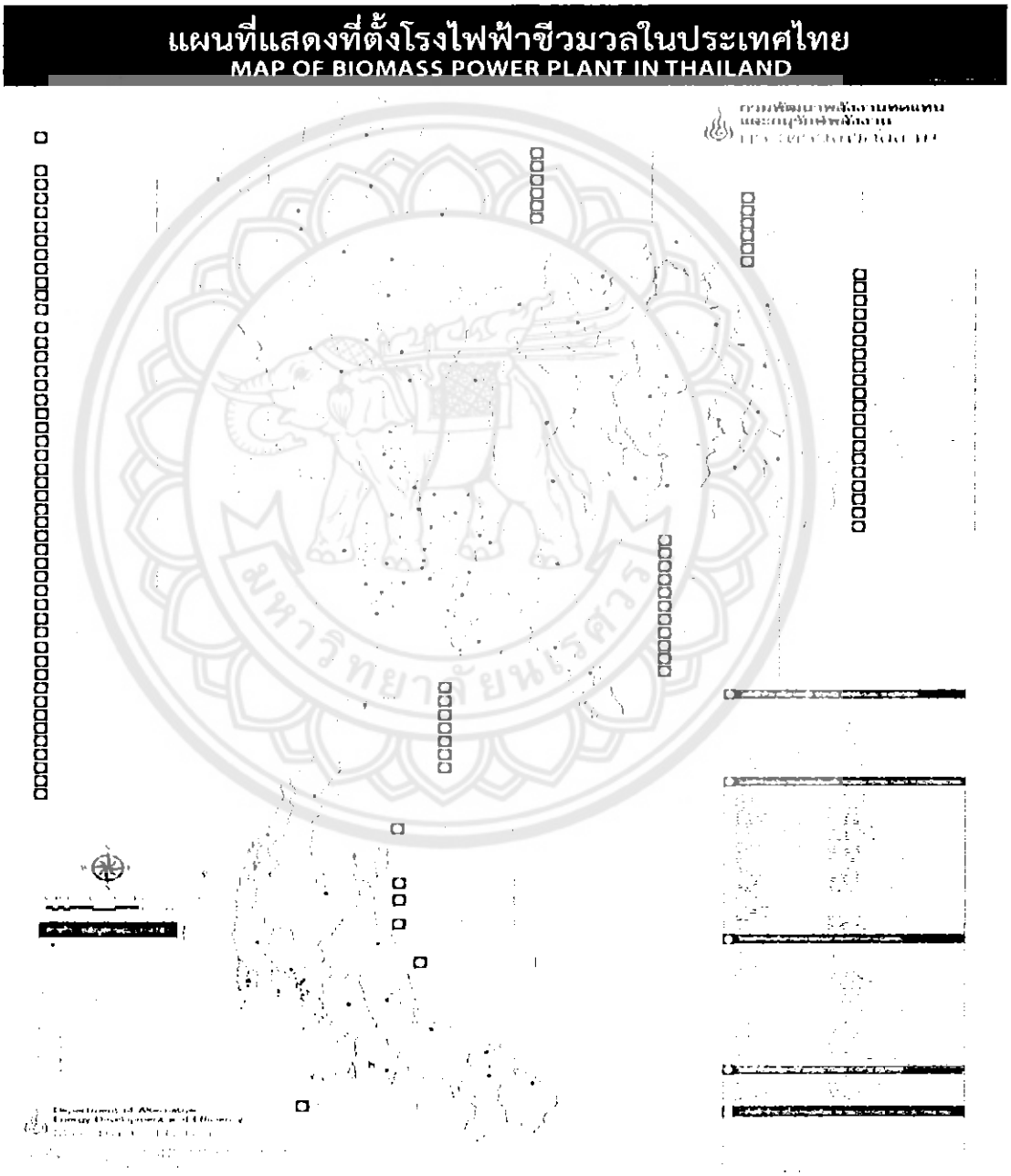
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยพึ่งพาก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 70 ของปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ รองลงมาได้แก่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินซึ่งเป็นปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตาม พลังงานเชื่อเพลิงเหล่านี้เป็นพลังงานที่ธรรมชาติสะสมไว้ การที่จะเกิดขึ้นใหม่ต้องใช้เวลานานมาก การนำทรัพยากรที่ธรรมชาติเก็บสะสมไว้มาใช้นั้นย่อมหมายถึงว่าวันใดวันหนึ่งไม่นานนัก แหล่งทรัพยากรดังกล่าวย่อมหมดลงหรือมีราคาสูงมาก ด้วยเหตุปัจจัยนี้เองประกอบกับปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันจึงเป็นแรงผลักดันให้เกิดการวิจัยเชื้อเพลิงประเภทอื่นมาเป็นทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล แม้ในการเริ่มต้นจะไม่สามารถทดแทนได้ทั้งหมด แต่ก็จะช่วยบรรเทาความสิ้นเปลืองของการใช้ลงได้ ด้วยเหตุนี้ปัจจุบันเราถึงพยายามศึกษาพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่น พลังงานจากแสงแดด พลังงานน้ำ พลังงานลม หรือ พลังงานจากชีวมวล

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุที่เกิดขึ้นจากผลผลิตทางการเกษตรมากมายดังนั้นการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงจากชีวมวลจากภาคเกษตรกรรม เช่น แกลบ,ซังข้าวโพด หรือ ชานอ้อย จึงเป็นที่แพร่หลายมากในประเทศ ชานอ้อยก็เป็นหนึ่งวัสดุที่เหลือใช้จากการผลิตน้ำตาล มีความพยายามนำชานอ้อยไปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยนำชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตน้ำตาลไปเผา หลังจากการนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมแล้ว พบว่ายังมีปัญหาที่เกิดจากชานอ้อยที่ได้จากการเผาไหม้ เรียกว่า เถ้าชานอ้อย มีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ ทำให้มีผลกระทบด้านมลภาวะทาง

อากาศและสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นภาระที่ต้องกำจัดทิ้งไปโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ เมื่อปี 2556-2557 ปริมาณอ้อยถูกผลิตขึ้นถึง 103 ล้านตัน ส่งผลให้ ปริมาณเถ้าชานอ้อยจากการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันเถ้าชานอ้อยมีประมาณ 50 ล้านตัน ต่อปี[1] และเถ้าเกือบจะทั้งหมดไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ และการกำจัดเถ้าเหล่านี้ยังเป็นปัญหาต่อโรงไฟฟ้าและต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

รูปที่ 1.1 แผนที่ตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย (ข้อมูล พ.ศ.2556)



ตารางที่ 1.1 ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรูปแบบต่างๆ

ต้นทุน/หน่วยไฟฟ้า	บาท/Kwh*
1. แสงอาทิตย์	12.50
2. ลม	5.20
3. ขยะ	3-5
4. ชีวมวล	3-3.50
5. นิวเคลียร์	2.79
6. ถ่านหิน	2.94
7. พลังงานความร้อนร่วม (Gas Existing)	3.96
8. พลังงานร้อนรวม (Marginal Gas)	4.34
9. กังหันแก๊ส	13.65

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2553

ในอดีต นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาการนำเถ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลหรือ เช่น เถ้าแกลบมาปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต เนื่องจากเถ้าแกลบเหล่านี้มักประกอบด้วยสารประกอบซิลิเกต หรือ อลูมิเนตซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับสารประกอบบางอย่างในซีเมนต์ ส่งผลให้สมบัติต่างๆของคอนกรีตดีขึ้น เช่น กำลังรับแรงหรือความสามารถในการทนการกัดกร่อนจากกรด เถ้าแกลบมีทั้งส่วนที่เกิดจากการเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าและเกิดจากการใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันเถ้าแกลบถูกนำไปใช้ประโยชน์น้อยมาก เช่น มีการนำเถ้าแกลบบางส่วนไปถมที่ดินเพื่อเพิ่มระดับความสูงแต่โดยมากภาคอุตสาหกรรมมักกำจัดเถ้าแกลบในฐานะของเสียและมีปริมาณมาก ปัจจุบันเถ้าชานอ้อยก็มีนักวิจัยที่ทำการทดสอบแล้วเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเชิงเคมี-ฟิสิกส์ของเถ้าชานอ้อยยังมีลักษณะไม่ค่อยเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อจะศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของเถ้าชานอ้อยเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าชีวมวลซึ่งเป็นกากจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยชีวมวลของชานอ้อย

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเถ้าชานอ้อยที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าชานอ้อย ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต

1.2.4 เพื่อนำผลงานวิจัยที่ได้ไปเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่กลุ่มเป้าหมาย

1.2.5 เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ในด้านการนำวัสดุเหลือใช้ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตทางเกษตรและอุตสาหกรรมของเถ้าชานอ้อย มาสร้างประโยชน์ในงานคอนกรีต

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทำให้ทราบถึงความสามารถและศักยภาพในการเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล เพื่อนำไปสู่การศึกษาความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงลึกอื่นๆของคอนกรีตต่อไป

1.3.2 สามารถสร้างแนวทางใหม่ในการลดการใช้ซีเมนต์ในงานก่อสร้าง

1.3.3 สร้างแนวทางใหม่ในการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ของการสร้างโรงไฟฟ้าพลังชีวมวล

1.3.4 สามารถเผยแพร่ความรู้ในการพัฒนาวัสดุปอซโซลานในวารสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับและถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้สู่ภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมคอนกรีต, อิฐบล็อก หรือ อิฐมวลเบาต่อไป

1.3.5 สามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ในเรื่องวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางเกษตรและอุตสาหกรรมของเถ้าชานอ้อย โดยการนำมาใช้ประโยชน์ในวงการคอนกรีต

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

ทำการศึกษาโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาคุณสมบัติทาง เคมี-ฟิสิกส์ ของเถ้าชานอ้อย

- Chemicalcomposition (XRF)
- Crystalline phase (XRD)
- Particle size (PSA)
- Surface area (BET)
- Microstructure (SEM)

2. การศึกษาคุณสมบัติทาง วิศวกรรม

- Water/binder ratio for normal consistency
- Initial and final setting time
- Compressive strength of morta
- Tensile strength of morta

1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ

1.5.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของเถ้าชานอ้อย

1.5.3 ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25,30

1.5.4 ทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25,30

1.5.5 ทำการหล่อมอร์ต้าผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20,25,30

1.5.6 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อายุ 1,3,7,14,28,50 วัน เทียบกับกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าชานอ้อย

1.5.7 ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าที่อายุ 3,7,14,28,50 วัน เทียบกับกำลังรับแรงดึงมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าชานอ้อย

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	พ.ศ. 2557 – พ.ศ. 2558							
	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและค้นหาข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าชานอ้อย								
จัดเตรียมตัวอย่างเถ้าชานอ้อย								
วิเคราะห์องค์ประกอบทางฟิสิกส์-เคมีและทำการจำแนกลักษณะเฉพาะที่สนใจของเถ้าชานอ้อย เช่น โครงสร้างจุลภาค, x-ray diffraction pattern หรือThermal analysis								
2. เตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองวิจัยเถ้าชานอ้อยด้วยการนำไปปรับปรุง(ก) *(ก) บดด้วย Los Angles								
3. ทำการทดลอง โดยวิธีการปฏิบัติการทางคอนกรีต ได้แก่ - Water/binder ratio at normal consistency - Initial and final setting time - Compressive strength of morta - Tensile strength of morta *ปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ผสมเพิ่ม 5%,10%,15%,20%,25% และ 30% ของปริมาณซีเมนต์								
4. วิเคราะห์ผลการวิจัย, สรุป และ เขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ผลงานในวารสารระดับนานาชาติ								

1.7 งบประมาณ

1. ค่าวัสดุสำนักงาน	200	บาท
2. ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	300	บาท
3. ค่าวัสดุก่อสร้าง	250	บาท
4. ค่าวัสดุน้ำมันหรือเชื้อเพลิงและหล่อลื่น	250	บาท
5. ค่าจ้างถ่ายเอกสารหรือจัดทำรูปเล่ม	1,000	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	2,000	บาท

หมายเหตุ : ขออนุมัติถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

2.1.1 ประวัติ

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ที่เก่าแก่ที่สุดถูกค้าพบเมื่อ พ.ศ. 2528 มีอายุประมาณ 6500 ปีก่อนพุทธศักราช เป็นถนนพื้นคอนกรีตในประเทศอิสราเอล และยังพบอีกว่าถูกนำมาใช้ในสมัยอียิปต์,กรีก และโรมัน คำว่าซีเมนต์มาจากภาษาลาติน มีความหมาย คือ วัสดุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ โดยการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างหินกับอิฐ และใช้เป็นวัสดุแต่งผิวหินปูนที่พรุน

ความก้าวหน้าที่สำคัญก็เกิดขึ้นอีกครั้งใน พ.ศ.2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสีเหลืองปนเทา บริเวณเมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัสดุนี้ว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

กลางศตวรรษที่ 19 ปูนซีเมนต์เป็นที่นิยมและรู้จักกันดี ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆทั่วโลก รวมทั้งได้เปิดโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่นในประเทศฝรั่งเศส พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน พ.ศ.2398 และสหรัฐอเมริกา พ.ศ.2414เป็นต้น[2]

2.1.2 กรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

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

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์มี 2 วิธีด้วยกันคือ

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

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัสดุที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียว ถูกนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนป้อนเข้าสู่หม้อเผา ส่วนกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งนั้นวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่นั้นได้แก่ หินปูน หินดินดานจะถูกนำมาผสมกันแบบแห้งแล้วนำไปบดให้ละเอียดจากนั้นก็จะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผา

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบถูกบดได้ที่แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผาแบบหมุน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ วัตถุดิบต่างๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็นเม็ดปูน (Clinker) ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงแล้วนี้มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในขณะทำการบดจะทำการเติมยิปซั่มลงไปประมาณ 3-6% เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

จากกรรมวิธีการผลิตทั้ง 2 วิธี เมื่อวัตถุดิบต่างๆถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพองเหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิกา , อลูมิน่า และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

กรรมวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งซึ่งขั้นตอนในการผลิตจะไม่ยุ่งยากเหมือนกรรมวิธีการผลิตแบบเปียก

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3, Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2, P_2O_5 และยิบซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [9]

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 – 25
Al_2O_3	3 – 8
Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
$Na_2O + K_2O$	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 - 3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [10]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนกระกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcuim Silicate)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcuim Silicate)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcuim Aluminate)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcuim Aluminoferrite)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณจากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่างๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ โดยใช้สูตรคำนวณของ Bogue ดังนี้

$C_3S = 4.07(CaO) - 7.60(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3 - 2.85(SO_3))$

$C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.754(C_3S)$

$C_3A = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$

$C_4AF = 3.04(Fe_2O_3)$

ตัวเลขนอกวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก [11]

ออกไซด์ต่างๆ (%) ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารประกอบหลักคำนวณจากสมการของ Bogue
CaO	64.73	C_3S = 4.07 x (64.73 - 1.60) - 7.60
SiO_2	21.20	x(21.20) - 6.72 x (5.22) - 1.43 x((3.08) -
Al_2O_3	5.22	2.85 x (2.01))
Fe_2O_3	3.08	= 50.6%
MgO	1.04	C_2S = 2.87 x (21.20) - 0.754 x (50.6)
SO_3	2.01	= 22.7%
Na_2O	0.19	
K_2O	0.42	C_3A = 2.65 x (5.22) - 1.69 x (3.08)
Loss of Ignition	1.45	= 8.6%
Insoluble Residue	0.66	
Free Lime	1.60	C_4AF = 3.04 x (3.08)
		= 9.4%

2.1.4 สารประกอบหลัก

2.1.4.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้ม คุณสมบัติ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55 %

2.1.4.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

2.1.4.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15 %

2.1.4.4 เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10 %

2.1.5 สารประกอบรอง

2.1.5.1 ยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิปซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ขึ้นอยู่กับ

- อัลคาไลน์ออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และK_2O
- ปริมาณ C_3A
- ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2.1.5.2 Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้สองกรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด
- ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆไม่สมบูรณ์

2.1.5.3 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมละลายเป็นเม็ดปูน ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือปริมาณจะเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการไม่ยุบตัว

2.1.5.4 อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O)

อัลคาไลน์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่อัลคาไลน์ต่ำๆ

2.1.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในสองลักษณะคือ

- อาศัยการละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิด Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่
- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะโดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก ของซีเมนต์แต่ละประเภท

2.1.6.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH_2)$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ของ (C_3S)

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

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ (C_2S)

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

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะสำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH_2)$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.1.6.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันที่ทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

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

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว นิยมใส่ยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับ (C_3A) ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A และ C_2S เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ C_3A กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะทำให้ Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate

Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.1.6.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่มและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite[3] ดังสมการ

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

เวลาที่ใช้เพื่อบรรลุ 80 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ [12]

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

2.1.6.4 กลไกลการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของแต่องค์ประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_42H_2O$) และน้ำที่ต่อเนื่องกันโดยปกติสารประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยาได้แก่ เอไลต์ (ไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) เบไลต์ (ไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ ซัลเฟตของอัลคาไลต์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังต่อไปนี้

1. ระยะ Pre-induction (นาทีแรก)

โดยเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนบางชนิดไปยังสถานะของของเหลวและมีการฟอร์มตัวของไฮเดรต ซัลเฟตของอัลคาไลต์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาทีทำให้ในสารละลายมีทั้งไอออนของโพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็มีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยไอออนแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เช่นเดียวกัน

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและจะมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้จะมีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาจะต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกัน ส่วนเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต (β-C_2S) จะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

2. ระยะ Introduction หรือระยะดอร์แมนท์ (Dormant) (ในชั่วโมงแรก)

หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยากไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงชั่วโมงแรก สาเหตุที่ปฏิกิริยาลดลงเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ททริงไกท์ (Ettringite)

3. ระยะเร่ง (Acceleration Stage) (3-12 ชั่วโมงหลังการผสม)

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลดลงในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมาแตกตัวอย่างสมบูรณ์แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอ็ททริงไกท์

4. ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลงในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีการฟอร์ตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซิลิเกตและเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตถูกใช้หมดไปมีผลทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลงตามมาด้วยเอ็ททริงไกท์จะฟอร์มตัวขึ้นจะเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และไดแคลเซียมซึ่งมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและ/หรือเฟอร์ไรต์ได้โมโน

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิคอน (Siliceous) หรือมีทั้งซิลิคอนและอลูมินา (Siliceous Alumineous) ซึ่งที่อุณหภูมิจะไม่ทำปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ได้

2.2.1 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในบางกรณีที่เผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (ประมาณ 1500 °C หรือ สูงกว่า) เถ้าถ่านหินจะหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Botto Ash)

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.)จนถึง 0.15 มม. ซึ่งจะพบว่าเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก ของเถ้าลอย
SiO_2	48
Al_2O_3	26
Fe_2O_3	10
CaO	3
MgO	2
SO_3	0.7
Na_2O	1.0
K_2O	3.0
ออกไซด์อื่นๆ	1.3
Loss of lignition	5

คุณประโยชน์และการใช้งาน

- ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ เถ้าลอย ซึ่งมีรูปร่างกลม
- ลดการเยิ้ม และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดลงซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่
- เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่มีอายุมากกว่า 28 วัน
- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการความสามารถเทได้เท่ากัน,ปฏิกิริยาระหว่าง เถ้าลอย กับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

2.1.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม Slag ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกา และอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่าน Coke

คุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของ Slag ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Slag อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงดัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา Slag ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำผลก็คือ Slag ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบที่ค่อนข้างแน่นอน

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ออกไซด์	% โดยน้ำหนักของตะกรันเตาถลุงเหล็ก
SiO_2	37
Al_2O_3	11
Fe_2O_3	0.3
CaO	40
MgO	7
SO_3	0.3
Na_2O	0.4
K_2O	0.7
ออกไซด์อื่นๆ	2.3
Loss of Ignition	-

คุณประโยชน์และการใช้งาน

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนผสมมีดังนี้

- ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมSlagจะช้ากว่าคอนกรีตทั่วไปส่งผลให้**ความร้อนที่เกิด**จากปฏิกิริยาต่ำทำให้เหมาะกับงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้า**วเนื่องจากความ**ร้อน
- คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต ,น้ำทะเลและสารเคมีได้
- ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี
- เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดให้คอนกรีตที่อายุมากกว่า28วัน

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กทำได้สองลักษณะโดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 25%-65%

2.1.3 Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

MS เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิต โดยการนำเอาวัตถุดิบอันได้แก่ หิน ควอร์ต ถ่าน และเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของ MS จะแตกต่างจากเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็ก คือ MS ในแหล่งเดียวกันจะมีความผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับขบวนการผลิต Silicon ค่อนข้างบริสุทธิ์มาก

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Microsilica (MS)

ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก MS
SiO_2	92
Al_2O_3	0.7
Fe_2O_3	1.2
CaO	0.2
MgO	0.2
SO_3	-
Na_2O	1.2
K_2O	1.9
ออกไซด์อื่นๆ	2.6
Loss of Ignition	-

คุณประโยชน์และการใช้งาน

- ลดการเยิ้ม และการแยกตัวของคอนกรีตสด
- เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้น และระยะยาว
- เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำ และอากาศเป็นไปได้ยาก
- ข้อคำนึงในการใช้ MS คอนกรีตที่ผสม MS ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก และ มีแนวโน้มจะเกิด Plastic Shrinkage Crack มากกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงควรหาวิธีป้องกัน

2.1.4 เถ้าแกลบ (Rice husk ash)

การเผาแกลบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเผาแกลบผสมดินเหนียวหรือปูนขาวที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือกระดาษในอัตราส่วนที่เท่ากัน การเผาเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงสี การเผาแกลบอย่างต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ พบว่าแกลบที่ได้มีคุณสมบัติต่างกันไปบ้าง เถ้าแกลบเทาขาวได้จากการเผาที่นาน และมีอากาศพอเพียง ส่วนเถ้าแกลบดำได้จากการเผาที่มีอากาศไม่พอเพียงหรือมีเวลาในการเผาต่ำ

เถ้าแกลบดำได้จากการเผาแกลบเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำในโรงสีและเรียกแกลบนี้ว่าแกลบดำโรงสี (black boiler ash) อุณหภูมิของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีไม่คงที่ขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบช่วงเวลาการเผา และขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันมาก โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้าเผาช่วงเวลาที่สั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมี Loss on ignition สูง แกลบที่ได้โดยวิธีนี้มี Loss on ignition ต่ำสามารถนำมาบดผสมปูนซีเมนต์ปอซโซลานทำคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงที่ดีได้

เถ้าแกลบเทาขาวส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาในที่โล่งหรือในเตาขนาดเล็ก อุณหภูมิในการเผาขึ้นอยู่กับขนาดของแกลบ ถ้าเป็นกองใหญ่มาก อุณหภูมิอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเป็นกองเล็กอุณหภูมิสูงเพียง 550 องศาเซลเซียส ถ้าเผาโดยกองติดดิน การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์เนื่องจากอากาศไม่สามารถเข้าไปช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีได้ เมื่อเผาเสร็จแล้วการเก็บเถ้าแกลบก็ทำได้ยากและมักมีสิ่งเจือปน เช่น เศษดินและหินติดมาด้วย นอกจากนี้การเผาในที่มีลมทำให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายได้ การเผาในที่โล่งควรเผาโดยยกพื้นบนตะแกรง และเพื่อให้อุณหภูมิของการเผาไม่สูงเกินไปควรใช้แกลบเพียงครั้งละ 20 กิโลกรัม หรือหนึ่งกระสอบ ซึ่งจะให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบที่ได้มีสีเทาขาวและสามารถใช้ทำเป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

สารประกอบ	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO_2	86.9 - 97.3	88.3	89.9
Al_2O_3	NA	0.4	0.5
Fe_2O_3	0 - 0.6	3.3	1.8
CaO	0.2 – 1.5	0.5	0.5
K_2O	0.6 – 2.5	2.7	1.4
Na_2O	0 – 1.5	0.1	0.1
MgO	0.1 – 1.9	0.2	0.2
SO_3	0.1 – 1.1	0.1	0.1
LOI	NA	3.7	3.7

คุณประโยชน์และการใช้งาน

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ การก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้นไม่มากนักแต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก เถ้าแกลบทำให้การเยิ้มน้ำของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนสูงจึงสามารถดึงน้ำไม่ให้ลอยขึ้นสู่ผิวหน้าได้ดี

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วการใช้เถ้าแกลบในส่วนผสมคอนกรีตทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น แต่การทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีของคอนกรีตดีขึ้น คุณสมบัติด้านอื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ [5]

2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.3.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ปฏิกิริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยา ปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($C_3A_2H_3$) ดังสมการ

$$2SiO_2+3Ca(OH)+H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2Sio_2 \cdot 3H_2O$$

$$2Al_2O_3+3Ca(OH)+H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2Sio_2 \cdot 3H_2O$$

2.3.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีสารปอซโซลาน

กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ (CaO/SiO_2) ในขณะที่ บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอซโซลานจะมี

คุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียวไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆทีละน้อยๆตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนหรืออลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียวไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด[4]

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอซโซลาน

2.4.1 X-ray Fluorescence (XRF)

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

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray Photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทน ที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟูออเรสเซนต์ ” พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่ารังสีเอ็กซ์ฟูออเรสเซนต์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำรังสีขนานไปยัง Diffracting Crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอนเช่น ควอทซ์ , ลิเทียม-ฟูออไรด์ , ไมกา ฯลฯ โดย Diffracing Crystal จะทำให้รังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ (X-ray Detector) โดยปกติ Diffracting Crytal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก Colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัด

2.4.2 Brunauer Paul Hugh Emmett and Edward Teller(BET)

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

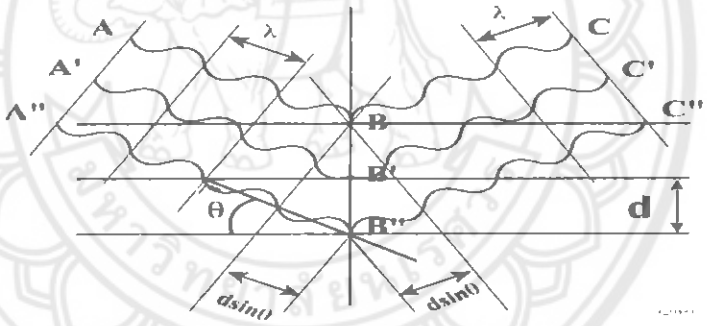
เป็นเครื่องที่ออกแบบมาเพื่องานวัดพื้นที่ผิวโดยเฉพาะ เครื่องนี้เป็นเครื่องที่ทำการวัดโดยอัตโนมัติ การไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวตัวอย่างกระทำโดยการให้ความร้อนและ "ทำสุญญากาศ" ตัวเครื่องเองมีระบบตรวจสอบว่าการไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวเสร็จสมบูรณ์หรือยังด้วยการ "วัดความดัน" ซึ่งถ้าหากพื้นผิวยังมีก๊าซใด ๆ ดูดซับเอาไว้อยู่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

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

2.4.3 X-ray Diffractometer (XRD)

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

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



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเครื่อง XRD

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณ หรือ หาองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน [8]

2.5 ข้อสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ดร.พัชรินทร์(พ.ศ. 2553) ได้ทำการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยกระบวนการโซลเจล (sol-gel technology) เป็นกระบวนการหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่ เรียกว่า "Sol" ส่วนมากอยู่ในรูปของ สารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า "Gel" โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยาจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าชานอ้อย พบว่า ขี้เถ้าชานอ้อยมีปริมาณซิลิกาสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มี ซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น[6]

รัฐพล สมนา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล(พ.ศ. 2554) ทำการศึกษาเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นของที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 350 กก./ซม.2 ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าแทนหินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า และใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูงคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น[7]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงงานวิจัยนี้ โดยก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมการเกี่ยวกับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อช่วยให้การดำเนินงานในการทำโครงงานวิจัยเป็นไปตามแผนที่วางไว้ อีกทั้งจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ดีและการทำการทดลองที่เป็นขั้นตอนตามจุดประสงค์ที่วางไว้

3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

3.1.1 ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

3.1.2 ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle)

3.1.3 ASTM C187 Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste

3.2 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3.2.1.2 กระบอกตวงน้ำ

3.2.1.3 เครื่องทดสอบไวแคต

3.2.1.4 เครื่องร่อนทราย, ตะแกรงร่อนทรายมาตรฐานเบอร์ 30 และ 100

3.2.1.5 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์

3.2.1.6 ถาดอลูมิเนียม

3.2.1.7 อุปกรณ์สำหรับผสม เช่น เกรียงเหล็ก, ที่ตักวัสดุ, ที่ปาดวัสดุ

3.2.1.8 เครื่องลอสแองเจลิส

3.2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.2.2.2 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างเบอร์ 100

3.2.2.3 เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงาน น้ำตาล พิษณุโลก

3.2.2.4 น้ำสะอาด

3.2.3 การเตรียมวัสดุ

3.2.3.1 ทราย นำทรายที่จะใช้มาล้างน้ำให้สะอาดจากนั้นอบให้แห้ง แล้วก็ร่อนให้ได้ขนาดที่ต้องการนั่นก็คือผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างเบอร์ 100

3.2.3.2 เถ้าชานอ้อย นำเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานมาอบให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้กากเถ้าชิ้นใหญ่ๆออกแล้วบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียด ด้วยเครื่องลอสแองเจลิส และนำเถ้าไปเก็บไว้ในที่แห้ง

3.2.4 วิธีการทดลองการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

3.2.4.1 ชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าชังข้าวโพดตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์เพสต์

ร้อยละการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้าชานอ้อย (กรัม)	น้ำ
0%	650.0	0	แล้วแต่กำหนด
5%	617.5	32.5	แล้วแต่กำหนด
10%	585.0	65.0	แล้วแต่กำหนด
15%	552.5	97.5	แล้วแต่กำหนด
20%	520.0	130.0	แล้วแต่กำหนด
25%	487.5	162.5	แล้วแต่กำหนด
30%	455	195	แล้วแต่กำหนด

ตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนด ปริมาณน้ำที่กำหนดอาจเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตกลงอย่างอิสระและจมลงในซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นก็เพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงมากกว่า 10 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองต้องมีอย่างน้อยสามค่า

3.2.4.2 ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม

3.2.4.3 ใส่น้ำที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสมจนหมด

3.2.4.4 ใส่ปูนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมเก้าลงไปในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำแล้วทิ้งไว้ 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาที แล้วจึงเดินเครื่องผสมโดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

3.2.4.5 หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดปูนซีเมนต์ที่ติดข้างหม้อลงยังก้นหม้อ

3.2.4.6 เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 1 นาที

3.2.4.7 ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือสองข้าง นำซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสม จากนั้นปั้นให้เป็นก้อนกลมๆโยนสลับมือในแนวราบเป็นระยะห่างกันประมาณ 15 ซม. จำนาน 6 ครั้ง

3.2.4.8 นำซีเมนต์เพสต์ใส่ยังแบบรูปกรวยโดยใส่จากด้านฐานเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง

3.2.4.9 ปาดซีเมนต์เพสต์ที่เกินออกมาทางด้านปลายกรวยด้วยเกรียงเหล็ก โดยปาดเพียงครั้งเดียว เมื่อปาดเสร็จแล้วหากผิวหน้ายังไม่เรียบให้ใช้เกรียงปาดแต่งผิวหน้าเบาๆ ระวังอย่าใช้เกรียงกดบนผิวของซีเมนต์เพสต์จากนั้นนำไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคต

3.2.4.10 เลื่อนก้านเข็มไวแคตลงมาจนกระทั่งปลายเข็มสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์แล้วยึดก้านเข็มไวแคตให้แน่น จากนั้นปรับสเกลบอกระยะ

3.2.4.11 คลายสกรูเพื่อให้เข็มตกอย่างอิสระและจมเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาทีแล้วให้หมุนสกรูยึดก้านเข็มไวแคต แล้วอ่านค่าว่าเข็มนั้นจมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นระยะเท่าไร

3.2.4.12 ปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติคือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที เมื่ออ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมลงไม่ถึง 10 มิลลิเมตร ครั้งต่อไปก็เพิ่มน้ำ แต่ถ้าอ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมลงเกิน 10 มิลเมตร ครั้งต่อไปก็ลดน้ำลง อย่างน้อยต้องให้ได้ 3 ค่า เมื่อได้ ปริมานน้ำข้นเหลวปกติแล้วก็เอาไปหาระยะเวลาการก่อตัวต่อไป ส่วนซีเมนต์ผสมเก้านั้นก็ทำเหมือนกัน

3.2.5 วิธีการทดลองการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.2.5.1 ชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าเหมือนกันกับการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ตวงน้ำตามที่ได้จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3.2.5.2 ทำการผสมซีเมนต์เหมือนกันกับการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3.2.5.3 ปรับเครื่องทดสอบไวแคตโดยการปรับก้านเข็มและใส่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.2.5.4 นำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วโยนสลับมือ 6 ครั้งนำใส่ซีเมนต์เพสต์เข้าไปในแบบกรวยปาดหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบจากนั้นทิ้งไว้ในที่ที่มีความชื้นสูง 30 นาที

3.2.5.5 เมื่อครบ 30 นาที จึงนำตัวอย่างไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคตปรับระยะเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มม. ให้ลงมาสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์ปรับสเกลระยะให้เป็นศูนย์

3.2.5.6 ปล่อยให้เข็มไวแคตตกลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบแล้วให้ยึดก้านเข็มไวแคตแล้วอ่านค่าระยะจมทำการทดสอบหาระยะจมทุกๆ 15 นาทีจนกระทั่งได้ระยะจมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างที่ทำการทดสอบต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 6.5 มม. และต้องห่างจากขอบของแบบไม่น้อยกว่า 9.5 มม. ระหว่างการทดสอบอย่าให้มีการสั่นสะเทือน

3.2.5.7 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตถูกปล่อยให้จมลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 นาที และจมลงได้ระยะ 25 มิลลิเมตร ส่วนเวลาการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตไม่สามารถจมลงได้

3.3 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3.3.1.2 กระบอกตวงน้ำ

3.3.1.3 แบบหล่อมอร์ตาร์

3.3.1.4 เครื่องร่อนทราย, ตะแกรงร่อนทรายมาตรฐานเบอร์ 30 และ 100

3.3.1.5 เครื่องผสมมอร์ตาร์

3.3.1.6 ถาดอลูมิเนียม

3.3.1.7 อุปกรณ์สำหรับผสม เช่น เกรียงเหล็ก, ที่ตักวัสดุ, ที่ปาดวัสดุ, ไม้กระทุ้ง

3.3.1.8 เครื่องทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

3.3.1.9 ชุดการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์

3.3.1.10 ไม้บรรทัด

3.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.3.2.2 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างเบอร์ 100

3.3.2.3 เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงาน น้ำตาล พิษณุโลก

3.3.2.4 น้ำสะอาด

3.3.2.4 ปูนขาว สำหรับทำน้ำปูนขาวอิ่มตัว

3.3.2.5 น้ำมันเครื่อง

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างแบบหล่อ

3.3.3.1 ทำความสะอาดแบบหล่อให้สะอาด

3.3.3.2 ใช้ผ้าหรือแปรงขนอ่อนชุบน้ำมันเครื่องที่ค่อนข้างใส

3.3.3.3 บริเวณรอยต่อหรือมุมของแบบหล่อที่อาจมีรอยรั่ว

3.3.4 วิธีการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

3.3.4.1 ทาน้ำมันเครื่องภายในแบบหล่อบางๆ

3.3.4.2 เตรียมส่วนผสมตามตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์รับแรงอัด 6 ก้อน

ร้อยละการแทนที่ของเถ้าชังข้าวโพด	ปูนซีเมนต์(กรัม)	เถ้าชานอ้อย(กรัม)	ทราย(กรัม)	น้ำ(มิลลิลิตร)
0%	500	0	1375	400
5%	475	25	1375	425
10%	450	50	1375	435
15%	425	75	1375	445
20%	400	100	1375	450
25%	375	125	1375	460
30%	350	150	1375	460

3.3.4.3 ประกอบหม้อผสมและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่อง

3.3.4.4 ใส่น้ำลงในหม้อผสม จากนั้นใส่ปูนซีเมนต์แล้วเดินเครื่องผสมโดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

3.3.4.5 เมื่อครบแล้วจึงใส่ทรายลงไปอย่างช้าๆภายในเวลา 30 วินาที

3.3.4.6 หยุดเครื่องผสม แล้วเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที

3.3.4.7 หยุดเครื่องผสมแล้วปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้ 90 วินาที โดยต้องหาภาชนะมาปิด เพื่อป้องกันความชื้นระเหยออก

3.3.4.8 เดินเครื่องด้วยอัตราเร็วปานกลางอีก 1 นาทีเป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

3.3.4.9 นำมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จทำการทดสอบหาค่าการไหล ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบทดสอบชั้นแรกหนาประมาณ 25 มม. กระทุ้งด้วยไม้จำนวน 20 ครั้ง จากนั้นใส่ชั้นที่สองกระทุ้งมอร์ตาร์อีก 20 ครั้ง ใช้เกรียงปาดหน้าผิวให้เรียบ (หากมีน้ำไหลออกใต้ฐานแบบใช้ผ้าเช็ดให้แห้ง) ยกแบบขึ้นในแนวดิ่งช้าๆ

3.3.4.10 หมุนโต๊ะการไหลจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที มอร์ตาร์จะแผ่เป็นวงกลม ใช้ไม้บรรทัดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้ง ตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา ให้ค่าทดสอบอยู่ระหว่าง 110±5 มม.

3.3.4.11 นำมอร์ตาร์มาใส่แบบหล่อที่เตรียมไว้โดยใช้เกรียงตักมอร์ตาร์ลงในแบบชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร กระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างภายในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ รอบละ 8 ครั้งเมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จ จึงใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้เต็มแล้วกระทุ้งเหมือนเดิม รวมทั้งหมด 64 ครั้งต่อ 1 ก้อน แล้วใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าส่วนที่เกินออกมา

3.3.4.12 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก แล้วนำไปบ่มโดยการแช่น้ำที่ใส่ปูนขาวลงไป ทำการทดสอบกำลังอัด ที่ 1,3,7,28,50 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดให้เช็ดด้วยผ้าให้แห้ง และเลือกด้านที่เรียบที่สุดสองด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงอัด

3.4 การทดสอบกำลังดึงมอร์ตาร์

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3.4.1.2 กระบอกตวงน้ำ

3.4.1.3 แบบหล่อมอร์ต้าร์รูปบริเคต

3.4.1.4 เครื่องร่อนทราย, ตะแกรงร่อนทรายมาตรฐานเบอร์ 20 และ 30

3.4.1.5 ถาดอลูมิเนียม

3.4.1.6 อุปกรณ์สำหรับผสม เช่น เกรียงเหล็ก, ที่ตักวัสดุ, ที่ปาดวัสดุ, ไม้กระทุ้ง

3.4.1.7 เครื่องทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์รูปบริเคต

3.4.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.4.2.2 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างเบอร์ 30

3.4.2.3 เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงาน น้ำตาล พิษณุโลก

3.4.2.4 น้ำสะอาด

3.4.2.4 ปูนขาว สำหรับทำน้ำปูนขาวอิ่มตัว

3.4.2.5 น้ำมันเครื่อง

3.4.3 วิธีการทดสอบกำลังดึงมอร์ตาร์รูปบริเคต

3.4.3.1 ทาน้ำมันเครื่องภายในแบบหล่อบางๆ

3.4.3.2 เตรียมส่วนผสมตามตาราง 3.2

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับมอร์ตาร์รับแรงดึง 6 ก้อน

ร้อยละการแทนที่ของเถ้าชังข้าวโพด	ปูนซีเมนต์(กรัม)	เถ้าชานอ้อย(กรัม)	ทราย(กรัม)	น้ำ(มิลลิลิตร)
0%	300	0	900	128.594
5%	285	15	900	129.590
10%	270	30	900	131.856
15%	255	45	900	133.176
20%	240	60	900	134.630
25%	225	75	900	135.710
30%	210	90	900	137.590

3.4.3.3 นำปูนซีเมนต์และทรายผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำส่วนผสมของ ปูน-ทราย ให้คล้ายๆ กับปล่องภูเขาไฟ ค่อยๆ เติมน้ำใสในปล่อง ปูน-ทราย ตักส่วนผสมที่อยู่ด้านฐานของปล่องภูเขาไฟไปตรงกลางปล่องผสมกับน้ำ ใช้เวลาไม่เกิน 30 วินาที

3.4.3.4 ปล่อย ปูน-ทราย ทิ้งไว้ 30 วินาที เมื่อครบใช้มือทั้งสองข้างผสม ปูน-ทราย และน้ำให้เข้ากันอย่างทั่วถึงใช้เวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที

3.4.3.5 นำมอร์ตาร์ผสมเสร็จแล้ว ใส่แบบหล่อรูปบริเคต ใช้นิ้วหัวแม่มือทั้ง 2 นิ้วกดลงบนมอร์ตาร์จำนวน 12 ครั้งให้กระจายทั่วแบบหล่อ โดยมีแรงกดสม่ำเสมอ 6.75.9 กก.

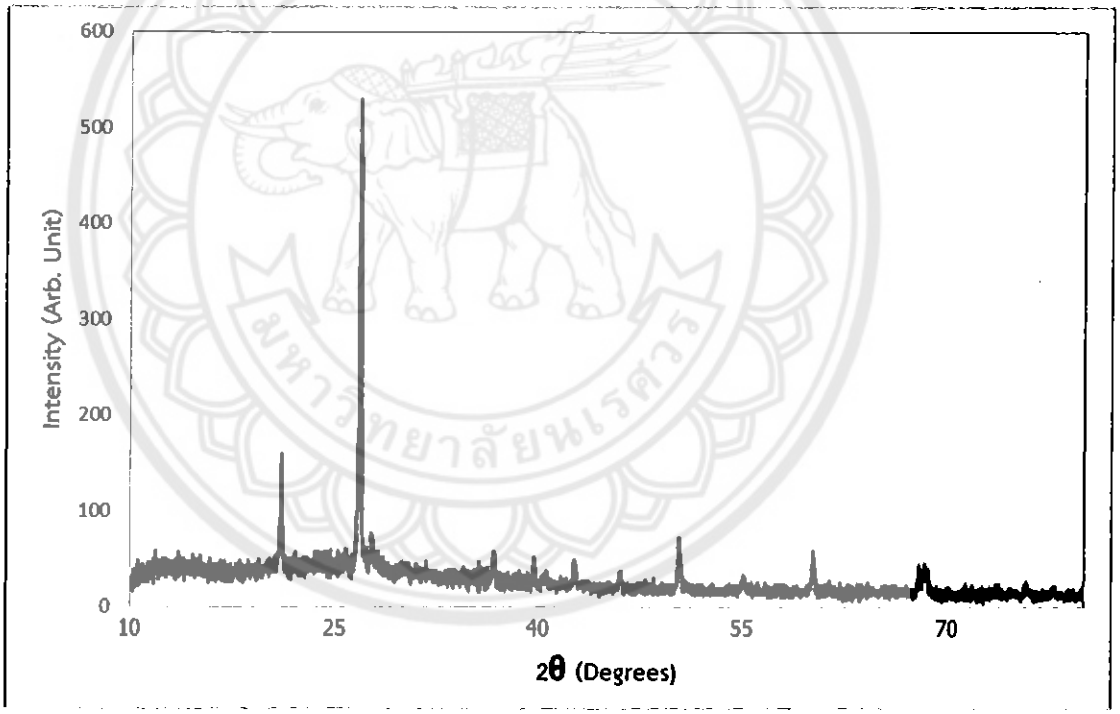
3.4.3.6 ปาดมอร์ตาร์ส่วนที่เกินออก จากนั้นใช้เกรียงปาดผิวหน้าโดยใช้แรงไม่เกิน 1.8 กก. ยึดแบบหล่อให้แน่นแล้วพลิกแบบหล่อ ใช้นิ้วแม่มือทั้ง 2 ข้างกดมอร์ตาร์อีกรอบครบ 12 ครั้ง ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3.4.3.7 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก แล้วนำไปบ่มโดยการแช่น้ำที่ใส่ปูนขาวลงไป ทำการทดสอบกำลังอัด ที่ 3,7,14,28,50 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดให้เช็ดด้วยผ้าให้แห้ง และนำไปทดสอบรับแรงดึง

บทที่ 4

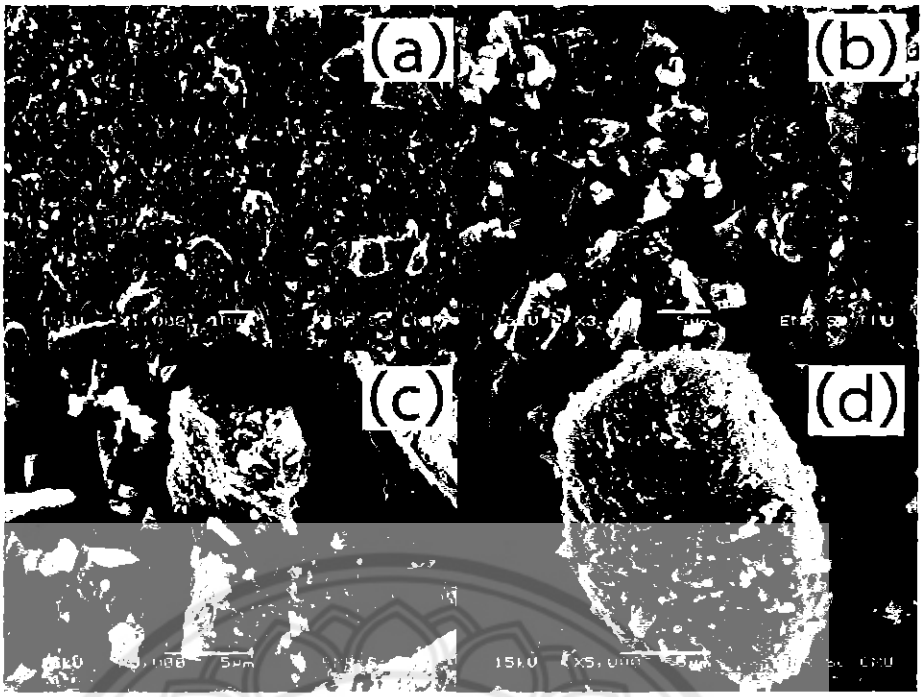
ผลการทดลองและวิเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (OPC) เถ้าชานอ้อย จะเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย แสดงให้เห็นว่า เถ้าชานอ้อย มีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 90.6981% ซึ่งมากกว่าความต้องการทางเคมีของข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618 ผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน (ซึ่งผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ต้องสูงกว่า 70%) และจากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากของตัวอย่างเถ้าชานอ้อย แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของควอตซ์ มีทั้ง Crystalline Silica และ Amorphous Phase



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ เถ้าชานอ้อย

รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของเถ้าชานอ้อยแสดงใน รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเถ้าชานอ้อย พบว่าเป็นรูปทรงเหลี่ยมและเกิดการกระจายอนุภาคค่อนข้างสูง มีอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็กปะปนกัน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF และ XRD แสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยมีผลรวมองค์ประกอบของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 สูง และ มีเฟสของซิลิกาอสัณฐาน ปัจจัยเหล่านี้ ทำให้สรุปได้ว่า เถ้าชานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ Pozzalan ในการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์



รูปที่ 4.2 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของเถ้าชานอ้อย (a)กำลังขยาย x1,000, (b)กำลังขยาย x3,000, (c)กำลังขยาย x5,000, (d)กำลังขยาย x5,000

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ,ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของ ซีเมนต์ , เถ้าชานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ซีเมนต์ (OPC)	เถ้าชานอ้อย
Silicon dioxide (SiO_2)	20.71	79.2588
Aluminum oxide (Al_2O_3)	5.16	9.2089
Iron oxide (Fe_2O_3)	3.22	2.2304
Calcium oxide (CaO)	66.23	1.9725
Magnesium oxide (MgO_2)	0.95	0.1645
Potassium oxide (K_2O)	0.48	5.0642
Sodium oxide (Na_2O)	0.19	-
Sulfur trioxide (SO_3)	2.14	0.5006
Phosphorus pentoxide (P_2O_5)	-	1.0944
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	-	90.6981
Mean grain size (μm)	15.37	29.93
BET specific surface area (m^2/g)	3,200	38.85

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อย ทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM C187 ผลที่ได้แสดงไว้ใน ตาราที่ 4.2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (OPC) จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความพรุนและพื้นที่ผิวของเถ้าชานอ้อย มากกว่า OPC อย่างไรก็

ตามข้อกำหนดสำหรับมาตรฐานวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต (ASTM C618) ได้กำหนดปริมาณน้ำที่เหมาะสมไว้ต้องไม่เกิน 115% ของตัวอย่างอ้างอิงซึ่งในกรณีการวิจัยนี้ค่ามาตรฐานของปริมาณน้ำที่เหมาะสมต้องไม่เกิน 29.09% จากผลที่แสดงไว้ในตารางอัตราส่วนร้อยละของเถ้าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าเข้าไปที่ร้อยละ 30% จะสังเกตว่าปริมาณน้ำเกินตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ดังนั้นสิ่งนี้จึงเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในงานคอนกรีต

อัตราส่วน Water/Binder ที่ Normal Consistency เป็นวิธีการทดลองที่ถูกนำมาใช้การทดสอบหาเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ (Initial Sitting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ (Final Sitting Time) โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในกรณีของ Reference เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ (Initial Sitting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time) เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวเนื่องจากการเพิ่มแทนที่ ของเถ้าชานอ้อย ในอัตราส่วนร้อยละ สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์การแทนที่ของเถ้าชานอ้อย ก็จะไปลดปริมาณซีเมนต์ซึ่งจะทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ช้าลงส่งผลให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น และในกรณีเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าทำให้ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงทำให้น้ำระเหยได้ช้า จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น

ตารางที่ 4.2 Water/binder ratio, เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Sitting Time) และเวลาก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time) ของ Cement Paste และ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อย ที่ร้อยละต่างๆ

ตัวอย่าง	% เถ้าที่แทนที่	อัตราส่วน Water/binder ที่ normal consistency	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	เวลาการก่อตัวระยะปลาย(นาที)
Reference	0	25.297	96	120
เถ้าชานอ้อย	5	25.795	99	135
	10	26.928	109	135
	15	27.588	111	135
	20	28.315	142	165
	25	28.855	149	180
	30	29.795	154	180

กำลังอัดมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละต่างๆแสดงในตาราง 4.3, รูปที่ 4.3 ตามลำดับ จะเห็นแนวโน้มของกำลังอัดซึ่งแรงอัดที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าชานอ้อยในร้อยละต่างๆ จากกรณีที่ใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ระยะการบ่มในเวลาต่าง จะมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าชานอ้อย ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ซึ่งทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (รูปที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อนอยู่ 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหา pozzolanic activity index ได้เท่ากับ 79% ซึ่งมากกว่าค่าที่ ASTM C618 กำหนดไว้ คือ 75% แสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

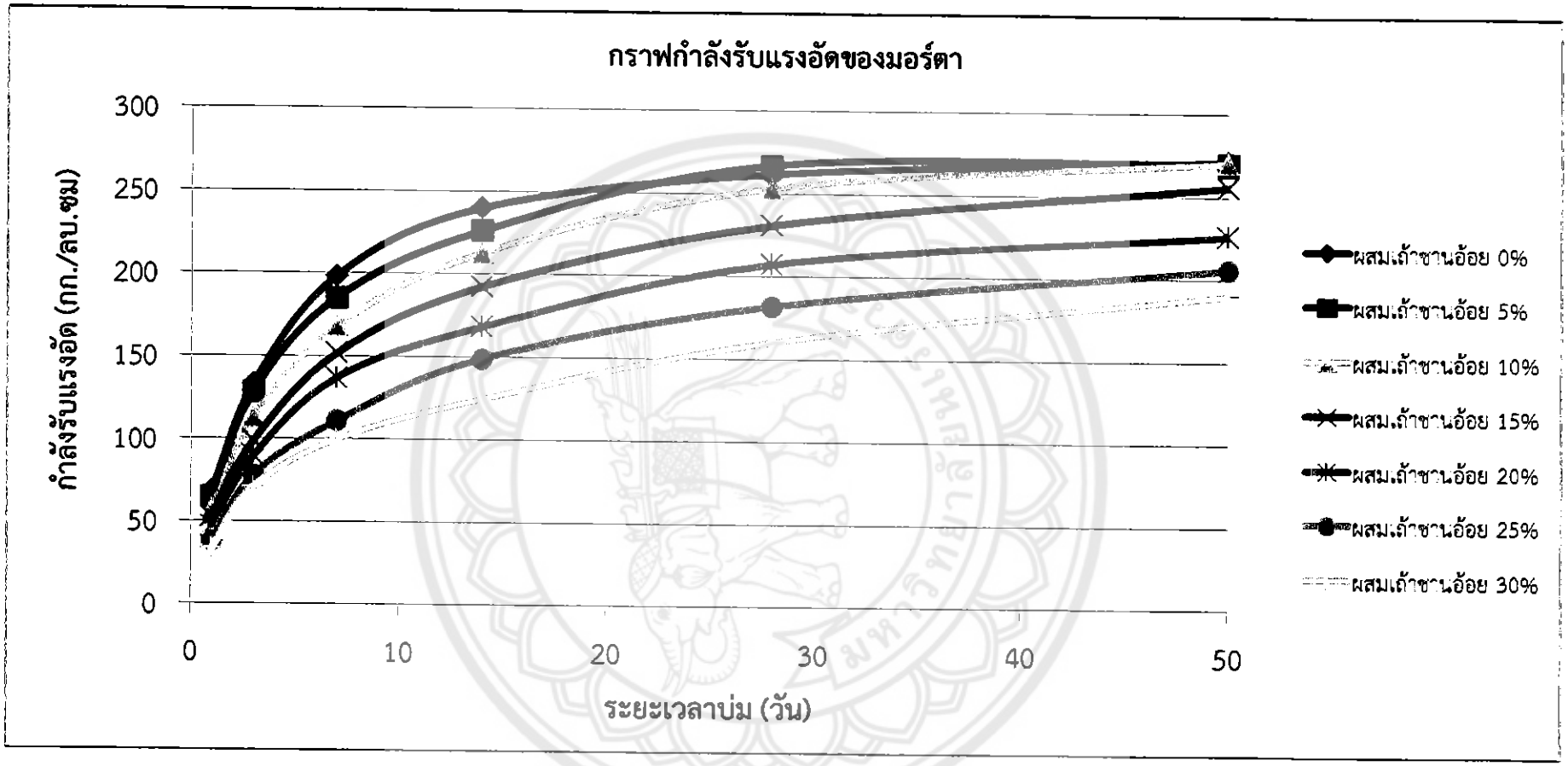
การรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละต่างๆแสดงในตาราง 4.4, รูปที่ 4.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการรับแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มของทุกตัวอย่าง อย่างไรก็ตามการรับแรงดึงของมอร์ตาร์ไม่ถูกนำมาใช้และถูกยกเลิกมาตรฐานในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อย ที่อัตราส่วนต่างๆ

% เถ้าชานอ้อย	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	50 วัน
	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)	กำลังอัด (ก.ก./ ตร.ซ.ม.)
0	67.992	132.956	198.342	239.769	261.702	271.152
5	64.957	128.233	185.097	225.933	266.932	270.139
10	56.860	112.878	167.717	212.599	253.096	270.479
15	52.134	98.536	151.346	192.181	230.656	255.797
20	46.228	89.256	136.670	167.887	207.200	226.103
25	38.128	77.948	110.853	148.648	181.893	205.851
30	33.068	70.523	99.755	124.523	160.126	190.326

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อย ที่อัตราส่วนต่างๆ

% เถ้าชานอ้อย	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	50 วัน
	กำลังรับแรงดึง (กก.)	กำลังรับแรงดึง (กก.)	กำลังรับแรงดึง (กก.)	กำลังรับแรงดึง (กก.)	กำลังรับแรงดึง (กก.)
0	119.324	136.245	165.593	182.613	162.992
5	109.353	124.970	167.544	211.561	162.344
10	119.545	141.927	187.638	208.361	216.706
15	100.460	120.703	170.830	174.161	214.864
20	107.297	148.005	177.118	162.865	218.825
25	96.657	113.443	157.596	159.693	208.979
30	102.613	134.059	152.685	193.026	199.597



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาการบ่มของการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรูรังผึ้งคอนกรีตผสมเส้นใยกล้วยที่ระยะเวลาแช่น้ำต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบต่างๆที่ได้ดำเนินการมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ค่าผลรวมของสารประกอบ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับ 90.6581% ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C618-03 ที่กำหนดไว้ที่ 70%

5.2 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการใช้ เถ้าชานอ้อยทำให้เกิดความต้องการน้ำ , เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Sitting Time) และเวลาการก่อระยะปลาย(Final Sitting Time) ของ Cement Paste เพิ่มขึ้น

5.3 ค่า Pozzolanic Activity Index ซึ่งคำนวณจากค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีสัดส่วนของเถ้าชานอ้อยผสมอยู่ร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับค่าของตัวควบคุมที่ 28 วัน เท่ากับ 79% ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C618-03 ที่กำหนดไว้ที่ 75%

5.4 ค่าการทดสอบการรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าชานอ้อยผสมอยู่ในร้อยละต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มของทุกตัวอย่าง

บรรณานุกรม

1. สืบค้นจาก: http://www.ist.cmu.ac.th/riseat/archives/Jul_02/News/03070201.html [8 มีนาคม 2558]

2. INSEE Concrete Hnadbook

3. หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology

4. สราวุธ เจริญสิริเถสียร, คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงเถ้าหินปูนจากอุตสาหกรรมผลิตปูนขาว, คณะวิศวกรรมศาสตร์, วิศวกรรมโยธา, วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

5. นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้, นายเตชิต ธนภพฐากุล,นายสมชาย ชัยปลื้ม, การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกากเถ้าซังข้าวโพดด้วยความร้อนสำหรับเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

6. ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล sol-gel technology สังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ Technology Bio February-March 2010, Vol.36 No.209 หน้า 039- 043

7. รัฐพล และ ชัย การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม 2554 หน้า 369-381

8. เกียรติพงษ์ ได้การ, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

9. หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology, บทที่2, หน้าที่ 11

10. หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology, บทที่2, หน้าที่ 11

11. หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology, บทที่2, หน้าที่ 12

12. หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology, บทที่2, หน้าที่ 16

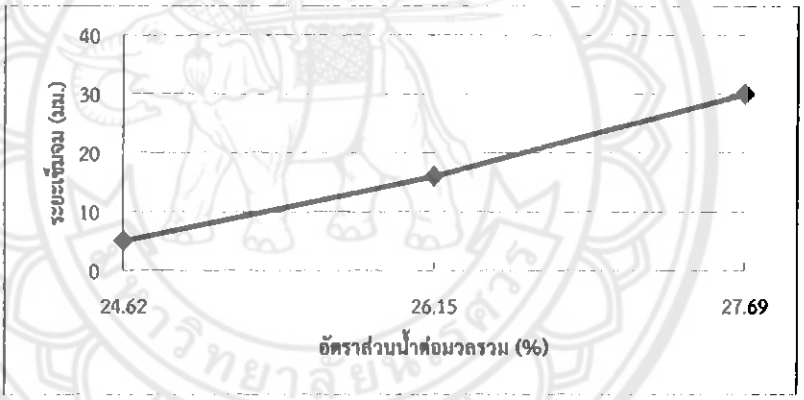
ภาคผนวก

ข้อมูลการทดลอง

การทดลอง การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0

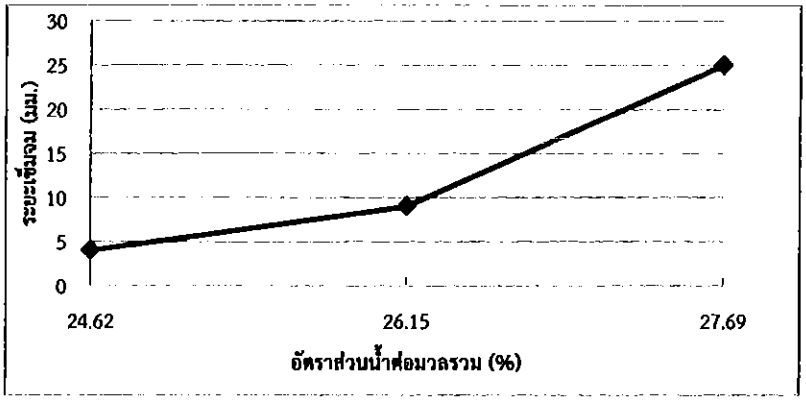
การผสมครั้งที่	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้าชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำต่อมวลรวม (%)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	650	0	160	24.62	5
2	650	0	170	26.15	16
3	650	0	180	27.69	30



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 0%

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 5

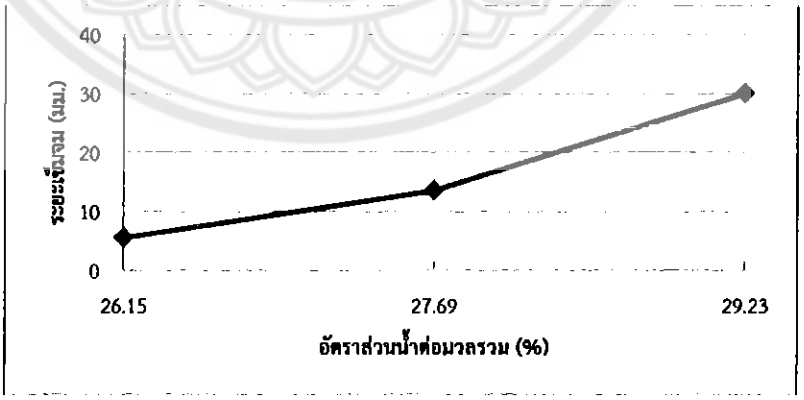
การผสมครั้งที่	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้าชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำต่อมวลรวม (%)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	617.5	32.5	160	24.62	4
2	617.5	32.5	170	26.15	9
3	617.5	32.5	180	27.69	25



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 5%

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10

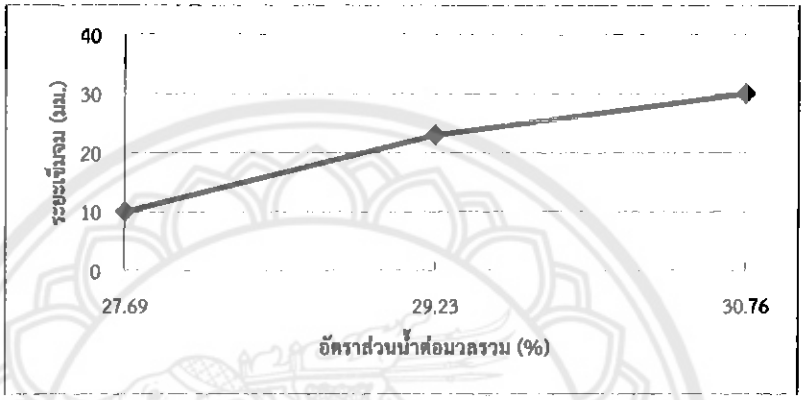
การผสมครั้งที่	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้าชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำต่อมวลรวม (%)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	585	65	170	26.15	5.5
2	585	65	180	27.69	13.5
3	585	65	190	29.23	30



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 10%

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 15

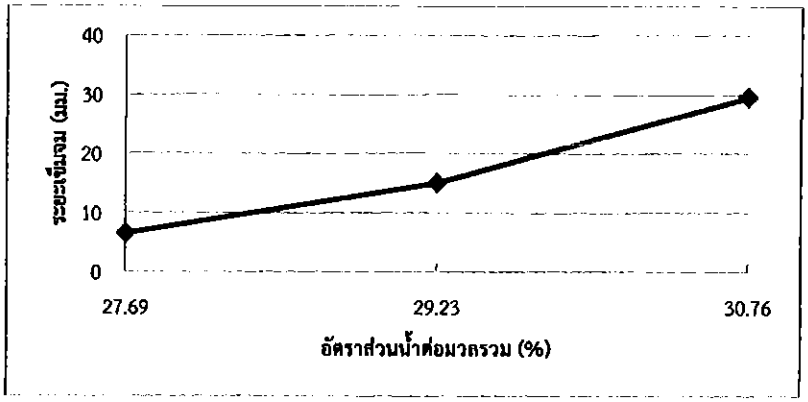
การผสมครั้งที่	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้า ชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำ ต่อมวลรวม	ระยะเข็มจม (มม.)
1	552.5	97.5	180	27.69	10
2	552.5	97.5	190	29.23	23
3	552.5	97.5	200	30.76	30



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 15%

ตารางแสดงการปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 20

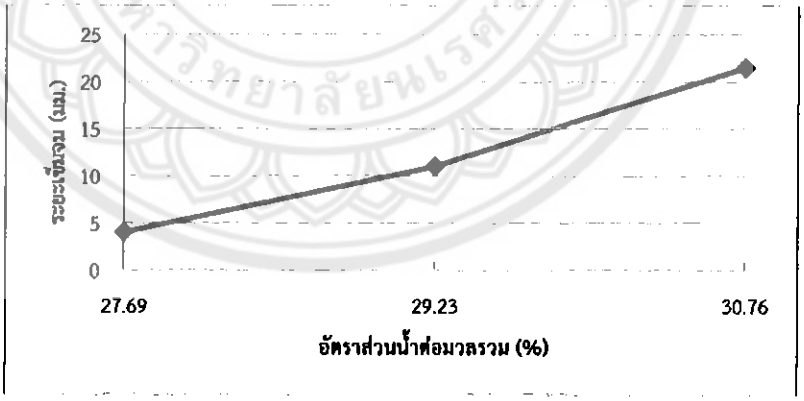
การผสมครั้งที่	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้า ชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำ ต่อมวลรวม	ระยะเข็มจม (มม.)
1	520	130	180	27.69	6.5
2	520	130	190	29.23	15
3	520	130	200	30.76	29.5



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 20%

ตารางแสดงการปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25

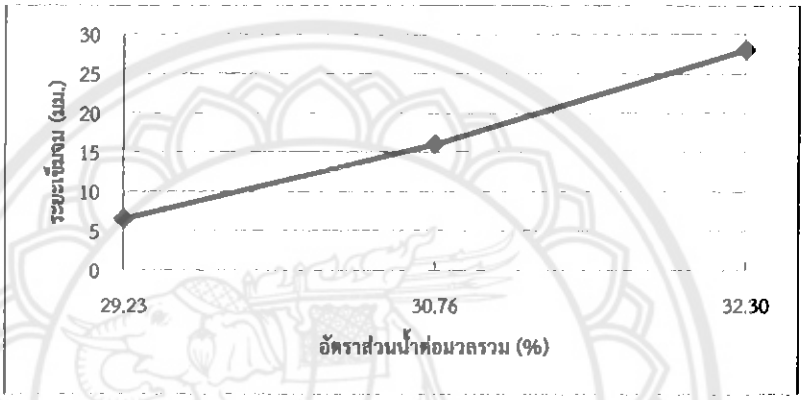
การผสมครั้งที่	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้าชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำต่อมวลรวม	ระยะเข็มจม (มม.)
1	487.5	162.5	180	27.69	4
2	487.5	162.5	190	29.23	11
3	487.5	162.5	200	30.76	21.5



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 25%

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 30

การผสมครั้งที่	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (ก.)	ปริมาณ เถ้า ชานอ้อย (ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	อัตราส่วนน้ำ ต่อมวลรวม	ระยะเข็มจม (มม.)
1	455	195	190	29.23	6.5
2	455	195	200	30.76	16
3	455	195	210	32.30	28



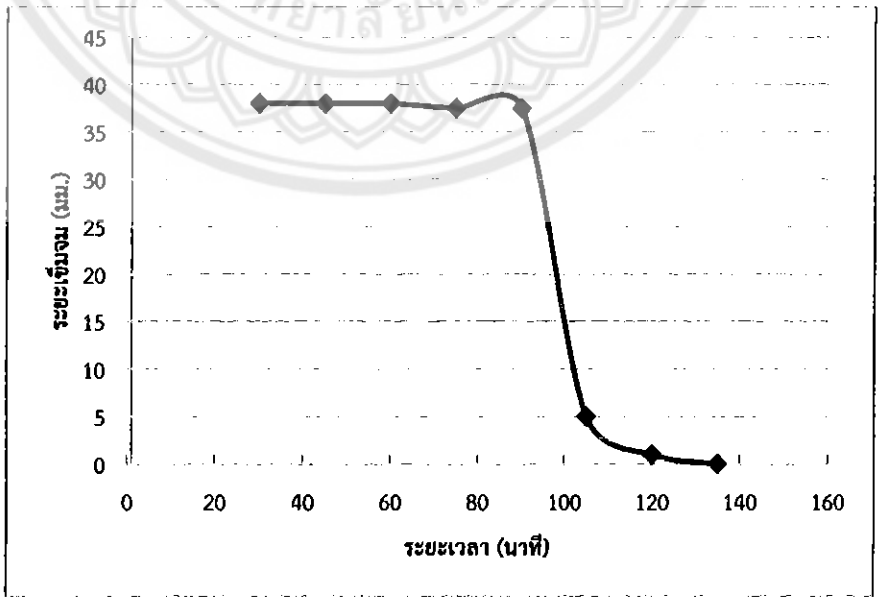
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและอัตราส่วนน้ำต่อมวลรวมด้วยการแทนที่เถ้าชานอ้อย 30%

การทดลอง การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

วันที่ทดลอง	21 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	650 ก.	**ปริมาณน้ำ**	165 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	25.297		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0

setting time test				
D/M/Y	21/12/2014		เริ่มผสม	11:16
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
650	0	165	30	38
			45	38
			60	38
			75	37.5
			90	37.5
			105	5
			120	1
			135	0

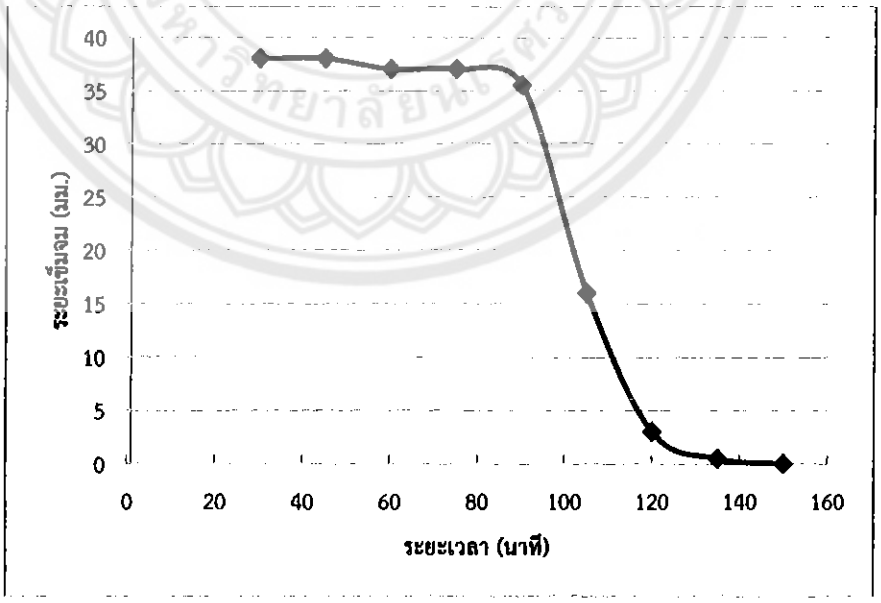


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 0%

วันที่ทดลอง	21 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	617.5 ก.	**ปริมาณน้ำ**	168 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	25.795		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 5

setting time test				
D/M/Y	21/12/2014		เริ่มผสม	11:32
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
617.5	32.5	168	30	38
			45	38
			60	37
			75	37
			90	35.5
			105	16
			120	3
			135	0.5
			150	0

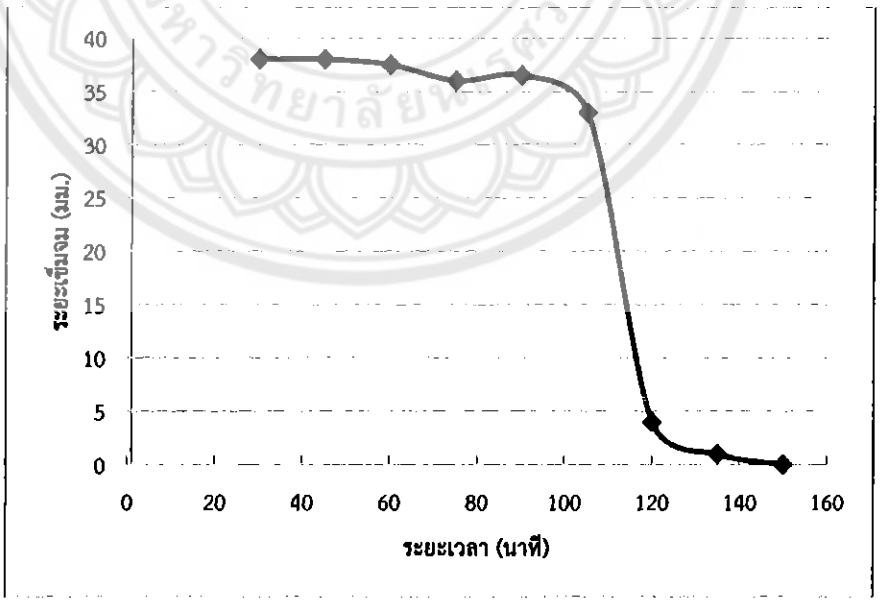


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 5%

วันที่ทดลอง	21 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	585 ก.	**ปริมาณน้ำ**	175 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	26.928		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10

setting time test				
D/M/Y	21/12/2014		เริ่มผสม	13:55
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
585	65	175	30	38
			45	38
			60	37.5
			75	36
			90	36.5
			105	33
			120	4
			135	1
			150	0

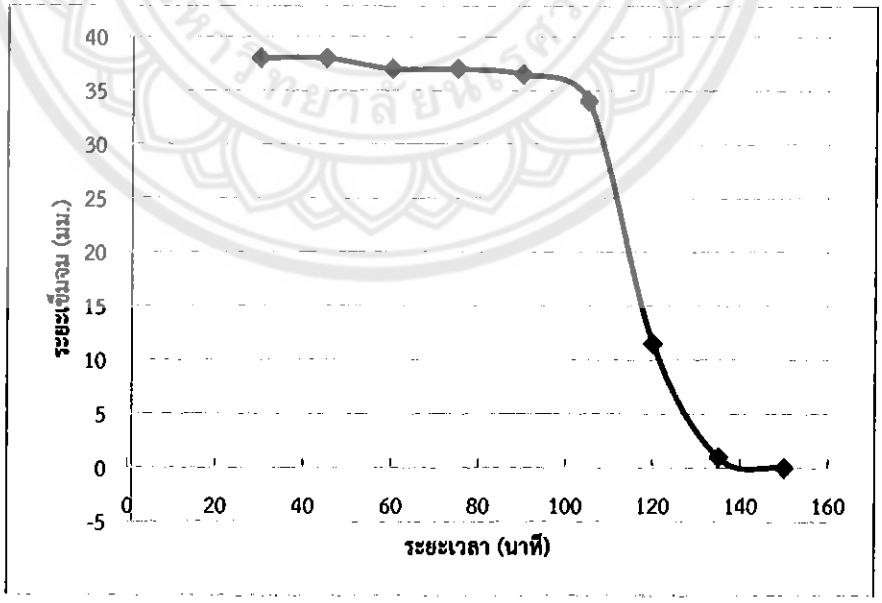


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 10%

วันที่ทดลอง	21 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	552.5 ก.	**ปริมาณน้ำ**	180 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	27.588		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 15

setting time test				
D/M/Y	21/12/2014		เริ่มผสม	14:17
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
552.5	97.5	180	30	38
			45	38
			60	37
			75	37
			90	36.5
			105	34
			120	11.5
			135	1
			150	0

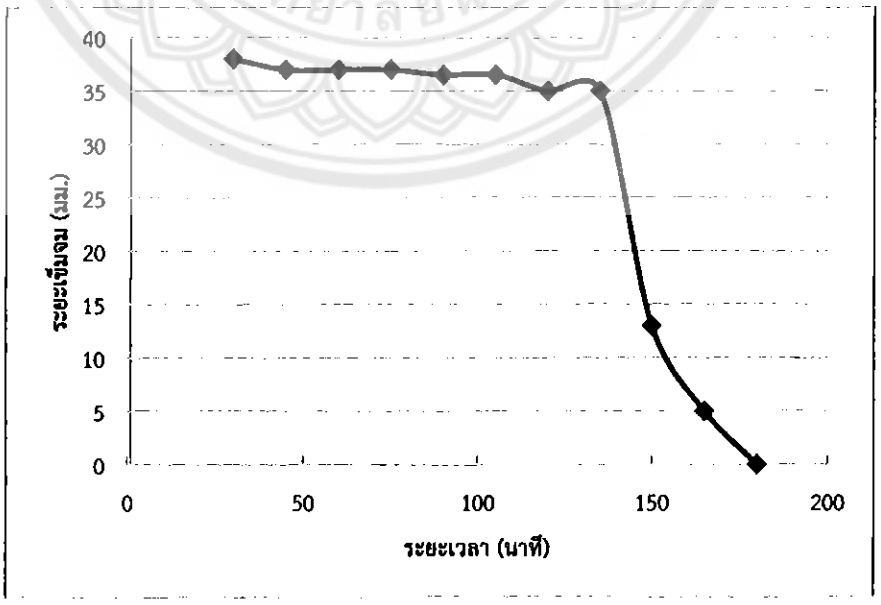


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 15%

วันที่ทดลอง	22 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	520 ก.	**ปริมาณน้ำ**	184 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	28.315		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 20

setting time test				
D/M/Y	22/12/2014		เริ่มผสม	10:43
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
520	130	184	30	38
			45	37
			60	37
			75	37
			90	36.5
			105	36.5
			120	35
			135	35
			150	13
			165	5
			180	0

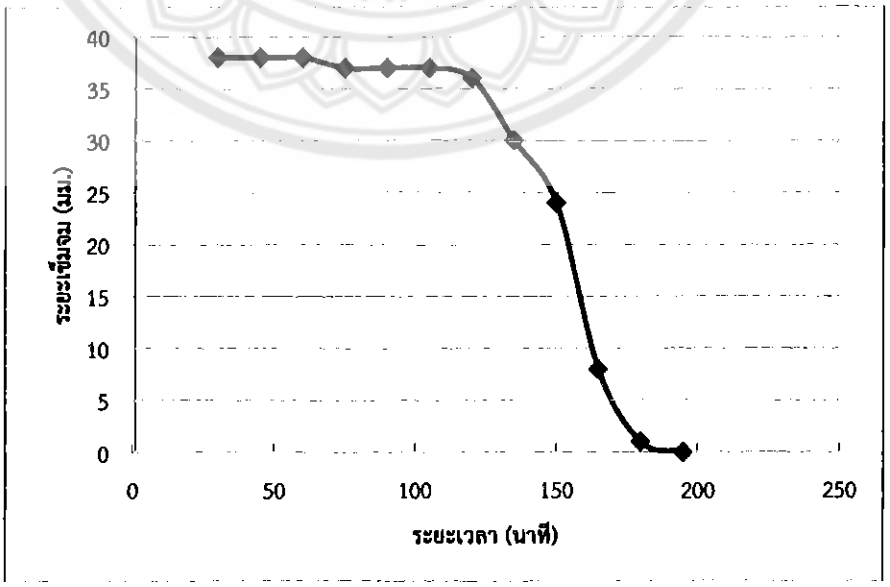


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 20%

วันที่ทดลอง	22 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	487.5 ก.	**ปริมาณน้ำ**	188 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	28.855		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25

setting time test				
D/M/Y	22/12/2014		เริ่มผสม	13:09
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
520	130	184	30	38
			45	38
			60	38
			75	37
			90	37
			105	37
			120	36
			135	30
			150	24
			165	8
			180	1
			195	0

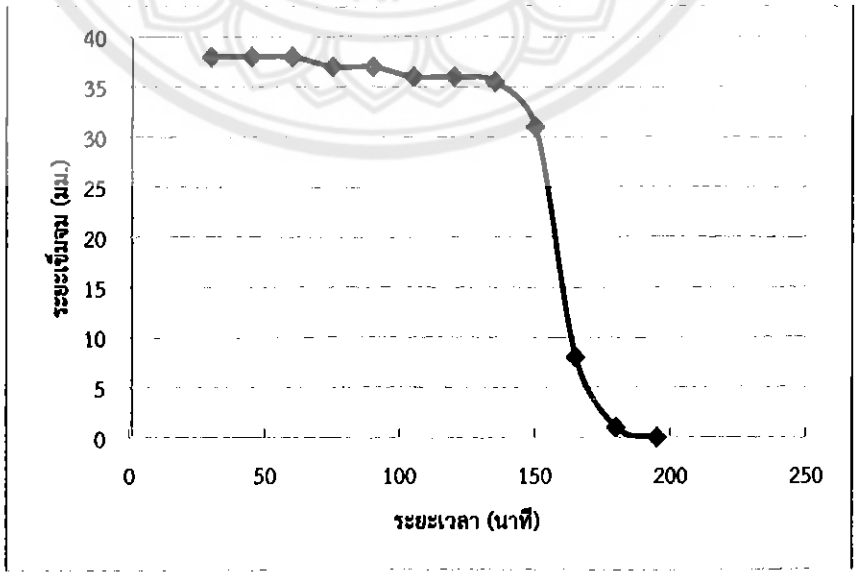


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 25%

วันที่ทดลอง	22 ธันวาคม 2557	**ลักษณะของตัวอย่าง**	ปูนซีเมนต์สีเทาดำ
น้ำหนักของปูนซีเมนต์	455 ก.	**ปริมาณน้ำ**	194 มล.
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	29.795		

ตารางแสดงการแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 30

setting time test				
D/M/Y	22/12/2014		เริ่มผสม	13:50
ปูนซีเมนต์ (ก.)	เถ้าชานอ้อย(ก.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม(มม.)
455	195	194	30	38
			45	38
			60	38
			75	37
			90	37
			105	36
			120	36
			135	35.5
			150	31
			165	8
			180	1
			195	0



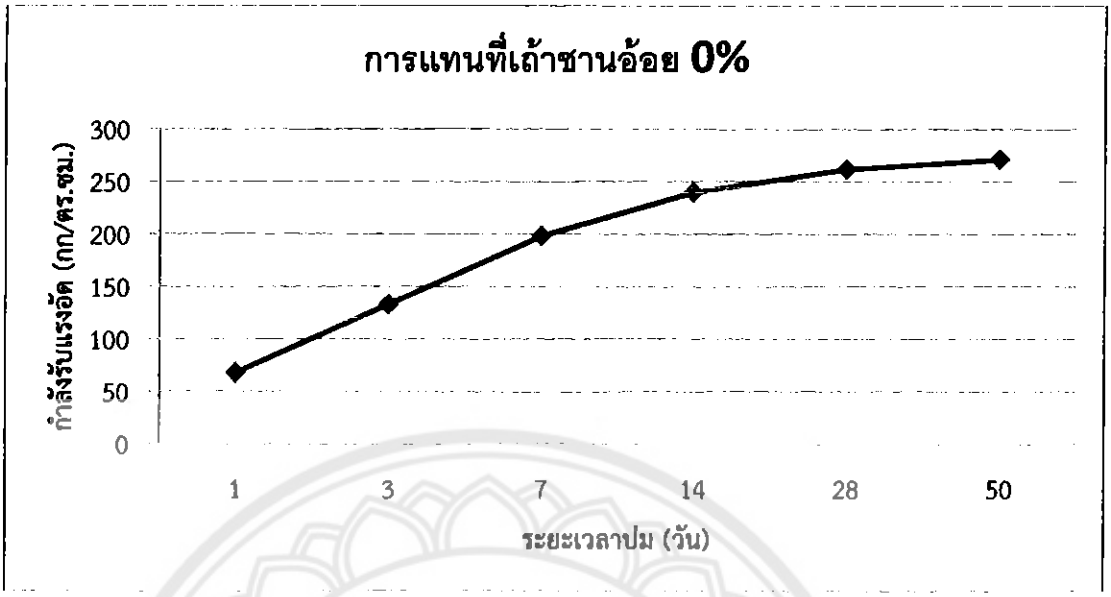
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของเข็มไวแคตและระยะเวลา
ของการแทนที่เถ้าชานอ้อย 30%

การทดลอง การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

วันที่ทดลอง 3 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 108
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	253	2.024	61.75	61.75	67.99
2	1	5.0x5.0x5.0	251.5	2.012	67.32	67.32	
3	1	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	66.81	66.81	
4	1	5.0x5.0x5.0	250.5	2.004	60.74	60.74	
5	1	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	69.85	69.85	
6	1	5.0x5.0x5.0	251	2.008	64.28	64.28	
7	3	5.0x5.0x5.0	251	2.008	120.98	120.98	132.96
8	3	5.0x5.0x5.0	247	1.976	134.65	134.65	
9	3	5.0x5.0x5.0	250	2	125.03	125.03	
10	3	5.0x5.0x5.0	250	2	118.45	118.45	
11	3	5.0x5.0x5.0	250	2	132.11	132.11	
12	3	5.0x5.0x5.0	248	1.984	132.11	132.11	
13	7	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	190.58	190.58	198.34
14	7	5.0x5.0x5.0	250	2	190.33	190.33	
15	7	5.0x5.0x5.0	247.5	1.98	189.32	189.32	
16	7	5.0x5.0x5.0	248	1.984	187.29	187.29	
17	7	5.0x5.0x5.0	251	2.008	205.01	205.01	
18	7	5.0x5.0x5.0	251	2.008	199.44	199.44	
19	14	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	127.05	127.05	239.77
20	14	5.0x5.0x5.0	256	2.048	195.89	195.89	
21	14	5.0x5.0x5.0	255	2.04	239.94	239.94	
22	14	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	232.34	232.34	
23	14	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	225.76	225.76	
24	14	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	247.02	247.02	
25	28	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	262.21	262.21	261.7
26	28	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	238.92	238.92	
27	28	5.0x5.0x5.0	258	2.064	234.36	234.36	
28	28	5.0x5.0x5.0	260	2.08	271.82	271.82	
29	28	5.0x5.0x5.0	257	2.056	251.07	251.07	
30	28	5.0x5.0x5.0	258	2.064	231.83	231.83	
31	50	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	260.69	260.69	271.15
32	50	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	268.79	268.79	
33	50	5.0x5.0x5.0	258	2.064	268.29	268.29	
34	50	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	267.27	267.27	
35	50	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	273.34	273.34	
36	50	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	271.33	271.33	

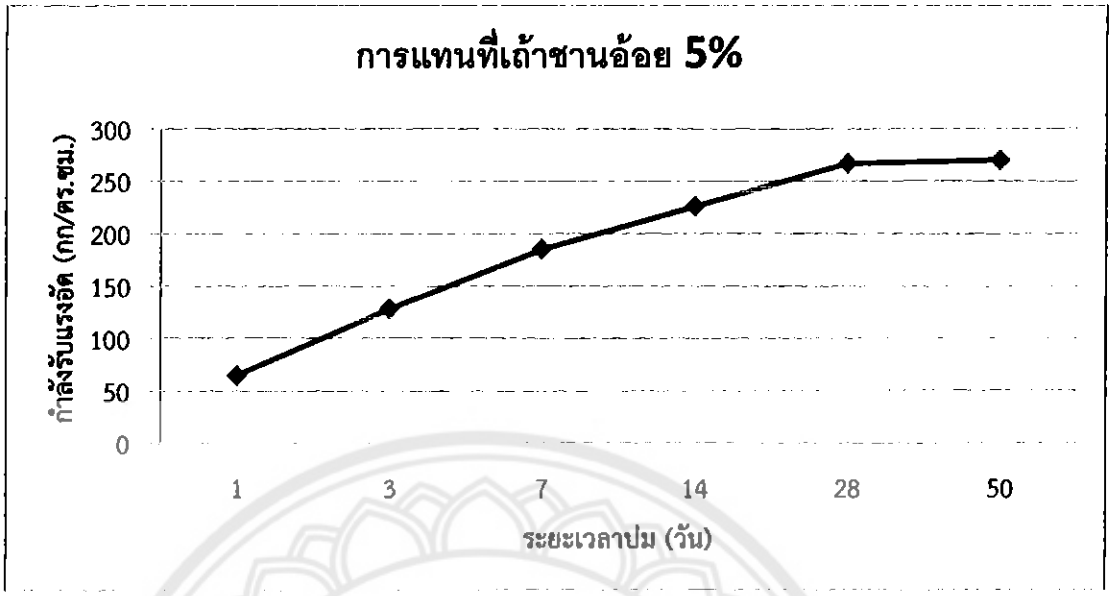


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 0%

วันที่ทดลอง 8 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 109.75
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 5

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 5							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	57.71	57.71	64.96
2	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	60.23	60.23	
3	1	5.0x5.0x5.0	255	2.04	59.72	59.72	
4	1	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	67.32	67.32	
5	1	5.0x5.0x5.0	257	2.056	65.29	65.29	
6	1	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	62.26	62.26	
7	3	5.0x5.0x5.0	252	2.016	130.09	130.09	128.23
8	3	5.0x5.0x5.0	250	2	126.03	126.03	
9	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	128.57	128.57	
10	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	125.03	125.03	
11	3	5.0x5.0x5.0	255	2.04	123.51	123.51	
12	3	5.0x5.0x5.0	256	2.048	119.46	119.46	
13	7	5.0x5.0x5.0	256	2.048	178.69	178.69	185.1
14	7	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	178.69	178.69	
15	7	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	176.66	176.66	
16	7	5.0x5.0x5.0	253	2.024	179.19	179.19	
17	7	5.0x5.0x5.0	258	2.064	188.81	188.81	
18	7	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	187.29	187.29	
19	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	220.70	220.70	225.93
20	14	5.0x5.0x5.0	258	2.064	226.27	226.27	
21	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	206.52	206.52	
22	14	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	226.78	226.78	
23	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	198.93	198.93	
24	14	5.0x5.0x5.0	260	2.08	224.75	224.75	
25	28	5.0x5.0x5.0	262	2.096	254.11	254.11	266.93
26	28	5.0x5.0x5.0	262.5	2.1	256.64	256.64	
27	28	5.0x5.0x5.0	263	2.104	276.89	276.89	
28	28	5.0x5.0x5.0	263	2.104	247.53	247.53	
29	28	5.0x5.0x5.0	264.5	2.116	267.27	267.27	
30	28	5.0x5.0x5.0	262.5	2.1	254.62	254.62	
31	50	5.0x5.0x5.0	264.5	2.116	266.77	266.77	270.14
32	50	5.0x5.0x5.0	264	2.112	271.82	271.82	
33	50	5.0x5.0x5.0	264	2.112	256.14	256.14	
34	50	5.0x5.0x5.0	263.5	2.108	261.19	261.19	
35	50	5.0x5.0x5.0	263	2.104	269.81	269.81	
36	50	5.0x5.0x5.0	264	2.112	268.79	268.79	

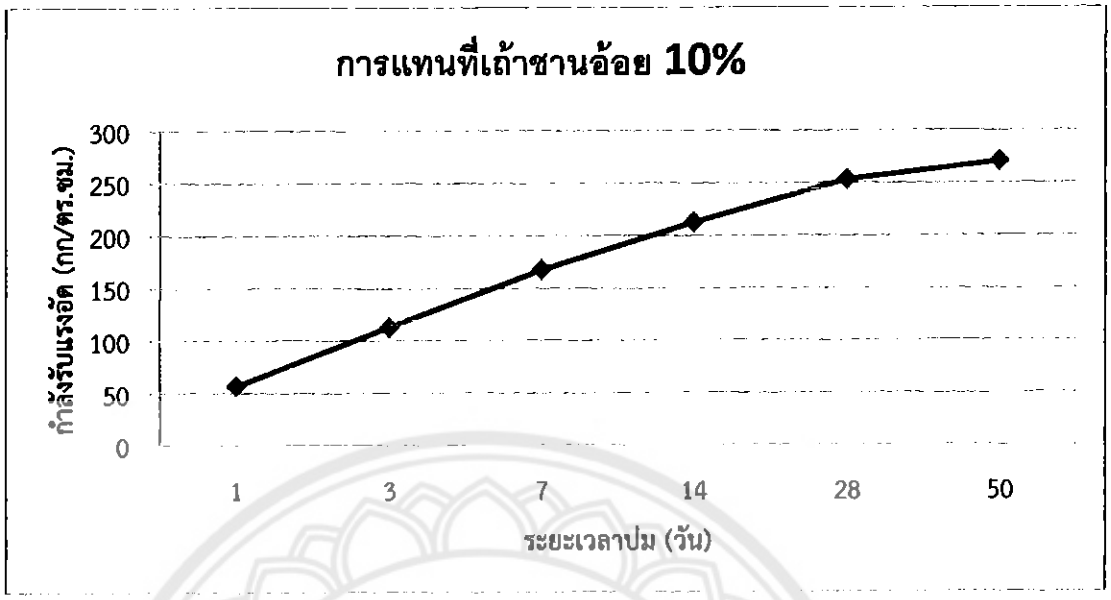


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 5%

วันที่ทดลอง 9 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 107.25
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	55.68	55.68	56.86
2	1	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	57.71	57.71	
3	1	5.0x5.0x5.0	259	2.072	57.20	57.20	
4	1	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	55.17	55.17	
5	1	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	55.17	55.17	
6	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	55.17	55.17	
7	3	5.0x5.0x5.0	253	2.024	112.87	112.87	112.88
8	3	5.0x5.0x5.0	257	2.056	110.35	110.35	
9	3	5.0x5.0x5.0	256	2.048	112.38	112.38	
10	3	5.0x5.0x5.0	255	2.04	109.34	109.34	
11	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	106.80	106.80	
12	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	113.38	113.38	
13	7	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	166.53	166.53	167.72
14	7	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	161.98	161.98	
15	7	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	166.53	166.53	
16	7	5.0x5.0x5.0	256	2.048	161.98	161.98	
17	7	5.0x5.0x5.0	254	2.032	162.49	162.49	
18	7	5.0x5.0x5.0	258	2.064	170.08	170.08	
19	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	216.15	216.15	212.6
20	14	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	195.89	195.89	
21	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	209.56	209.56	
22	14	5.0x5.0x5.0	260	2.08	204.51	204.51	
23	14	5.0x5.0x5.0	256	2.048	199.95	199.95	
24	14	5.0x5.0x5.0	258	2.064	212.09	212.09	
25	28	5.0x5.0x5.0	262	2.096	244.50	244.50	253.1
26	28	5.0x5.0x5.0	264	2.112	253.60	253.60	
27	28	5.0x5.0x5.0	263	2.104	235.88	235.88	
28	28	5.0x5.0x5.0	263	2.104	251.58	251.58	
29	28	5.0x5.0x5.0	264	2.112	254.11	254.11	
30	28	5.0x5.0x5.0	263.5	2.108	236.90	236.90	
31	50	5.0x5.0x5.0	265	2.12	269.30	269.30	270.48
32	50	5.0x5.0x5.0	264	2.112	269.81	269.81	
33	50	5.0x5.0x5.0	266	2.128	257.15	257.15	
34	50	5.0x5.0x5.0	263.5	2.108	272.33	272.33	
35	50	5.0x5.0x5.0	264.5	2.116	264.23	264.23	
36	50	5.0x5.0x5.0	263	2.104	256.64	256.64	

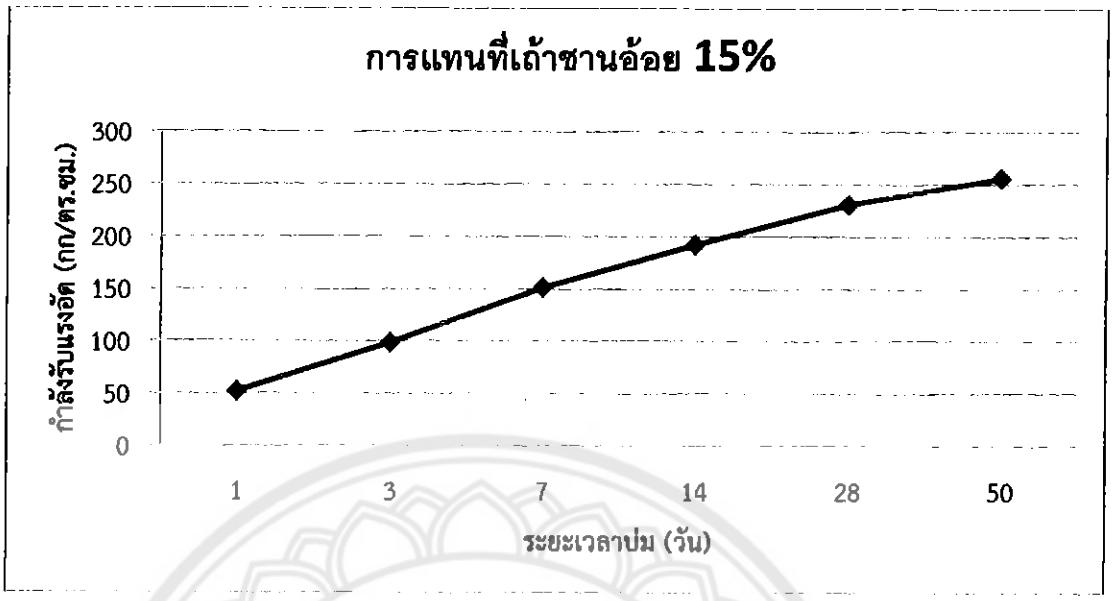


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 10%

วันที่ทดลอง	6 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง**	มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม	ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์**	114.75
ชนิดของปูนซีเมนต์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย**	ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 15

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 15							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	253.5	2.028	49.09	49.09	52.13
2	1	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	51.63	51.63	
3	1	5.0x5.0x5.0	257	2.056	50.61	50.61	
4	1	5.0x5.0x5.0	256	2.048	49.09	49.09	
5	1	5.0x5.0x5.0	256	2.048	49.60	49.60	
6	1	5.0x5.0x5.0	256	2.048	54.16	54.16	
7	3	5.0x5.0x5.0	253	2.024	97.70	97.70	98.53
8	3	5.0x5.0x5.0	255	2.04	97.19	97.19	
9	3	5.0x5.0x5.0	253	2.024	95.16	95.16	
10	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	99.71	99.71	
11	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	98.20	98.20	
12	3	5.0x5.0x5.0	253	2.024	92.12	92.12	
13	7	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	144.26	144.26	151.35
14	7	5.0x5.0x5.0	254	2.032	149.83	149.83	
15	7	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	155.90	155.90	
16	7	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	140.72	140.72	
17	7	5.0x5.0x5.0	256	2.048	148.31	148.31	
18	7	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	148.31	148.31	
19	14	5.0x5.0x5.0	258	2.064	187.80	187.80	192.18
20	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	193.36	193.36	
21	14	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	171.60	171.60	
22	14	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	190.33	190.33	
23	14	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	175.65	175.65	
24	14	5.0x5.0x5.0	258	2.064	192.85	192.85	
25	28	5.0x5.0x5.0	260.5	2.084	212.60	212.60	230.66
26	28	5.0x5.0x5.0	263	2.104	239.94	239.94	
27	28	5.0x5.0x5.0	262.5	2.1	225.76	225.76	
28	28	5.0x5.0x5.0	263.5	2.108	209.06	209.06	
29	28	5.0x5.0x5.0	260	2.08	217.16	217.16	
30	28	5.0x5.0x5.0	264	2.112	226.27	226.27	
31	50	5.0x5.0x5.0	262	2.096	246.51	246.51	255.8
32	50	5.0x5.0x5.0	262.5	2.1	240.44	240.44	
33	50	5.0x5.0x5.0	263.5	2.108	253.10	253.10	
34	50	5.0x5.0x5.0	261	2.088	256.14	256.14	
35	50	5.0x5.0x5.0	260	2.08	258.15	258.15	
36	50	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	226.78	226.78	

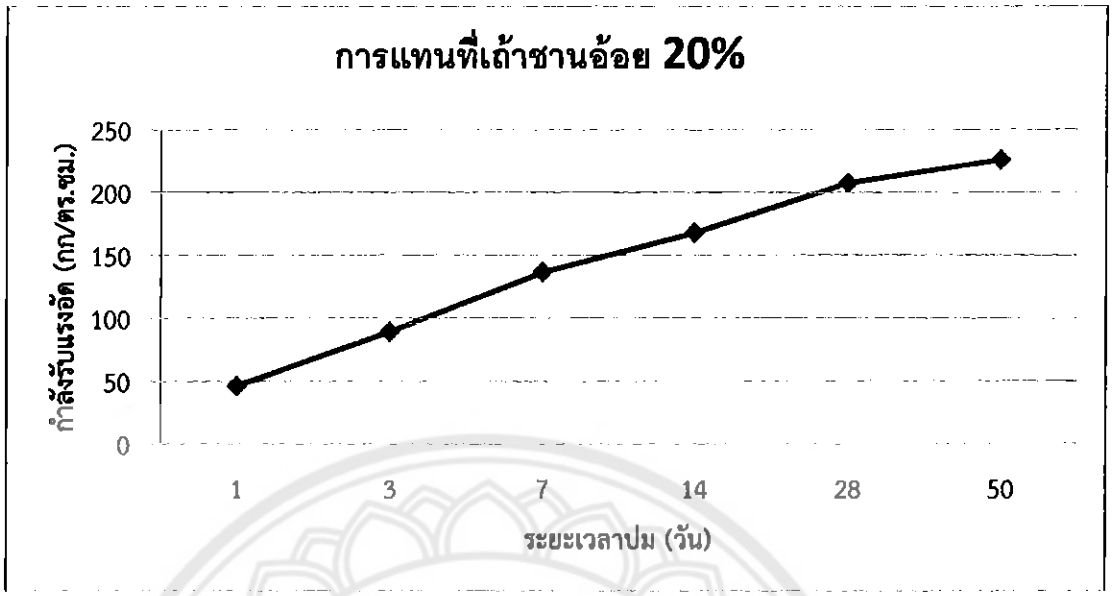


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 15%

วันที่ทดลอง 11 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 108.75
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 20

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 20							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	256	2.048	43.02	43.02	46.23
2	1	5.0x5.0x5.0	256	2.048	47.07	47.07	
3	1	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	41.51	41.51	
4	1	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	45.56	45.56	
5	1	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	45.05	45.05	
6	1	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	46.06	46.06	
7	3	5.0x5.0x5.0	249	1.992	89.08	89.08	89.26
8	3	5.0x5.0x5.0	249	1.992	90.10	90.10	
9	3	5.0x5.0x5.0	250	2	88.58	88.58	
10	3	5.0x5.0x5.0	248	1.984	88.07	88.07	
11	3	5.0x5.0x5.0	249	1.992	84.53	84.53	
12	3	5.0x5.0x5.0	250	2	86.55	86.55	
13	7	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	134.65	134.65	136.67
14	7	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	135.15	135.15	
15	7	5.0x5.0x5.0	257	2.056	140.21	140.21	
16	7	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	122.50	122.50	
17	7	5.0x5.0x5.0	256	2.048	129.07	129.07	
18	7	5.0x5.0x5.0	258	2.064	129.58	129.58	
19	14	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	162.49	162.49	167.89
20	14	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	164.52	164.52	
21	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	167.55	167.55	
22	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	167.04	167.04	
23	14	5.0x5.0x5.0	259	2.072	158.44	158.44	
24	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	169.06	169.06	
25	28	5.0x5.0x5.0	261	2.088	200.45	200.45	207.2
26	28	5.0x5.0x5.0	261	2.088	201.97	201.97	
27	28	5.0x5.0x5.0	260.5	2.084	208.04	208.04	
28	28	5.0x5.0x5.0	259	2.072	198.43	198.43	
29	28	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	208.04	208.04	
30	28	5.0x5.0x5.0	260.5	2.084	205.51	205.51	
31	50	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	217.67	217.67	226.1
32	50	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	233.86	233.86	
33	50	5.0x5.0x5.0	261	2.088	217.16	217.16	
34	50	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	216.65	216.65	
35	50	5.0x5.0x5.0	263	2.104	226.78	226.78	
36	50	5.0x5.0x5.0	260.5	2.084	216.15	216.15	

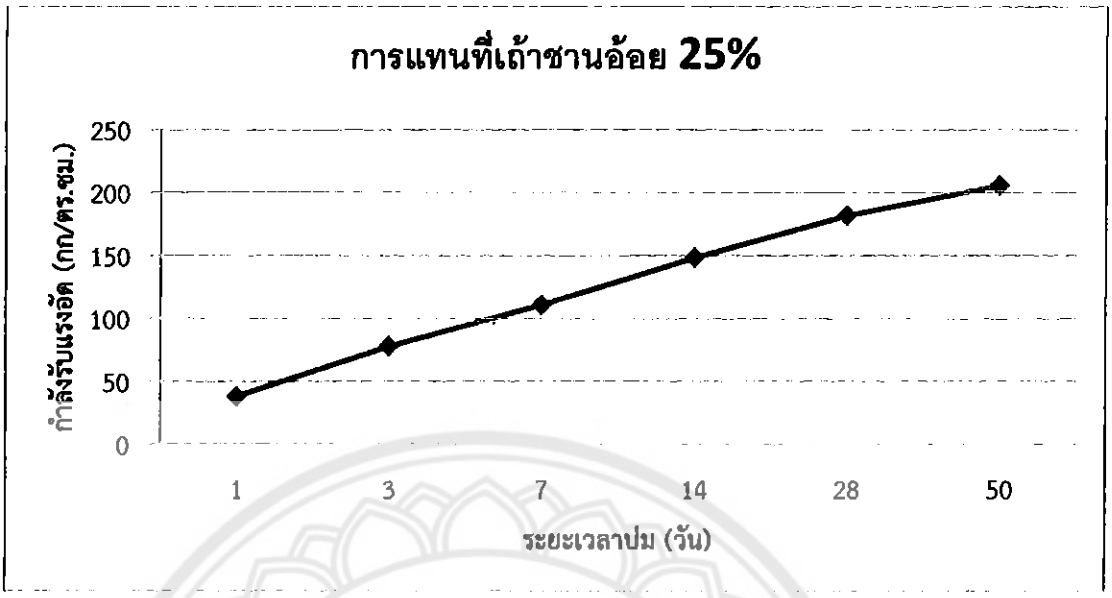


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 20%

วันที่ทดลอง 13 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 113
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	252	2.016	37.45	37.45	38.12
2	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	35.93	35.93	
3	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	36.44	36.44	
4	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	38.97	38.97	
5	1	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	36.95	36.95	
6	1	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	37.96	37.96	
7	3	5.0x5.0x5.0	249	1.992	72.88	72.88	77.95
8	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	75.92	75.92	
9	3	5.0x5.0x5.0	254	2.032	82.00	82.00	
10	3	5.0x5.0x5.0	248	1.984	68.84	68.84	
11	3	5.0x5.0x5.0	255	2.04	73.39	73.39	
12	3	5.0x5.0x5.0	248	1.984	75.92	75.92	
13	7	5.0x5.0x5.0	253.5	2.028	114.39	114.39	110.85
14	7	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	108.83	108.83	
15	7	5.0x5.0x5.0	252	2.016	108.32	108.32	
16	7	5.0x5.0x5.0	251	2.008	107.31	107.31	
17	7	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	109.34	109.34	
18	7	5.0x5.0x5.0	251.5	2.012	209.25	209.25	
19	14	5.0x5.0x5.0	256	2.048	141.73	141.73	148.65
20	14	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	146.29	146.29	
21	14	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	151.35	151.35	
22	14	5.0x5.0x5.0	258	2.064	145.28	145.28	
23	14	5.0x5.0x5.0	255	2.04	148.31	148.31	
24	14	5.0x5.0x5.0	257	2.056	146.29	146.29	
25	28	5.0x5.0x5.0	260.5	2.084	184.76	184.76	181.89
26	28	5.0x5.0x5.0	257.5	2.06	178.69	178.69	
27	28	5.0x5.0x5.0	259	2.072	175.14	175.14	
28	28	5.0x5.0x5.0	261	2.088	178.69	178.69	
29	28	5.0x5.0x5.0	256	2.048	182.23	182.23	
30	28	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	173.62	173.62	
31	50	5.0x5.0x5.0	261	2.088	206.52	206.52	205.85
32	50	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	200.45	200.45	
33	50	5.0x5.0x5.0	256.5	2.052	195.31	195.31	
34	50	5.0x5.0x5.0	256	2.048	195.31	195.31	
35	50	5.0x5.0x5.0	259	2.072	202.48	202.48	
36	50	5.0x5.0x5.0	261	2.088	208.55	208.55	

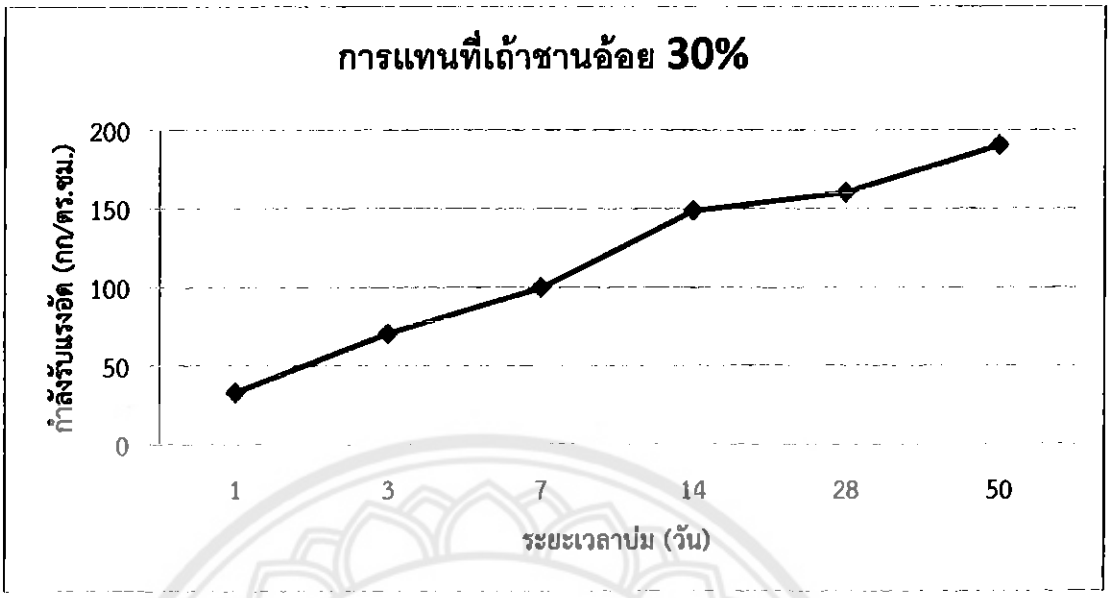


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 25%

วันที่ทดลอง 15 มกราคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม.
อัตราส่วนผสม *ซีเมนต์ 650 ก., ทราย 1,375 ก.*	**ค่าการไหลของมอร์ตาร์** 111.5
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้าง 100

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 30							
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	ขนาด (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความหนาแน่น (ก/ลบ.ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก/ตร.ซม.)	กำลังอัดประลัยที่ใช้ (กก/ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ย (กก/ตร.ซม.)
1	1	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	31.89	31.89	33.07
2	1	5.0x5.0x5.0	255	2.04	32.40	32.40	
3	1	5.0x5.0x5.0	253.5	2.028	34.41	34.41	
4	1	5.0x5.0x5.0	253	2.024	32.40	32.40	
5	1	5.0x5.0x5.0	253	2.024	31.89	31.89	
6	1	5.0x5.0x5.0	253.5	2.028	31.89	31.89	
7	3	5.0x5.0x5.0	247	1.976	68.33	68.33	70.52
8	3	5.0x5.0x5.0	251	2.008	71.37	71.37	
9	3	5.0x5.0x5.0	247	1.976	66.81	66.81	
10	3	5.0x5.0x5.0	250	2	69.85	69.85	
11	3	5.0x5.0x5.0	247	1.976	69.85	69.85	
12	3	5.0x5.0x5.0	249	1.992	70.36	70.36	
13	7	5.0x5.0x5.0	253	2.024	89.08	89.08	99.76
14	7	5.0x5.0x5.0	250.5	2.004	97.70	97.70	
15	7	5.0x5.0x5.0	251.5	2.012	92.12	92.12	
16	7	5.0x5.0x5.0	251.5	2.012	88.07	88.07	
17	7	5.0x5.0x5.0	252.5	2.02	89.08	89.08	
18	7	5.0x5.0x5.0	251.5	2.012	101.81	101.81	
19	14	5.0x5.0x5.0	254	2.032	120.98	120.98	148.65
20	14	5.0x5.0x5.0	252	2.016	125.03	125.03	
21	14	5.0x5.0x5.0	253	2.024	123.01	123.01	
22	14	5.0x5.0x5.0	254	2.032	119.97	119.97	
23	14	5.0x5.0x5.0	254.5	2.036	119.46	119.46	
24	14	5.0x5.0x5.0	254	2.032	125.54	125.54	
25	28	5.0x5.0x5.0	259	2.072	155.40	155.40	160.13
26	28	5.0x5.0x5.0	255.5	2.044	154.38	154.38	
27	28	5.0x5.0x5.0	256	2.048	159.96	159.96	
28	28	5.0x5.0x5.0	257	2.056	156.41	156.41	
29	28	5.0x5.0x5.0	257	2.056	158.44	158.44	
30	28	5.0x5.0x5.0	257	2.056	161.98	161.98	
31	50	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	184.25	184.25	190.33
32	50	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	185.27	185.27	
33	50	5.0x5.0x5.0	260	2.08	180.71	180.71	
34	50	5.0x5.0x5.0	261.5	2.092	192.85	192.85	
35	50	5.0x5.0x5.0	258.5	2.068	192.85	192.85	
36	50	5.0x5.0x5.0	259.5	2.076	184.76	184.76	



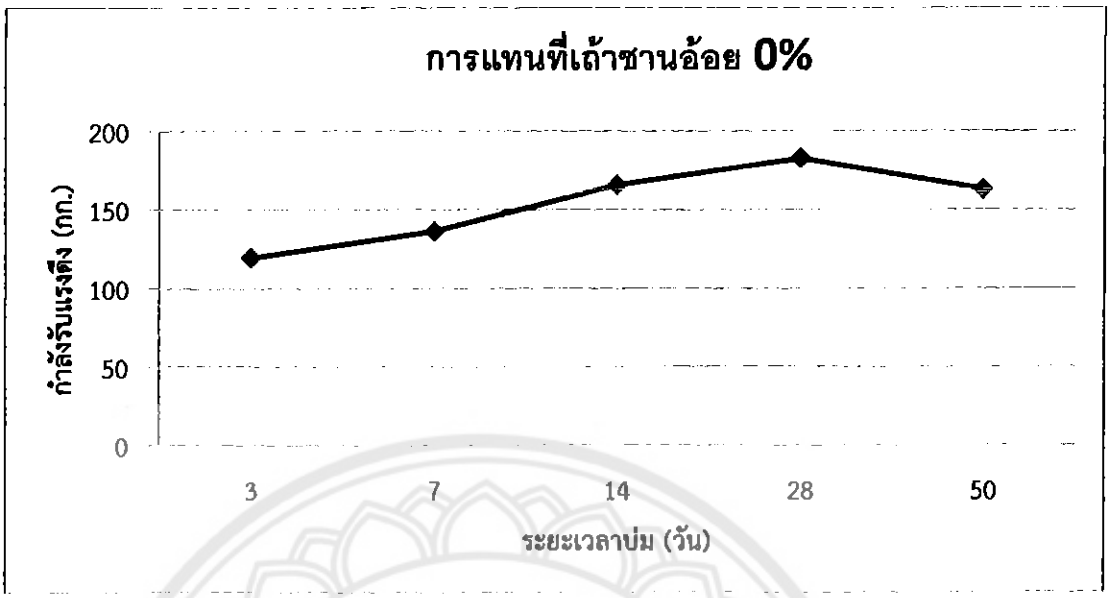
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 30%

การทดสอบ กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

วันที่ทดลอง 11 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 128.594	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 0

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 0%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	133	113.259	119.324
2	3	132	124.306	
3	3	130	120.407	
4	7	135.5	135.503	136.245
5	7	137	137.61	
6	7	137	135.622	
7	14	138	162.678	165.593
8	14	134.5	191.733	
9	14	138	142.369	
10	28	145.5	185.792	182.614
11	28	143	181.968	
12	28	147	180.081	
13	50	137.5	159.823	162.992
14	50	137	170.503	
15	50	140	158.65	

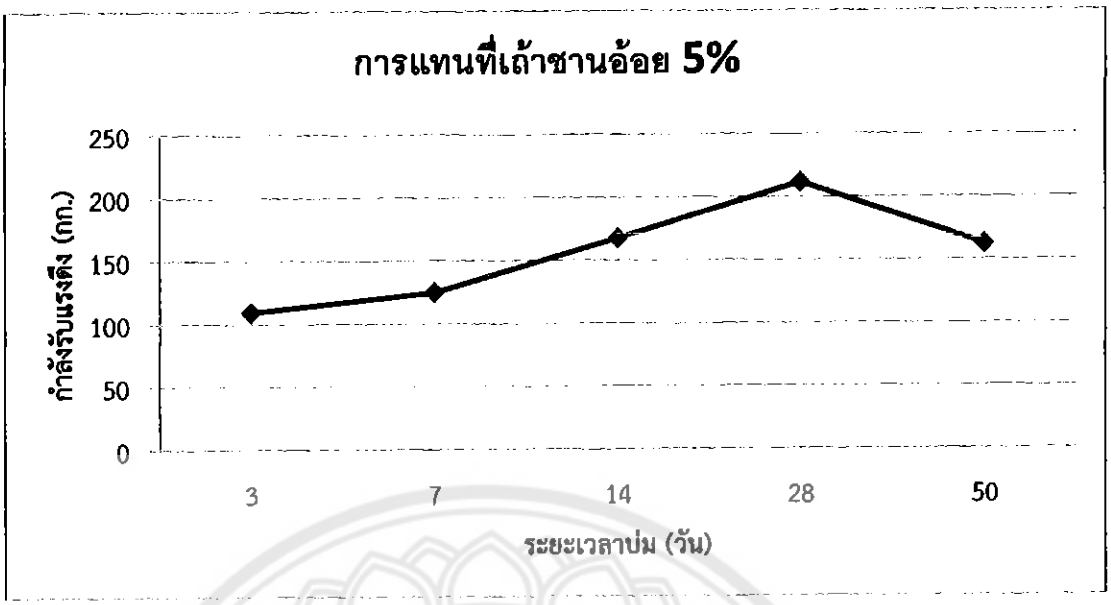


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าซานอ้อย 0%

วันที่ทดลอง 12 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 129.590	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 5

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 5%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	133	115.459	109.353
2	3	133.5	102.351	
3	3	135.5	110.25	
4	7	140	114.242	124.9707
5	7	143	137.019	
6	7	140	123.651	
7	14	142	167.267	167.5447
8	14	143.5	150.629	
9	14	142.5	184.738	
10	28	134	207.988	211.5613
11	28	140.5	197.621	
12	28	138	229.075	
13	50	146	168.032	162.3443
14	50	143	157.597	
15	50	136.5	161.404	

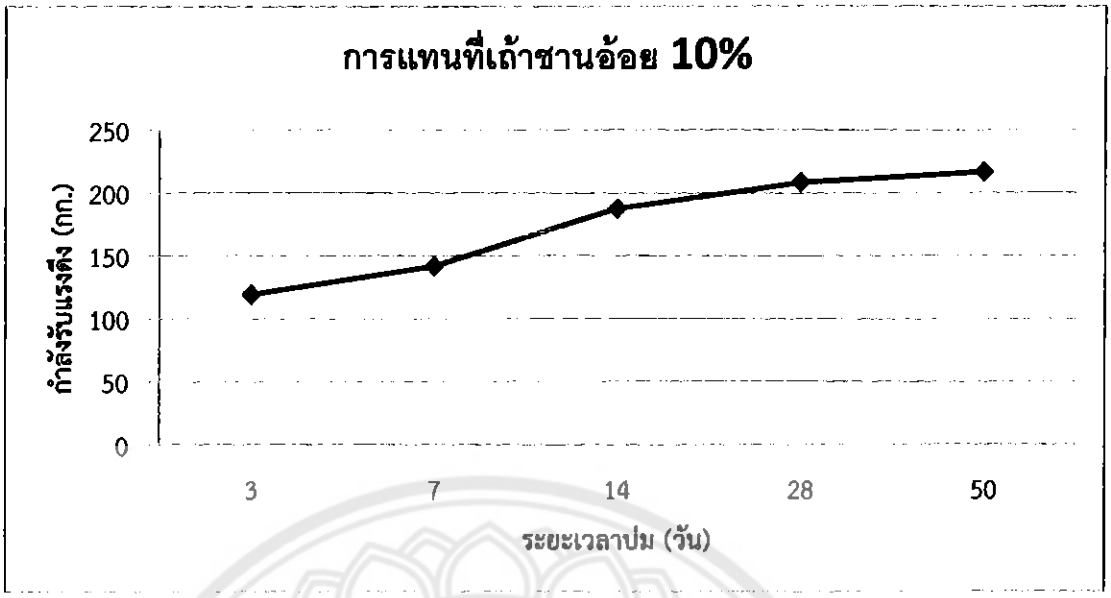


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 5%

วันที่ทดลอง 14 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 131.856	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 10%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	136	110.238	119.545
2	3	136	125.14	
3	3	133.5	123.258	
4	7	135	114.242	141.927
5	7	137.5	145.938	
6	7	134	165.601	
7	14	136.5	188.8	187.6387
8	14	140	184.976	
9	14	137	189.14	
10	28	138.5	225.816	208.3617
11	28	137	197.264	
12	28	135.5	202.005	
13	50	138.5	208.99	216.706
14	50	142	210.35	
15	50	141	230.778	

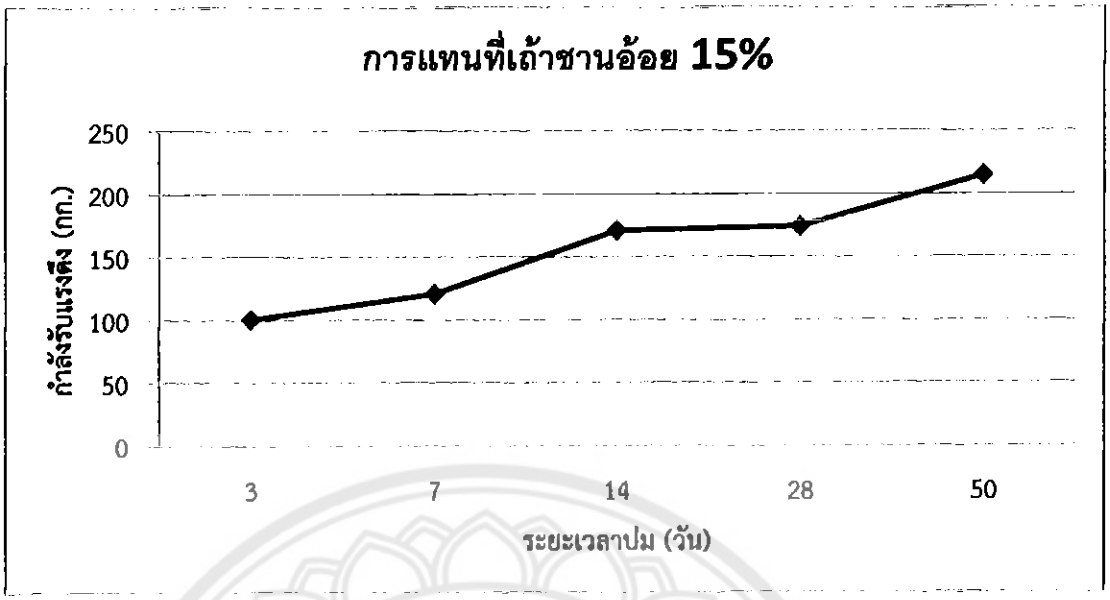


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 10%

วันที่ทดลอง 15 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 133.176	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 15

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 15%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	133	90.769	100.46
2	3	132	99.832	
3	3	130	110.778	
4	7	139	114.871	120.7037
5	7	131	127.209	
6	7	134	120.031	
7	14	142.5	161.794	170.83
8	14	144.5	155.081	
9	14	135	195.615	
10	28	139.5	166.825	174.1613
11	28	145.5	175.493	
12	28	142	180.166	
13	50	141	224.405	214.8643
14	50	144.5	211.778	
15	50	144.5	208.41	

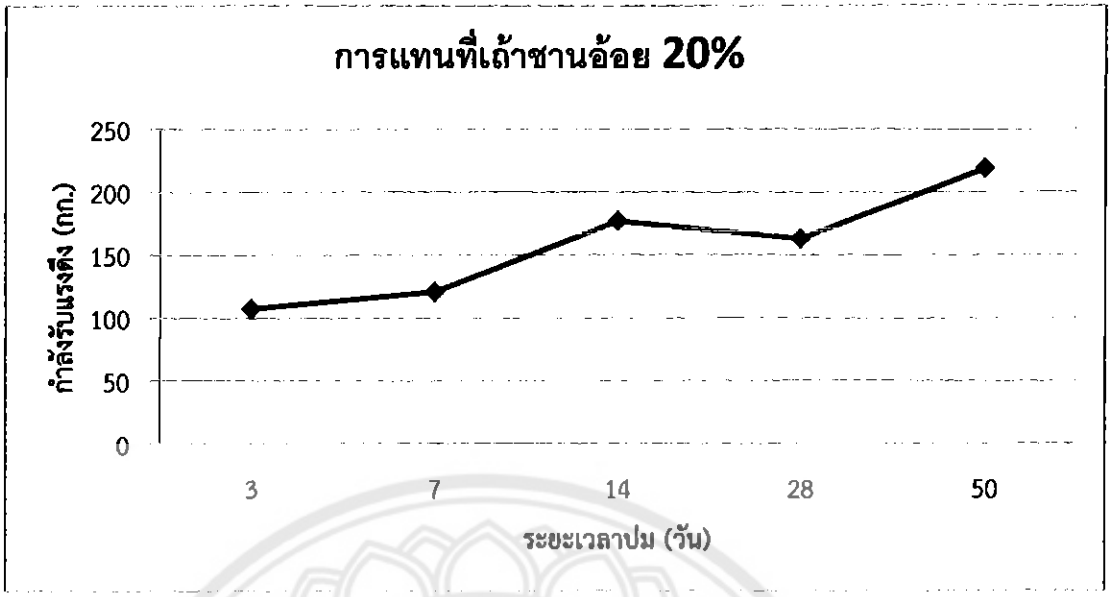


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 15%

วันที่ทดลอง 17 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 134.630	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 20

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 20%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	131.5	115.807	107.297
2	3	131	108.021	
3	3	134	98.062	
4	7	139	114.871	120.7037
5	7	131	127.209	
6	7	134	120.031	
7	14	128	177.821	177.1187
8	14	130	179.062	
9	14	128.5	174.473	
10	28	146.5	185.18	162.8653
11	28	145.5	125.765	
12	28	144	177.651	
13	50	139.5	215.686	218.825
14	50	141.5	214.65	
15	50	142.5	226.139	

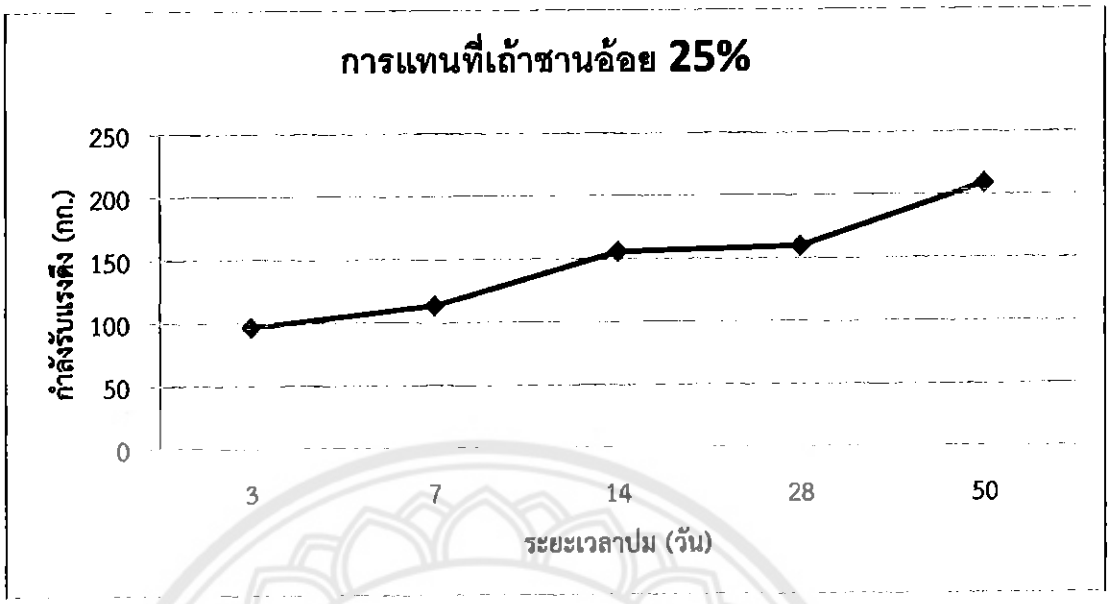


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 20%

วันที่ทดลอง 18 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 135.710	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 25

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 25%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	131.5	98.027	96.657
2	3	137	89.316	
3	3	133.5	102.628	
4	7	132.5	132.988	113.4433
5	7	131	103.909	
6	7	132.5	103.433	
7	14	133	162.066	155.854
8	14	131.5	153.127	
9	14	132.5	152.369	
10	28	139.5	153.416	159.693
11	28	139.5	167.59	
12	28	139.5	158.073	
13	50	138	202.09	208.979
14	50	138.5	211.2	
15	50	137	213.647	

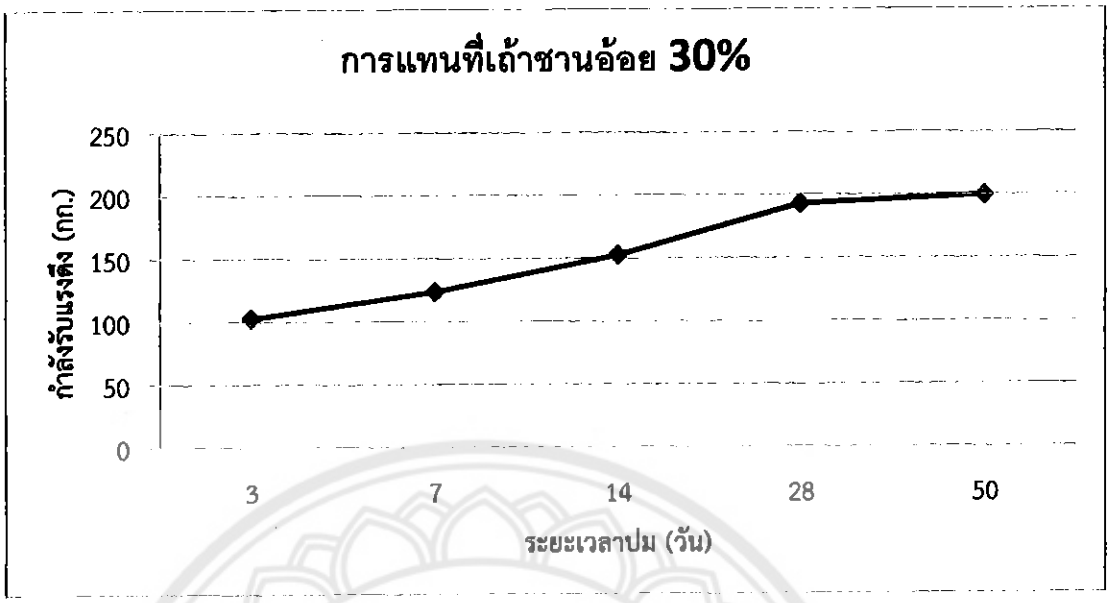


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 25%

วันที่ทดลอง 20 มีนาคม 2558	**ลักษณะของตัวอย่าง** มอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5 ซม.
ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 ก.	**ปริมาณทราย** 900 ก.
ปริมาณน้ำ 137.590	**ทราย** ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้าง 30
ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	

แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 30

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย 30%				
ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (ก.)	แรงดึง (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	3	138	98.643	102.613
2	3	129	99.698	
3	3	135	109.497	
4	7	133.5	125.731	123.7883
5	7	137	112.347	
6	7	134.5	133.287	
7	14	137.5	152.702	152.685
8	14	134.5	150.051	
9	14	135	155.302	
10	28	139	193.644	193.0263
11	28	141.5	189.803	
12	28	138.5	195.632	
13	50	139.5	200.697	199.5977
14	50	139	201.648	
15	50	142	196.448	



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและระยะเวลาบ่มการแทนที่เถ้าชานอ้อย 30%