



## รายงานการวิจัย

อัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน  
และหินฝุ่นแทนทรายที่ป่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โดย

ปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน  
รัฐศักดิ์ พรหมมาศ  
ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2558

Water Permeability of concrete mixing palm oil  
regionalism ash and crushed dust replaced sand using  
microwave curing

By

Piyapong Kesawadkorn

Ratthasak Prommas

Thaweesak Rungsakthaweekul



Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2015

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่เอื้อให้ใช้สถานที่ตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ที่ให้ความอนุเคราะห์เจ้าทลายปาล์ม น้ำมัน ที่นำมาใช้ประกอบเป็นส่วนผสมหลักในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน  
กันยายน 2559



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ :A 13/2558

ชื่อโครงการ :อัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ชื่อนักวิจัย :นายปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, นายรัฐศักดิ์ พรหมมาศ และนายทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Regionalism Ash) และหินฝุ่น (Crushed Dust) แทนทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล รวมทั้งศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt เป็นระยะเวลา 120 min.

จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 จะมีค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด เท่ากับ  $2,402.71 \text{ kg/m}^3$  และ  $280.313 \text{ kg/cm}^2$  ที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน ส่วนค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน เท่ากับ  $0.081 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  และจะมีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ที่บ่มเป็นระยะเวลา 120 min. มีค่าเท่ากับ  $6.17 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  ดังนั้นการใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.8 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ออกแบบไว้ที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน และมีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาบ่ม 120 min สูงกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน จะเห็นได้ว่าการบ่มด้วยน้ำจะช่วยลดเขยื้อนน้ำที่เสียไปในกระบวนการไฮเดรต เป็นที่ทราบกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้น้ำเป็นหลัก ซึ่งอิทธิพลของการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟอาจจะทำให้น้ำในกระบวนการไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ส่งผลให้คอนกรีตเกิดสถานะการขาดน้ำในบางพื้นที่ของคอนกรีต ทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนในเนื้อของคอนกรีตส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : อัตราการซึมผ่านน้ำ กำลังต้านทานแรงอัด ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

E-mail Address : p\_pupay@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2557 - กันยายน 2558

## Abstract

Code of project : A 13/2558  
 Project name : Water Permeability of concrete mixing palm oil regionalism ash and crushed dust replaced sand using microwave curing.  
 Researcher : Mr. Piyapong Kesawadkorn, Mr. Ratthasak Prommas and Mr. Thaweesak Rungsakthaweekul

This research studied about “Water permeability of concrete mixing palm oil regionalism ash and crushed dust replaced sand using microwave curing by using palm oil regionalism ash which it replaced cement by 30% of all ratio of the using crushed dust replaced sand which are 0, 20, 40, 60, 80 and 100% in order to study the physical properties, the mechanical properties and the water permeability of concrete property by using the microwave curing on level 720 watt for 120 minutes.

The study reveals that using the palm oil regionalism ash to replace the cement by 30% and using crushed dust to replace by 40% that it has the density and the highest compressive strength are 2,402.71 kg/m<sup>3</sup> and 280.313 kg/cm<sup>2</sup> which has been cured for 28 days. The average water permeability of concrete that has been cured for 28 days which is  $0.081 \times 10^{-10}$  m/s. The average water permeability of concrete by using microwave curing on level 720 watt that it was cured for 120 minutes which the lowest value is  $6.17 \times 10^{-10}$  m/s. So the using palm oil regionalism ash which it replaced cement by 30% and the using crushed dust replaced sand by 40% which its weight of the compressive strength are higher by 16.8. If it compared the concrete that it has already designed that it has been cured for 28 days and the average water permeability of concrete by using microwave curing that it was cured for 120 minutes that it was higher than the concrete which has been cured in the normal temperature for 28 days. The result show that the water curing made up the water which it wasted in the hydrate process which it caused of the hydration reaction that this reaction need to use the water mainly. The effect of the microwave curing may have the insufficiency hydration process that it affect to the concrete that has the dehydration in some area of the concrete that it causes the gaps and the holes in the concrete and then it causes the average water permeability of concrete by using microwave curing is higher than the concrete that has been cured in the normal temperature which are statistically significantly.

Keywords : Permeability, Compressive strength, Hydration reaction  
 E-mail Address : p\_pupay@hotmail.com  
 Period of Project : September 2014- October 2015

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 คอนกรีต	4
2.1.2 ซีเมนต์	5
2.1.3 ปฏิกริยาไฮเดรชัน	10
2.1.4 วัสดุปอซโซลาน	13
2.1.5 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	15
2.1.6 วัสดุชีวมวล	15
2.1.7 เถ้าปาล์มน้ำมัน	16
2.1.8 องค์ประกอบของหินฝุ่น	18
2.1.9 การบ่มคอนกรีต	18
2.1.10 กำลังต้านทานของคอนกรีต	19
2.1.11 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	20
2.1.12 รูพรุนและการดูดซึมน้ำ	24
2.1.13 พลังงานไมโครเวฟ	25
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	33
3.1 การศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัย	35
3.1.1 การวิเคราะห์ทางด้านกายภาพวิธีการทดสอบต่างๆ และการวิเคราะห์	35
3.2 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของคอนกรีต	40
3.2.1 การหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C311	40
3.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด	44
3.2.3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ	49
3.3 การขึ้นรูปของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีต	54
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	54
3.4.1 วิธีการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39/CM39M-99	54
3.4.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของผิวคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C125 โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ	56
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	63
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	65
4.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ	65
4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเก้าทลายปาล์มน้ำมัน โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)	66
4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของหินปูน โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)	67
4.2 การศึกษาทางด้านวิศวกรรม	68
4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์ม น้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)	
4.2.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์ม น้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายใน อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ การบ่ม 14 วัน	69
4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์ม น้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายใน อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ การบ่ม 28 วัน	71
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ การบ่ม 7 วัน	72
4.2.5 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ การบ่ม 14 วัน	74
4.2.6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย	76
4.2.7 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	78
4.2.8 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	80



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล (ต่อ)	
4.3 การศึกษาทางด้านความหนาแน่นและการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต ที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ	82
4.3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย	82
4.3.2 ผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย	84
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการทดสอบ	86
5.2 อุปสรรค	87
5.3 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม	89
ภาคผนวก	90
ก ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต	91
ข การทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	98
ค การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน	100
ง การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด	102
จ การทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น	104
ฉ การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ	106
ช การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน	108
ซ การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน	111
ฌ การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	114
ญ การคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยใช้ การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลา 120 min.	117
ฎ การคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตปกติ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติระยะเวลา 28 วัน	120
ฏ ภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด	122
ฐ ภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต	126

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แผนการดำเนินงาน	3
2-1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบหลักต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2-2 แสดงจำนวนสารประกอบหลักที่รวมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภท	6
2-3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2-4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	11
2-5 วัสดุปอซโซลานกับปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีในวัสดุปอซโซลาน	14
2-6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประเภทเถ้าลอยและเถ้าตะกรัน	14
2-7 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเถ้าหลายปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น	17
2-8 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ	22
2-9 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน	23
3-1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้และจำนวนก้อนตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต	36
3-2 สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้แต่ละจำนวนก้อนตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การการซึมผ่านของคอนกรีต	37
4-1 แสดงผลร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหลายปาล์มน้ำมัน	66
4-2 แสดงผลร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีของหินฝุ่น	67
ก-1 ปริมาณน้ำที่ต้องใช้สำหรับผสมคอนกรีตให้มีค่ายุบตัวตามต้องการ	93
ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด	93
ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด	94
ก-4 ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ	95
ข-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	99
ค-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าหลายปาล์มน้ำมัน	101
ง-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด	103
จ-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น	105
ฉ-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ	107
ช-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เถ้าหลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน	109

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน	110
ช-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน	112
ช-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน	113
ณ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน	115
ณ-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน	116
ญ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลาการบ่ม 120 min.	118
ญ-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฟูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลาการบ่ม 120 min.	119
ฎ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตปกติ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติ ระยะเวลา 28 วัน	121

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อค่าการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต	21
2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาตรของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์	21
2-3 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ	25
2-4 การกระจายตัวของความร้อน	29
3-1 แผนผังการดำเนินงาน	34
3-2 แผนภาพออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.3R-97	39
3-3 ซีเมนต์	40
3-4 ขวดแก้วทดลองเลอซาแตรีแอร์ (LeChatelier)	40
3-5 เทอร์โมมิเตอร์	41
3-6 กรวยก้านยาว	41
3-7 น้ำมันก๊าด	42
3-8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ	42
3-9 เครื่องชั่ง	43
3-10 เครื่องชั่ง	44
3-11 กระจกตวง	45
3-12 กรวยตัด	45
3-13 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ	46
3-14 เทอร์โมมิเตอร์	46
3-15 ทราย	47
3-16 ถาดแสดนเลส	47
3-17 เครื่องชั่ง	49
3-18 ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ	50
3-19 ตะแกรงเบอร์ 3/4 in	50
3-20 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ	51
3-21 เทอร์โมมิเตอร์	51
3-22 หิน	52
3-23 ถาดแสดนเลส	52
3-24 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด	55
3-25 เตาอบไมโครเวฟ	56
3-26 ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing$ 10x4 cm.	56

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-27 แผ่นยาง	57
3-28 อีพอกซี (Epoxy)	57
3-29 ชุดเซลล์ทดสอบ	58
3-30 ถังออกซิเจนสำหรับให้แรงดันโดยสามารถให้แรงดันได้ถึง 20 bar.	58
3-31 เครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต	59
3-32 เซลล์ทดสอบค่าซึมผ่านน้ำ	59
3-33 ภาพการนำก้อนตัวอย่างไปอบด้วยเครื่องเตาอบไมโครเวฟ ขนาดกำลังวัตต์ 720 Watt	60
3-34 ภาพการนำก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยเครื่องเตาอบไมโครเวฟมาซีล	61
3-35 ภาพการประกอบตัวอย่างเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบ	61
3-36 ภาพติดตั้งชุดเซลล์ทดสอบเข้ากับชุดโครงทดสอบ	62
3-37 ภาพการเติมน้ำเข้าไปในเซลล์ทดสอบกับหลอดแก้ววัดปริมาตร	62
3-38 ภาพการเปิดแรงดันเข้าไปในชุดโครงทดสอบ	63
4-1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 1000 เท่า) ของเก้าทลายปาล์มน้ำมันขนาด 100 ไมโครเมตร	66
4-2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 1000 เท่า) ของหินฝุ่นขนาด 100 ไมโครเมตร	67
4-3 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	68
4-4 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน	69
4-5 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	71
4-6 กราฟแสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	72
4-7 กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	73

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 กราฟแสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน	74
4-9 กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน	75
4-10 กราฟแสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	76
4-11 กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน	77
4-12 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	78
4-13 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	80
4-14 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min.	82
4-15 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ปกติโดยระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	84

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ฎ-1 ภาพแสดงการการชั่งซีเมนต์ ททราย, หิน, หินฝุ่น, เถ้าถลายปาล์มน้ำมัน และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	123
ฎ-2 ภาพแสดงการเตรียมแบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปก้อนตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15x30 cm.	123
ฎ-3 ภาพแสดงการผสมคอนกรีตโดยใช้โมผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	123
ฎ-4 ภาพแสดงการนำคอนกรีตสดมาใส่แบบหล่อเพื่อขึ้นรูปก้อนตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15x30 cm.	124
ฎ-5 ภาพแสดงก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	124
ฎ-6 ภาพแสดงการบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน	124
ฎ-7 ภาพแสดงการ cap หัวก้อนตัวอย่างคอนกรีต	125
ฎ-8 ภาพแสดงการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต	125
ฎ-9 ภาพแสดงค่าจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต	125
ฎ-1 ภาพแสดงการการชั่งซีเมนต์ ททราย, หิน, หินฝุ่น, เถ้าถลายปาล์มน้ำมัน และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	127
ฐ-2 ภาพแสดงการเตรียมแบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปก้อนตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10x4 cm.	127
ฐ-3 ภาพแสดงการผสมคอนกรีตโดยใช้ถาดผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	127
ฐ-4 ภาพแสดงการนำคอนกรีตสดมาใส่แบบหล่อเพื่อขึ้นรูปก้อนตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10x4 cm.	128
ฐ-5 ภาพแสดงก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	128
ฐ-6 ภาพแสดงการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt เวลา 120 min.	128
ฐ-7 ภาพก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการหล่ออีพ็อกซีรอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งมีความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต	129
ฐ-8 ภาพแสดงการนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาใส่ในเซลล์หลังจากนั้นทำการขันน็อตทั้ง 4 ด้านให้แน่น ต่อสายทนแรงดันสูงกับเซลล์ ซึ่งจะทำให้การขันให้แน่น	129
ฐ-9 ภาพแสดงการเติมน้ำจนกระทั่งน้ำอยู่ในหลอดวัด (Transparent Tube) ประมาณ 3 ใน 4 ของหลอดวัด แล้วจึงทำการปิดวาล์วตัวที่ 1	129
ฐ-10 ภาพแสดงการเปิดวาล์วตัวที่ 3 และ 4 แล้วทำการต่อสายทนแรงดันสูง เข้ากับถังออกซิเจนที่มีชุดควบคุมแรงดันอยู่	130

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ฐ-11 ภาพแสดงการทำการปรับแรงดันโดยดูจากเกจวัดที่ติดอยู่ที่ชุดโครงทดสอบ โดยทั่วไป จะทำการทดสอบอยู่ที่ 5 bar	130
ฐ-12 ภาพแสดงการทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลาแล้วทำการคำนวณ ตามสูตรที่แสดงไว้	130





## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CSH	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
CAH	แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต
C <sub>3</sub> S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C <sub>3</sub> A	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C <sub>2</sub> S	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C <sub>4</sub> AF	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
SiO <sub>2</sub>	ซิลิกอนไดออกไซด์
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	อลูมิเนียมออกไซด์
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	เฟอร์ริกออกไซด์
Ca(OH) <sub>2</sub>	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CaO	แคลเซียมออกไซด์
MgO	แมกนีเซียมออกไซด์
SO <sub>3</sub>	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
CaCO <sub>3</sub>	แคลเซียมคาร์บอเนต
MgCO <sub>3</sub>	แมกนีเซียมคาร์บอเนต
LOI.	Loss of ignition
pH	Potential of Hydrogen ion
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
SEM	Scanning Electron Microscope



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากปัจจุบันการก่อสร้างมีความเจริญเติบโตและมีการแข่งขันที่สูงขึ้นจึงมีความต้องการที่จะต้องใช้วัสดุในการก่อสร้างจำนวนมาก ทำให้วัสดุไม่เพียงพอกับความต้องการ สำหรับในอุตสาหกรรมก่อสร้างนั้นลักษณะขององค์ประกอบของอาคารส่วนมากยังจำเป็นต้องใช้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตประกอบไปด้วย ซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ เป็นองค์ประกอบหลักของคอนกรีตในโครงสร้างอาคาร จึงได้มีการพัฒนาคอนกรีตอยู่อย่างต่อเนื่อง และจากการศึกษาพบว่าในเนื้อคอนกรีตจะมีความพรุน ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการซึมผ่านน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต จึงต้องมีการใช้วัสดุผสมเพิ่มที่มีความละเอียดสูงกว่าซีเมนต์และทรายเพื่อใช้ในการลดความพรุน ทำให้ความพรุนในคอนกรีตลดลง ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงกับคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่างๆได้ยากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารที่เป็นอันตรายกับคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ช้าลง ในส่วนของการพัฒนากำลังของคอนกรีตอาจมีอยู่หลายวิธี ซึ่งในการอบด้วยเครื่องอบไมโครเวฟ จะเป็นการบ่มโดยใช้พลังงานความร้อนสูงทำให้การรับกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ แต่อาจมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านอื่นได้

ปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ส่วนใหญ่ปาล์มน้ำมันจะถูกนำสกัดเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรมขนส่ง ทั้งนี้ได้มีการนำปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และรวมถึงอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งจะเกิดเป็นผลพลอยได้นั้นก็คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน แต่มีข้อเสียคือเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นและเป็นกากของเสีย ถ้าหากไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ เช่น ในด้านการก่อสร้างหรือในด้านอื่นๆ ก็จะทำให้เกิดปัญหาในการนำไปกำจัดทิ้งและหากเกิดการฟุ้งกระจายของผงฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน ก็จะทำให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางอากาศหรืออาจจะทำให้เกิดปัญหาในด้านอื่นๆ ตามมา เพื่อลดปัญหาทางมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อมและการกำจัดทิ้งของเถ้าปาล์มน้ำมัน ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าน่าจะนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นของเสีย ควบคู่กันกับมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดนั่นก็คือการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ซีเมนต์ และองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) อยู่ที่ร้อยละ 70 ซึ่งองค์ประกอบหลักของเถ้าปาล์มน้ำมันเหล่านี้สามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ ซึ่งวัสดุนี้จะเรียกว่า “วัสดุพอซโซลาน”

หินฝุ่นเป็นผลพลอยได้ซึ่งได้มาจากอุตสาหกรรมการโม่หิน โดยหินฝุ่นนั้นได้จากการบดย่อยสลายหินปูนเพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการบดหินปูนจะทำให้ได้หินฝุ่นจำนวนมากตกอยู่บริเวณส่วนล่างของเครื่องจักรบดย่อยหินและจะสะสมมากขึ้นเรื่อยๆเป็นจำนวนมาก ซึ่งหินฝุ่นที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมได้และทำให้เกิดปัญหาในด้านการนำไปกำจัดทิ้งซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้หินฝุ่นนำมาแทนที่ทรายได้ เนื่องจากคุณสมบัติของหินฝุ่นมี

ความใกล้เคียงกับทรายเป็น เช่น ขนาดส่วนคละ ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณความชื้น และหน่วยน้ำหนัก ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า คุณสมบัติของเก้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นดังกล่าว ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะนำเก้าทลายปาล์มน้ำมัน ที่ได้มาจากอุตสาหกรรมทางการเกษตรและหินฝุ่นที่ได้จากการม่หิน นำมาเป็นส่วนผสมในการแทนที่ซีเมนต์และทราย เพื่อเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำวัสดุที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วยอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ในด้านความหนาแน่นของคอนกรีต ที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินฝุ่นแทนที่ทราย โดยการบ่มด้วยอุณหภูมิปกติและการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลในด้านการรับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ และหินฝุ่นแทนที่ทรายที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติ (ตามมาตรฐาน ASTM C39 / C39M – 99)

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต ที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินฝุ่นแทนที่ทรายโดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ตามมาตรฐาน ASTM C125)

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินฝุ่นแทนที่ทรายของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติ

1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน กับคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ที่ระยะเวลาการบ่ม 120 min.

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้หินฝุ่นจากกระบวนการม่หินอำเภอเขาชัย้อย จังหวัดเพชรบุรี โดยใช้หินฝุ่นร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

1.3.2 ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันจากจังหวัดชุมพร โดยใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

1.3.3 ออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตโดยให้มีกำลังอัดประลัย  $240 \text{ kg/cm}^2$  โดยกำหนดให้ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้หินฝุ่นที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยหล่อแท่งตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. สูง 30 cm. ที่อายุของก้อนตัวอย่าง 7, 14, และ 28 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมโดยทดสอบในด้านการรับกำลังอัดและทดสอบหาความหนาแน่น และแบบหล่อพีวีซี เพื่อหล่อแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. และสูง 4 cm. เพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต ที่บ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยใช้ระยะเวลา 120 min.

1.3.4 หินร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3/4 in.

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบคุณสมบัติในด้านความหนาแน่นของคอนกรีต โดยใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ และหินฝุ่นแทนที่ทราย โดยการบ่มปกติและการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้กันมากในปัจจุบันและยังได้มีการพัฒนาการใช้วัสดุผสมเพิ่มเข้ามาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมีความเหมาะสมในการก่อสร้าง ทั้งในด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆมากกว่าวัสดุอื่น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการศึกษาคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในทางกายภาพและทางกลให้ดียิ่งขึ้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำเถ้าถ่านปาล์มน้ำมันมาเป็นอัตราส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์และใช้หินฝุ่นมาเป็นอัตราส่วนผสมแทนที่ทราย เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาและนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านคอนกรีต สารผสมเพิ่ม เถ้าถ่านปาล์มน้ำมัน หินฝุ่น และวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลในด้านการรับกำลังอัด คุณสมบัติในการต้านการซึมผ่านของน้ำ และการบ่มโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

##### 2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก ดังต่อไปนี้ ซีเมนต์ร้อยละ 10-15 มวลรวม ร้อยละ 70-80 โดยปริมาตร และน้ำ ซึ่งคอนกรีตจะมีความสำคัญมากในงานก่อสร้างต่างๆ และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในคอนกรีตจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ซีเมนต์ วัสดุผสม เช่น หิน ทราย หรือ กรวด และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีผสมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จ คอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากที่ถูกผสม และยิ่งแข็งแรงขึ้นหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากการแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

คอนกรีตมีใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึง อาคาร ถนน เขื่อน และงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไปคอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้างอาจแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ใช้แต่คอนกรีตอย่างเดียวล้วนๆ ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริม ได้แก่โครงสร้างที่มีแต่แรงอัดกระทำเพียงอย่างเดียว เช่น ฐานเครื่องจักรที่หนาหลายๆ หรือเขื่อนกันดินแบบที่ใช้น้ำหนักของตัวเขื่อนต้านแรงดันของดิน (Gravity Wall) ที่สูงไม่เกิน 1.00 m. เป็นต้น

2) คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ใช้เหล็กเส้นเสริมกับคอนกรีตเป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัดในคอนกรีตทำหน้าที่ต้านแรงอัด และใช้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านแรงดึงเหล็กเสริมคอนกรีตมีสมบัติการยึดหดตัวใกล้เคียงกันจึงช่วยกันรับแรงและถ่ายแรงได้ดี โครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตล้วน

3) คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง (Prestressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงก่อนการใช้งาน โดยใช้ลวดเหล็กที่ทนแรงดึงได้สูงเอาคอนกรีตมาใช้ประโยชน์หมดทั้งรูปตัดดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กจะช่วยประหยัดขึ้นซึ่งจะใช้กับงานสะพานและอาคาร เช่น ในระบบพื้น เป็นต้น

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูงในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำกว่า (ประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงจะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรงหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีตซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

นอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีคอนกรีตที่เรียกกันว่า คอนกรีตอัดแรง โดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตหล่อสำเร็จที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งานแรงที่ใส่เข้าไปในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับนิยมใช้คอนกรีตอัดแรง ซึ่งคอนกรีตจะมีสัดส่วน ซีเมนต์:ทราย:หิน ดังนี้

สัดส่วน 1: 1.5: 3 สำหรับงานเสาและโครงสร้าง

สัดส่วน 1: 2 : 4 สำหรับงานพื้นและคาน

สัดส่วน 1: 2.5: 4 สำหรับงานถนนและฐานราก

### 2.1.2 ซีเมนต์ (Cement)

ประเภทซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

1) ประเภท 1 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่มีขายได้แก่ ทรายข้าง ทรายเพชร ทรายภูพานาคสีเขี้ยว ทรายภูเขา ทรายที่ฟิไอสีแดง และทรายเอกซีเมนต์

2) ประเภท 2 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับงานคอนกรีตที่ความร้อนเกิดขึ้นมากกว่าประเภทที่หนึ่ง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง

3) ประเภท 3 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการให้รับกำลังอัดเร็วหรือต้องการถอดไม้แบบเร็ว เช่น งานผลิตภัณฑ์คอนกรีตหล่อสำเร็จต่างๆ ที่มีขายได้แก่ ทรายข้างเอราวัณ ทรายสามเพชร ทรายภูพานาคสีแดง และทรายที่ฟิไอสีดำ

4) ประเภท 4 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่มีปริมาณมาก (คอนกรีตหลา Mass Concrete) ซึ่งมีความร้อนเกิดขึ้นมาก จึงต้องใช้ปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำ ไม่มีผู้ผลิตขายในประเทศไทย

5) ประเภท 5 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulphate Resistance Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตของโครงสร้างที่อยู่ในน้ำทะเล หรือในดินที่มีซัลเฟต เช่น ดินใน

ภาคีสานบางพื้นที่มีขายได้แก่ トラช่างฟ้า トラปลาฉลาม トラที่ฟิโอสีฟ้า จำนวนสารประกอบหลักที่อยู่ในซีเมนต์ในแต่ละประเภทจะแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบหลักต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
อัตราเร็วของ	ปานกลาง	ช้า	เร็วมาก	เร็ว
ปฏิกิริยา	(ชม.)	(วัน)	(ทันทีทันใด)	(นาที)
ความร้อนที่เกิด	ปานกลาง	น้อย	ปานกลาง	มาก
ต่อหน่วยสารประกอบ	(500 j/g)	(250 j/g)	(850 j/d)	(420 j/g)
ช่วงแรก	ดี	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี
ช่วงสุดท้าย	ดี	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว	ช้า	เร็วมาก	เร็วมาก
	(วัน)	(สัปดาห์)	(1 วัน)	(1 วัน)
กำลังอัดประลัย	(สูง)	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

ที่มา : (นิพนธ์ สุวรรณสุขโรจน์, 2545)

ตารางที่ 2-2 แสดงจำนวนสารประกอบหลักที่รวมที่รวมในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภท

ประเภท	ร้อยละจำนวนสารประกอบ				ความละเอียด g/cm <sup>2</sup>
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
1	50	24	11	8	1,800
2	42	33	5	13	1,800
3	60	13	9	8	2,600
4	26	50	5	12	1,900
5	40	40	4	4	1,900

ที่มา : (นิพนธ์ สุวรรณสุขโรจน์, 2545)

### 2.1.2.1 การทำงานของซีเมนต์

เราทราบแล้วว่าซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญตัวหนึ่งในคอนกรีตเมื่อซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดเรียกว่า “เพสต์” เพสต์จะทำหน้าที่เสมือนกาวประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน เมื่ออายุมากขึ้นเพสต์จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็งและในเวลาต่อมาก็จะกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งจะสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆตามอายุ

ที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถรับกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่ การที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ขึ้น เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ซึ่งเกิดจากสารประกอบในซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังนั้นเราจึงรู้สึกว่าร้อนขึ้นเมื่อสัมผัสกับซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเราสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ง่าย ๆ ได้ดังนี้



คำอธิบาย

Cement = แทนสารประกอบต่างๆในซีเมนต์

Water = แทนน้ำ

C-S-H = แทนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium SilicateHydrate) เป็นองค์ประกอบที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต

Ca (OH)<sub>2</sub> = เป็นผลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก pH ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

Heat = เป็นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

### 2.1.2.2 สารประกอบที่สำคัญของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็ยังมีเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ โคโลไมต์ (MgCO<sub>3</sub>) เป็นจำนวนเล็กน้อย ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish Gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 lb/ft<sup>3</sup> เมื่อเผาวัตถุดิบของซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียมและ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สารประกอบที่สำคัญของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2 CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนียม	3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์	4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

ที่มา : (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)



- C<sub>3</sub>S ทำให้ซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน
- C<sub>2</sub>S ทำให้ซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย
- C<sub>3</sub>A ทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว
- C<sub>4</sub>AF มีผลน้อย ให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

### 2.1.2.3 มวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสมที่ใช้ในการก่อสร้างส่วนใหญ่ได้แก่ หินย่อย กรวดและทรายซึ่งเป็นแร่ธาตุเฉื่อย ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์วัสดุผสมอาจได้จากธรรมชาติ ได้แก่หินอัคนีหินชั้นและหินแปร หรือทำเทียมขึ้นเช่นวัสดุผสมตะกรันเตาถลุง ซึ่งเป็นกากหรือตระกรันที่ได้รับจากการหล่อโลหะแล้วนำมาบดให้ได้ขนาดตามต้องการ วัสดุผสมอาจเรียกว่าเป็นตัวแทรก (Filler Material) ในเนื้อคอนกรีตก็ได้ เพราะในเนื้อคอนกรีตก็ได้ เพราะเนื้อคอนกรีตมีหิน ทราย ผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่ ประมาณสามในสี่ส่วน และโดยที่ราคาของวัสดุผสมถูกกว่าซีเมนต์ ดังนั้นมวลรวมจึงมีส่วนทำให้ได้คอนกรีตราคาถูกลง

#### 1. มวลรวมละเอียด (Fine Aggrete)

มวลรวมละเอียดหรือวัสดุผสมละเอียด หมายถึง ทรายซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 mm. หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 mm. วัสดุผสมที่เล็กกว่านี้เรียกว่า ผุ่น (Silt หรือ Clay) ซึ่งทรายเป็นตัวที่แทรกเข้าไปในระหว่างส่วนโครงสร้างคอนกรีตซึ่งหินเข้าไปไม่ได้โดยเคลือบและยึดประสานด้วยซีเมนต์ ถ้าขาดทรายออกช่องว่างที่เกิดขึ้นเป็นเหตุให้ความแข็งแรงการยึดเหนี่ยวต่ำลง แหล่งกำเนิดของทรายมี 4 แห่ง

1) ทรายบกหรือทรายบ่อ (Bank หรือ Pit Sand) เกิดจากการแตกแยกเสียหายชำรุดของหินทราย เนื่องจากสภาพภูมิอากาศซึ่งฝังอยู่ในแผ่นดินเป็นแหล่งๆมักนิยมใช้เนื่องจากทรายชนิดนี้มีแ่งเหลี่ยมคมและมุมแข็งแรงดี แต่ทรายชนิดนี้มักมีดิน พีช ซากสัตว์ปนอยู่ด้วยเสมอซึ่งเป็นที่เราไม่ต้องการและยอมรับให้มีอยู่น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ฉะนั้นเมื่อจะนำมาใช้ต้องนำทรายมาล้างหรือแยกให้สะอาด

2) ทรายแม่น้ำ (River Sand) ทรายชนิดนี้อยู่ในแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำตามท้องน้ำ ลำคลองเก่า สันดอนทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ของธรรมชาติ ถูกน้ำพัดพาจากที่อื่นมารวมกันอยู่เป็นทรายสะอาด ด้วยน้ำเป็นตัวพัดพาทำความสะอาดเอาผงโคลน เศษวัสดุอื่นๆตกลงตามทาง ดังนั้นทรายแม่น้ำจึงสะอาดพอที่จะนำมาใช้งาน ในส่วนข้อเสียที่เกิดจากการกระทบกันตอนพัดพาทำให้เม็ดแยก ถูกซัดเสียดสีกันจนมีลักษณะค่อนข้างกลม ส่วนมากปราศจากเหลี่ยมคมสำหรับยึดเกาะทำให้การประสานกันกับส่วนของคอนกรีตไม่ดีนัก สู้ทรายบกไม่ได้ ดังนั้นการพิจารณาในการนำมาใช้งานต้องคำนึงถึงผลที่เกิดกับงานในด้านต่างๆด้วย

3) ทรายทะเล พบได้ตามชายทะเลหรือบนบกห่างจากทะเลแต่ยังมีความเค็มและยังมีเกลือติดอยู่ด้วย ก่อนนำไปใช้ต้องไปล้างน้ำจืดให้สะอาดเสียก่อนจึงนำไปใช้ ทรายทะเลไม่ค่อยได้นำมาใช้งานคอนกรีตเนื่องจากมีความละเอียดสูง

4) ทรายที่สร้างขึ้นจากร้อน เป็นหินที่มนุษย์ทุบหรือย่อยเป็นก้อนเล็กๆขนาดเหมือนทรายซึ่งเรียกว่า “ทรายประดิษฐ์” (Manufactured Sand) ซึ่งทรายประดิษฐ์ซึ่งมีทำขึ้นใช้ในบางประเทศแล้วเนื่องจากขาดแคลนทรายธรรมชาติทรายที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีต ได้แก่

ทรายเม็ดละเอียดเม็ดเล็ก (ทรายออยุรยา) ขนาด 0.5-1.5 mm. ใช้ในงานปูนก่อฉาบปูน ทรายเม็ดกลาง (ทรายอ่างทอง) ขนาด 1-2 และ 3 mm. ใช้ในงานเทคอนกรีต ก่อปูนที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังใต้ดิน พื้น คานอลงงานคอนกรีตทั่วไป ทรายหยาบ เม็ดใหญ่ (ทรายราชบุรี สิงห์บุรี) ขนาด 2-4 mm. ใช้ในงานคอนกรีตเทพื้น ฐานราก และในที่ที่ต้องรับแรงอัดมากๆ

## 2. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

เป็นวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 mm. ขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร้อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ กรวด หินย่อยหรือหินโม้ หินย่อยที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่นการทำคอนกรีต ทำถนนส่วนมากมาจากภูเขา หินที่ระเบิดออกมามีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 38x50 cm. แล้วจึงค่อยนำมาย่อยด้วยเครื่องย่อยหินอีกทีหนึ่ง

คุณสมบัติของมวลรวม หินและทรายที่จะนำมาผสมใช้ทำคอนกรีต ควรมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้

1) ความแข็งแรง (Strength) วัสดุผสมต้องมีความสามารถรับน้ำหนัก กดได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต หินที่ใช้ทำคอนกรีตโดยทั่วไป ถ้าไม่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดยสภาพดินฟ้าอากาศ จะพอดีสำหรับผสมคอนกรีตมาก ความแข็งแรงของหิน มีค่าประมาณ 700 ถึง 3500 kg/cm<sup>2</sup>

2) ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของหินที่จะนำมาผสมคอนกรีตในงานที่ต้องทนต่อแรงกระแทกและเสียดสีมากๆ เช่น การทำพื้นหรือถนน คอนกรีตที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกมกๆ การทดสอบเพื่อหาคุณภาพข้อนี้ โดยทั่วไปนิยมใช้วิธี Los Angeles Abrasion Test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของหินที่สูญหายไปในการทดสอบกับขีดกำหนด

3) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับความพรุนและอำนาจการดูดซึมน้ำของวัสดุ วัสดุผสมต้องมีรูพรุนพอที่จะดูดซึมน้ำ มีช่องว่างพอที่จะให้น้ำแข็งขยายตัวได้ในอากาศหนาวมีฉะนั้น จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

4) ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability) วัสดุผสมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ วัสดุผสมในบางท้องถิ่นที่มีสารเคมีผสมอยู่ในเนื้อดิน จะทำปฏิกิริยากับต่างในปูนซีเมนต์เกิดเป็นก้อนและขยายตัวทำให้เกิดรอยร้าวทั่วไปในคอนกรีต ในกรณีที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุผสมเหล่านี้ จะต้องใช้กับปูนซีเมนต์ที่มีเปอร์เซ็นต์ของต่างต่ำ

5) ลักษณะรูปร่างและผิว (Particle Shape and Surface Texter) มีความสำคัญต่อการควบคุมความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผสมใหม่ๆ วัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นแฉงเหลี่ยมคม วัสดุผสมที่เป็นแผ่นแบนหรือชิ้นยาวไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ เพราะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมที่มีรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมเพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้ (Workability) ที่ใกล้เคียงกัน ทำให้เปลืองซีเมนต์ ลดกำลังและแรงยึดเหนี่ยวภายในก้อนซีเมนต์ปกติ ยอมให้มีวัสดุผสมนี้ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมที่ใช้วัสดุรูปร่างกลมช่วยทำงานง่ายและประหยัด เพราะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมน้อยกว่าวัสดุที่เป็นแฉงเป็นมุมแต่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างก้อนกับซีเมนต์ต่ำกว่าวัสดุที่มีผิวหยาบหรือตัน จะช่วยให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างก้อนดีขึ้น

6) ความสะอาด (Cleanliness) วัสดุต้องสะอาด มีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของคอนกรีตน้อยที่สุด สารเหล่านี้ได้แก่ เปลือกหอย ชานอ้อย ถ่านหิน ถ่าน เศษไม้ ก้อนดิน โคลนเลน ฤงพลาสติก หรือฝุ่นละเอียด สิ่งเหล่านี้จะลดความทนทานและแรงยึดเหนี่ยวบางครั้งอาจ

ทำให้คอนกรีตแตกร้าวมีกำลังต่ำ แข็งตัวช้าหรือไม่แข็งแรง เกิดรอยเปื้อนหรือหลุดออกเป็นรูโพรง การจัดสิ่งสกปรกที่เจือปน ทำได้หลายวิธี เช่น ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรง

7) ความลดหลั่นของขนาด หรือส่วนขนาดคละ (Gradation) วัสดุผสมที่ใช้ผสมทำคอนกรีต ต้องมีความลดหลั่นของขนาด ซึ่งจะช่วยให้เรียงตัวกันได้แน่น และมีช่องว่างน้อย การทดสอบหาคุณสมบัติข้อนี้ทำได้โดยวิธีผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Gradation Test)

8) แรงยึดเหนี่ยว (Bond) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของมวลรวม กับกำลังของซีเมนต์เพสต์ ลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อการจับยึดกับซีเมนต์เพสต์ มวลรวมที่มีเหลี่ยมมุมและพื้นที่ผิวมาก จะส่งผลให้มีการยึดเหนี่ยวที่ดี ลักษณะผิวของมวลรวมมีผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยวสูงขึ้นไป แต่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น สำหรับลักษณะทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับแร่ประกอบต่างๆ ของมวลรวมซึ่งแร่บางตัวอาจทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์เพสต์ ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์รอบๆ ลดลง

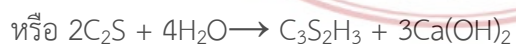
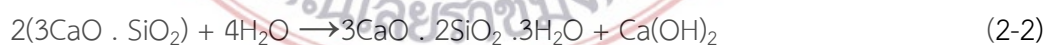
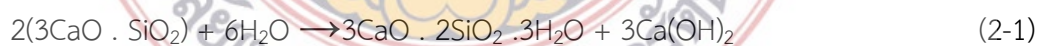
### 2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบในซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ

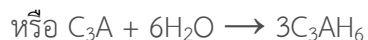
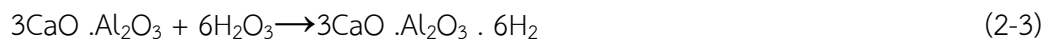
1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนของสารละลาย และไอออนผสมกัน ทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction” ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในแต่ละช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภทซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำน้ำ เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ สารประกอบต่างๆของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมีความร้อนขึ้นด้วยสารประกอบเหล่านี้มีปฏิกิริยากับน้ำดังนี้

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S, C_2S$ ) แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดได้ ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2)



- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (2-3)

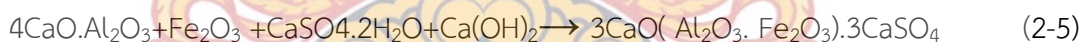


เพื่อหวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดยิบซั่มจะทำให้ปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังสมการที่ (2-4)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน  $C_3A$  กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นไปอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Suplate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ ) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่มและแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrit ดังสมการที่ (2-5)



โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-4

ตาราง 2-4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80

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

ที่มา : (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Heat of Hydration) ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ที่มีมากก็จะทำให้อคอนกรีตแตกร้าวได้เมื่อเย็นตัวลง ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีนี้จะมี

ผลมากต่อโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่น เขื่อนใหญ่ๆ นอกจากใช้ซีเมนต์ที่ทำให้ความร้อนน้อยแล้วยังต้องมีการลดความร้อนของคอนกรีต เช่น ใช้น้ำเย็นหรือน้ำแข็งผสมคอนกรีตและมีระบบระบายความร้อนคอนกรีตที่เทด้วย ปริมาณความร้อนใน 7 วันแรกของซีเมนต์ประเภทต่างๆเมื่อเทียบกับประเภทหนึ่งมีดังนี้

- ประเภท 1 = ร้อยละ 100
- ประเภท 2 = ร้อยละ 80-85
- ประเภท 3 = ร้อยละ 150
- ประเภท 4 = ร้อยละ 40-60
- ประเภท 5 = ร้อยละ 60-75

3) การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์พิเศษผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้งนั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการเกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งอธิบายการเกิด “Dormant Period” อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1-2 ชม. ในขณะที่ซีเมนต์พิเศษเหล่านี้มีความสามารถเท่าได้เมื่อสิ้นสุดช่วง “Dormant Period” ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดกว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์และเกิดผิวสัมผัสทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์พิเศษ เวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่เม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือเข้าสู่จุดแข็งตัวขั้นสุดท้าย (Final Set)

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และคุณสมบัติของซีเมนต์พิเศษที่แข็งตัวแล้วจะเกิดขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว แล้วปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ อายุพิเศษ ยกเว้นช่วง Dormant Period ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดช่วงแรกและอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกันความละเอียดของซีเมนต์ จะมีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรก ปฏิกิริยาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงหลังอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและตึกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงอุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของพิเศษ น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราการเกิดตามลำดับ

### 2.1.4 วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น

ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้วัสดุบางชนิดผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ วัสดุเฉื่อย (Inert Materials) วัสดุซีเมนต์ (Cementing Materials) และวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

คอนกรีตที่ขาดมวลรวมที่ค่อนข้างละเอียดจะเกิดการแยกตัวได้ง่าย และไม่เหมาะสมในการลำเลียงโดยการสูบลหรือการเทโดยใช้ท่อ การเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการ วัสดุเฉื่อยจำพวก หินปูนบดละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใช้วัสดุเฉื่อยผสมในคอนกรีตยังช่วยลดการเยิ้ม น้ำ และการตกแตงผิวของคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้นซีเมนต์ผสมที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อย การใช้วัสดุเฉื่อยเพื่อแทนที่ซีเมนต์จะลดกำลังของคอนกรีตเพราะปริมาณซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างของอาคารซึ่งต้องรับแรงสูง

วัสดุซีเมนต์ปอซโซลาน นอกจากใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใช้วัสดุเฉื่อยแล้วแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังและความทนทานดีขึ้นด้วย วัสดุซีเมนต์ได้แก่ซีเมนต์ธรรมชาติและตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ในตนเองและสามารถทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของ CSH และ CAH เหมือนกับปฏิกิริยาของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า และกำลังในช่วงแรกจะต่ำกว่าของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มาตรฐาน ASTM C168 ให้จำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังอัดสูง โดยปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ของวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-5 โดยที่วัสดุปอซโซลานประเภทเถ้าลอยจะมีการแยกประเภทโดยใช้องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งแต่ละประเภทก็มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-5 วัสดุปอซโซลานกับปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีในวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน	ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (ร้อยละ SiO <sub>2</sub> )
ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)	90 +
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-Furnace Slag)	32 - 40
เถ้าหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash or Pulverized Fuel Ash)	40
เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)	85 - 95
เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)	60 - 70
เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)	65 - 75
จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (Effective Microorganism)	80

ที่มา : (ชัชวาล เศรษฐบุต, 2536)

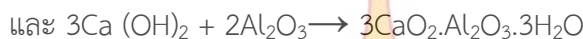
ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประเภทเถ้าลอยและเถ้าตะกรัน

สารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	Class F	Class C
Silica + Alumina + Ferrite	> 70	> 50
SO <sub>3</sub>	< 5	< 5
LOI	< 6	< 6
Na <sub>2</sub> O (Alkali)	< 1.5	< 1.5
CaO	< 5	< 20-30
Carbon	< 5	< 1

ที่มา : (ชัชวาล เศรษฐบุต, 2536)

### 2.1.5 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในเถ้าหลายปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และ คัลเซียมอลูมิเนทไฮดรอกไซด์ ในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูป สมการดังแสดงในสมการที่ (2-6)



ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อ คอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของของคอนกรีตให้ ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น

### 2.1.6 วัสดุชีวมวล

วัสดุชีวมวล (Biomass) หมายถึง พืชและสัตว์ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของ โลกและถูกจัดเป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากพลังงานจากฟอสซิลมีอยู่อย่างจำกัดและอาจจะหมดลงได้ แบ่งวัสดุชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

**2.1.6.1 พืชผลทางเกษตรกรรม (Agricultural Crops)** เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าว ฟางหวาน ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่ สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

**2.1.6.2 เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร (Agricultural Residues)** เช่น ฟางข้าว เศษลำต้น ข้าวโพด ชังข้าวโพด เหย้ามันสำปะหลัง

**2.1.6.3 ไม้และเศษไม้ (Wood and Wood Residues)** เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

**2.1.6.4 ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste Streams)** เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้เลี้ยง เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

พลังงานชีวมวล (Bio-energy) หมายถึงพลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆดังกล่าวแล้ว ข้างต้น โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้ คือ

- การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผาจะได้รับความร้อน ออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

- การผลิตก๊าซ (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวล ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง ที่เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (Biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (Gas Turbine)

- การหมัก (Fermentation) เป็นการนำเอาชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียใน สภาวะไร้อากาศชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัวเกิดเป็นแก๊สชีวภาพ (Biogas) ที่มีองค์ประกอบ ของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิต กระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมการเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้



- การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืชมีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้ กระบวนการทางชีวภาพทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ชานอ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาลและเศษลำต้นอ้อยให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

- กระบวนการทางฟิสิกส์เคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืช จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

- กระบวนการให้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจนจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกันเป็นพลังงานชีวมวล ได้แก่ เอทานอลและไบโอดีเซล

### 2.1.7 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์ม น้ำมันได้แก่เศษกะลาเส้นใยและทลายปาล์มเปล้าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-9000 °C ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปีทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปีและหลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปีเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่ายเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปีส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมาเช่นปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

**2.1.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเถ้าแกลบ และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือ ปริมาณร้อยละ 60-70 มีผลรวมของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ประมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง คือ ประมาณร้อยละ 10 ซึ่งปริมาณ LOI ที่อยู่ในเถ้าปาล์มส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่ติดน้ำมากทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้นและหาก LOI มากๆ (มากกว่าร้อยละ 20) จะส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการรับกำลังลดต่ำลงได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เผาไม่สูงมากและระยะเวลาในการใช้การเผาที่สั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ แม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจะเป็นวัสดุสังเคราะห์ (เพราะได้จากการเผากากของผลปาล์มน้ำมัน) ซึ่งแตกต่างจาก ASTM C618 ที่ระบุวัสดุปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุจากธรรมชาติ

**2.1.7.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน** ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ มีความพรุนสูง รูปร่างกลมมดติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด มีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอนอนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดและมีความอนุภาคที่ใหญ่มาก

ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมัน การบดไม่เพียงเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ยังเป็นการลดความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันอีกด้วย

**2.1.7.3 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตสด** เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียด มีความพรุนน้อยกว่าเถ้าแกลบบดละเอียดที่มีขนาดเท่ากันดังนั้นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแต่การใช้เถ้าปาล์มที่ได้จากโรงงานโดยตรงจะใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตเนื่องจากการดูดน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมันระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีของการใช้วัสดุปอซโซลานทั่วไปคือจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยาวนานขึ้นกว่ากรณีของคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 15-20 min. เมื่อแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10-20 และการก่อตัวจะนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 40-60 min. เมื่อแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30-40 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานที่สามารถนำมาแทนที่ซีเมนต์ได้จะมีอยู่หลายประเภทซึ่งจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	ซีเมนต์ประเภท 1	ถ่านหินแม่เกาะ	เถ้าปาล์มน้ำมัน	ซิลิกาฟูม	เถ้าแกลบ
SiO <sub>2</sub>	20	48	65	92	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	26	3	0.7	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	10	2	1.2	2.0
CaO	60	5	6	0.2	0.5
MgO	1.1	2	3	0.2	0.2
SO <sub>3</sub>	2.4	0.7	0.4	-	1.5
ออกไซด์อื่น ๆ	1.5	1.3	7	2.6	-
LOI.	2	3	10	-	4.7

ที่มา : (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

### 2.1.8 องค์ประกอบของหินปูน

หินปูนที่มาจากแหล่งหินปูน เป็นหินที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) แตกต่างจากปูนขาวซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  หรือ  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$ ) ทำให้หินปูน ไม่มีฤทธิ์ต่างจัดเหมือนปูนขาวและอัตราการละลายน้ำเป็นค่อยไป จึงไม่มีผลกระทบรุนแรงต่อปฏิกิริยาดินและสิ่งมีชีวิตในดินมากนัก แม้จะใส่ลงไปดินในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า หินปูนฝุ่นมีปริมาณแคลเซียมในระดับร้อยละ 58.74 แมกนีเซียมในระดับร้อยละ 1.98 และมีแมงกานีส เหล็ก ทองแดง และสังกะสีปะปนกันในระดับ 196.85, 1,220.67, 1.98 และ 20.06 mg. ตามลำดับ

### 2.1.9 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือวิธีที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากคอนกรีตแข็งตัว หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการคือ การป้องกันการสูญเสียน้ำจากรูปร่างของคอนกรีต และการรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุดกรรมวิธีบ่ม เราแบ่งกรรมวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิด ตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ

**2.1.9.1 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ** สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือการเพิ่มความชื้นและป้องกันความชื้น

1) การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นต่อผิวของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรก ที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตลงด้วยจึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน

2) วิธีการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีต มิให้เล็ดรอดออกสู่ภายนอกการป้องกันความชื้นวิธีนี้ได้แก่ การใช้กระดาษกันน้ำ ผ้าพลาสติก หรือสารเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังถอดก็สามารถป้องกันการเสียน้ำได้เช่นกัน

**2.1.9.2 การบ่มที่อุณหภูมิสูง** เป็นการบ่มที่สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็วเป็นที่นิยมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และพื้น เป็นต้น ข้อดีในการปฏิบัติ คือสามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้นประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งาน

#### 2.1.9.3 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing)

อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิระหว่าง 40-100 °C ส่วนอุณหภูมิที่ให้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65-80 °C การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการอุณหภูมิจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยสูงสุดจะมีค่าต่ำ อุณหภูมิที่ต่ำทำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูงแต่ด้วยอัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว สิ่งที่สำคัญก็คือ เวลาที่ใช้ในการบ่มซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดจริงและการลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิปกติ ควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 2-6 hr. หลังการหล่อก่อนที่จะสัมผัสกับไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นก่อนอุณหภูมิเพิ่มของอุณหภูมิไม่ควรให้เกิน 30 °C /hr

เวลาที่คอนกรีตอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดเป็นสิ่งกำหนดปริมาณกำลังที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่นี้ควรใช้อัตราการลดอุณหภูมิระหว่าง 20-30 °C /hr

### 2.1.9.4 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)

หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกินเกิน 100 °C เราต้องให้ความกดดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิทซึ่งมีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160-210 °C มีความดัน 6-20 atm สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C และมีผลที่สำคัญ คือสามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 hr. เพราะคอนกรีตมีกำลังสูง ทดเทียบการบ่มปกติเป็นเวลา 28 hr. มีการหดตัวและการล้าลดลงมากทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้นกำจัด Efflorescence มีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม

### 2.1.10 กำลังต้านทานของคอนกรีต

กำลังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว เป็นต้น แต่ที่ต้องการและสำคัญที่สุด คือ กำลังต้านทานแรงอัด ทั้งนี้เพราะกำลังต้านทานหรือรับแรงแบบอื่น เป็นสัดส่วนกับกำลังต้านทานแรงอัด

**2.1.10.1 กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength)** คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าแรงชนิดอื่นๆ มากในการออกแบบจึงให้คอนกรีตรับแรงอัด ดังนั้นกำลังต้านแรงอัดจึงใช้เป็นเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงอัดนี้จะบอกเป็นกำลังอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแท่งทดสอบมาตรฐานซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

ก) แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinders) เป็นแท่งทดสอบมาตรฐานของอเมริกาแบบหล่อรูปทรงกระบอกจะมีความสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดของทรงกระบอกที่ใช้มีหลายขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. (2 in.) ถึง 900 mm. (36 in.) ขนาดของทรงกระบอกที่จะใช้ทดสอบขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวม มาตรฐาน ASTM (14 C 192 และ 14 C 31) กำหนดว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอกจะต้องโตกว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวมไม่น้อยกว่า 3 เท่าในการก่อสร้างโดยทั่วไปขนาดใหญ่สุดของหินประมาณ 25 – 50 mm. (1-2 in.) ดังนั้นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm. (6 in.) จึงนิยมใช้มากที่สุดกำลังของคอนกรีตที่วัดได้ทรงกระบอกขนาดใหญ่ก็นิยมใช้มากที่สุด กำลังของคอนกรีตที่รับได้จากทรงกระบอกขนาดใหญ่ จะมีค่าน้อยกว่าที่วัดได้จากทรงกระบอกขนาดเล็ก สาเหตุอันหนึ่งเนื่องจากคอนกรีตที่มีรูปทรงขนาดใหญ่ย่อมมีการรับกำลังดีกว่าคอนกรีตที่มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับการเลือกใช้หน้าตัดคอนกรีตขนาดใหญ่ย่อมมีการรับกำลังได้ดีกว่าขนาดเล็ก

ข) แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cube) เป็นแท่งทดสอบตามมาตรฐานของอังกฤษ ซึ่งขนาดของทรงลูกบาศก์มีขนาดตั้งแต่ 50 mm. (2 in.) ขึ้นไป เช่นเดียวกับทรงกระบอก แต่ที่ใช้เป็นมาตรฐาน ก็คือขนาด 150 mm. (6 in.) และขนาดโตสุดของหิน ต้องไม่โตกว่า 1/3 ของแบบหล่อทดสอบ เช่น แบบหล่อทดสอบขนาด 150X150X150 mm. ขนาดโตสุดของหินในคอนกรีตต่อ 50 mm. หรือ 2 in.

### 2.1.11 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินทั่วไป ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จะถูกควบคุมโดย ความพรุนของซีเมนต์เพสต์โดยความพรุน (Capillary Porosity) จะมากขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration) แสดงให้เห็นว่า ผน ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่กำหนด ความสามารถซึมผ่านได้จะต่ำ สำหรับเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ w/c ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งช่องทางไหลของน้ำ (Capillary) จะถูกแบ่งหรือทำให้แยกออกไม่ต่อเนื่องกัน ในส่วนผสมที่กำหนด w/c ให้ความสามารถซึมผ่านจะลดลงถ้าปูนซีเมนต์มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามระยะเวลาการบ่ม และการทำให้คอนกรีตอัดแน่นก็มีผลต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัดมาตัดบริเวณกึ่งกลางของความสูงให้ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 4 cm. จากนั้นหล่ออิพ็อกซีหนาประมาณ 2.5 cm. รอบๆ ผิวด้านข้างของตัวอย่างดังกล่าว แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 hr. จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบงานวิจัยนี้ใช้ความดันของน้ำเท่ากับ 0.5 Mpa หรือ 5 bar ซึ่งเป็นความดันที่ Concrete Society ได้แนะนำไว้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตคำนวณโดยใช้สมการที่ (2-6) ซึ่งเป็นสมการที่ มีนักวิจัยหลายท่านใช้กัน

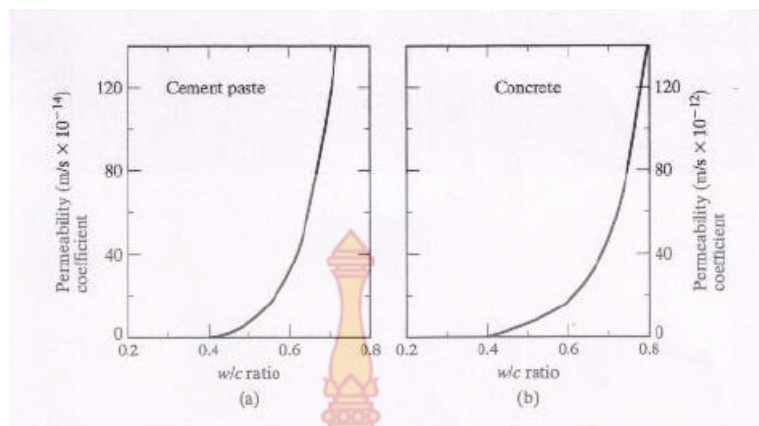
$$\text{สมการอัตราการซึมผ่านน้ำ ; } K = \frac{\rho L g Q}{PA}, \text{ m/s} \quad (2-7)$$

โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (m/s),  $\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ ), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ ), Q คืออัตราการไหลของน้ำ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), L คือความหนาของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ (m.), P คือความดันน้ำสัมบูรณ์ ( $\text{kg-m/m}^2$ ) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ ( $\text{m}^2$ )

คอนกรีตที่ออกแบบมาให้ซึมผ่านได้อย่างรวดเร็ว โดยถือเป็นคอนกรีตเบาประเภทหนึ่งที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,600 – 2,000  $\text{kg/m}^3$  มีอัตราการซึมผ่านน้ำ 200 l. /  $\text{m}^2/\text{min}$ . มีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีจึงเหมาะกับการใช้งานในงานพื้นทางเดินเท้าพื้นลานจอดรถ งานตกแต่งภูมิทัศน์ พื้นผิวที่ต้องการปลูกหญ้าด้านบน และมีความแข็งแรงรับน้ำหนักได้ดี และพื้นโรงเรือนเพาะชำ เพราะช่วยลดปัญหาน้ำท่วมขัง เพื่อให้มีความปลอดภัย และสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

คอนกรีตน้ำซึมผ่านได้ ยังมีอัตราการนำความร้อนต่ำ และมีความสามารถเป็นฉนวนดีกว่าคอนกรีตปกติ จึงช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเครื่องปรับอากาศได้ และที่มากกว่านั้นยังสามารถออกแบบและพัฒนาเพื่อให้เป็นระบบการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ภายในอาคาร และที่สำคัญยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนจากระบบระบายน้ำ และเหล็กเสริมคอนกรีตได้ ในกรณีพื้นที่ใช้งานขนาดเล็ก และไม่ได้รับน้ำหนักมาก เพราะสามารถออกแบบให้น้ำซึมลงสู่ดินเดิมได้เลย ไม่จำเป็นต้องมีระบบระบายน้ำออกจากพื้นที่

ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต (Permeability of Concrete) ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดต่อความคงทนของคอนกรีตคือ w/c Ratio โดยที่หากคอนกรีตมีค่า w/c Ratio ลดลงคอนกรีตจะมีความแน่นตัวมากขึ้นหรือที่บ่งชี้ในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อค่าการซึมผ่านของ (a) ซีเมนต์เพสต์และ (b) คอนกรีต  
ที่มา : (นิธิส สุภาวี, 2557)

Mindess et al.,(c2002) กล่าวว่ากลไกการซึมผ่านของคอนกรีตคือการซึมของสารผ่านรูพรุนหรือรอยร้าวในเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยปกติในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะมีรูพรุน 2 ประเภทเป็นหลักคือรูพรุนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าช่องว่างคาร์ปิลลารี (Capillary Pore) และรูพรุนขนาดเล็กที่เรียกว่าช่องว่างในเจล (Gel Pore) การซึมผ่านจะเกิดโดยการซึมผ่านรูพรุนขนาดใหญ่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นหลักมากกว่าการซึมผ่านรูพรุนขนาดเล็กซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นจะแปรผันตามค่า w/c Ratio ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ค่า w/c Ratio มากกว่า 0.42 นอกจากนั้นค่า w/c Ratio ที่ลดลงและทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นยังมีผลที่ตามมาคือทำให้ความสามารถในการต้านทานรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตสูงขึ้นด้วยจึงเป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีตเช่นกัน



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาตรของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์

ที่มา : (นิธิส สุภาวี, 2557)

จากที่ได้กล่าวมาความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการซึมผ่านยังอาจเกิดได้มากขึ้นหากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมในเนื้อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้นในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงการซึมผ่านของน้ำเป็นหลักซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องใช้ในการเก็บน้ำเป็นต้น เมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติด้านนี้ในวงการก่อสร้างมักจะกล่าวถึงในรูปของความทึบน้ำ (Watertightness) ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ (Impermeability) การหาค่าความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำสามารถหาได้โดยคำนวณจากกฎของ Darcy's law ดังสมการที่ (2-8)

$$V = K_p (h/x) \quad (2-8)$$

โดย V = อัตราการไหลของน้ำ

h = แรงดันน้ำ (Hydraulic Pressure)

x = ความหนาของตัวอย่างที่น้ำไหลผ่าน

K<sub>p</sub> = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

โดยค่า K<sub>p</sub> มีค่าไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กับ w/c Ratio และอายุของซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 2-2 และโดยทั่วไปการซึมผ่านของสารจำพวกก๊าซจะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าน้ำประมาณ 10 ถึง 100 เท่า

ตารางที่ 2-8 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (w/c Ratio = 0.51)

Effect of Age Cement Paste on Its Permeability Coefficient w/c 0.51		
Age (day)	K <sub>p</sub> (m/s)	Independent of w/c
Fresh Paste	10 <sup>-5</sup>	Capillary pores interconnected
1	10 <sup>-8</sup>	
3	10 <sup>-9</sup>	
4	10 <sup>-10</sup>	
7	10 <sup>-11</sup>	
14	10 <sup>-12</sup>	
28	10 <sup>-13</sup>	
100	10 <sup>-16</sup>	Capillary pores discontinuous
240 (Maximum Hydration)	10 <sup>-18</sup>	

ที่มา : (นิธิส สุภาวี, 2557)

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์นั้นปกติมีค่าต่ำมากถึงแม้ว่าจะมีความพรุนมากก็ตามทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate ; C-S-H) ซึ่งจะเข้าไปอุดรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ให้รูพรุนที่มีอยู่ไม่ต่อเนื่องกันดังนั้นภายใต้เงื่อนไขที่มีการบ่มอย่างต่อเนื่องอายุของคอนกรีตจึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อความสามารถในการซึมผ่านคือยิ่งคอนกรีตที่มีอายุมากจะยังมีจำนวนรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องมากขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน

Curing Time Required to Produce a Discontinuous System of Capillaries (Assuming Continuous Moist Curing)	
w/c Ration	Curing time (day)
0.40	3
0.45	7
0.50	28
0.60	180 (6 months)
0.70	365 (1 year)
>0.70	Not possible

ที่มา : (นิธิส สุภาวี, 2557)

เมื่อกล่าวถึงความสามารถในการซึมผ่านการผสมสารจำพวกสารกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) ก็มีผลต่อคุณสมบัตินี้เช่นกันกล่าวคือปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณสมบัตินี้ในทางตรงกันข้ามการผสมสารจำพวกนี้มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีการยึดและการแยกตัวน้อยลงรวมทั้งความต้องการน้ำในส่วนผสมก็น้อยลงด้วยซึ่งล้วนเป็นผลดีต่อคุณสมบัติในด้านนี้ดังนั้นหากพิจารณาผลทั้งหมดพบว่าการใส่สารจำพวกนี้มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านนี้โดยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ดีขึ้น การผสมสารผสมเพิ่มจำพวกแร่ธาตุ (Mineral Admixture) เช่น ซิลิกาฟูมก็มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้นเช่นกันโดยสารผสมเพิ่มชนิดนี้เป็นวัสดุผงละเอียดได้จากกระบวนการผลิตโลหะซิลิกอนหรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยส์ (Ferro-Silicon Alloy) เป็นผงมีความละเอียดสูงมาก (ขนาดเล็กกว่าผงซีเมนต์ประมาณ 70- 100 เท่า) ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนกว่าร้อยละ 90 ราคาแพงมากทำปฏิกิริยาเร็วมากให้คอนกรีต



กำลังสูงสุดการเริ่มและการแยกตัวให้ความที่บนน้ำสูงเนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กจึงสามารถอุดช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีตได้รวมทั้งด้วยคุณสมบัติที่เป็นสารปอซโซลานจึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลลัพท์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันและให้ C-S-H ซึ่งเป็นสารที่ทำให้กำลังรวมทั้งยังเป็นตัวอุดช่องว่างระหว่างรูพรุนในเนื้อคอนกรีตตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วแต่ข้อดีของการใช้ซิลิกาฟุ่มคือความสามารถในการทำงานไม่ตึงนั้กตั้งนั้นจึงต้องใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ในการทำคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) สารชนิดนี้มีทั้งชนิดเป็นผงและชนิดของเหลวซึ่งได้จากการผสมร่วมกับน้ำในอัตราส่วน 50:50 อัตราการใช้ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ คุณสมบัติที่กล่าวมาเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้านอื่นๆ อีกเช่น กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength), โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity), การล้าของคอนกรีต (Creep), การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, การนำความร้อน, หน่วงน้ำหนักและความคงทนเป็นต้น ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงเรื่องความคงทน (Durability) ของคอนกรีตซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของคอนกรีตอย่างละเอียด

### 2.1.12 รูพรุนและการดูดซึมน้ำ (Porosity and Absorbtion)

รูพรุนในมวลรวมมีทั้งเชื่อมต่อกันและไม่เชื่อมต่อกัน การที่มวลรวมเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีต (มากกว่าร้อยละ 60-70 โดยปริมาตร) รูพรุนของมวลรวมย่อมส่งผลโดยตรงต่อความพรุนของเนื้อคอนกรีตโดยรวมเช่นกัน โดยทั่วไป ปริมาตรของรูพรุนสัมพันธ์โดยตรงกับการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่มีความพรุนสูงย่อมมีความดูดซึมน้ำสูงเช่นกัน เมื่อนำมวลรวมที่มีความพรุนสูงมาผสมคอนกรีต ความพรุนของมวลรวมก็จะดูน้ำออกจากส่วนผสมคอนกรีตในปริมาณสูงทำให้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นมวลรวมที่ดีควรมีค่าดูดซึมน้ำต่ำ

อย่างไรก็ตามในคอนกรีตบางประเภท เช่น คอนกรีตมวลเบา อาจจำเป็นต้องใช้มวลรวมที่มีความพรุนสูงเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยที่น้ำหนักเบา ซึ่งในกรณีนี้อาจต้องเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อการดูดซึมน้ำของมวลรวม หรือ อาจจะต้องทำให้มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง โดยการแช่น้ำไว้ก่อนที่จะนำมาผสม ซึ่งเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวตั้งแต่เริ่มผสมแล้วทำให้ปริมาณการดูดซึมน้ำออกจากส่วนผสมคอนกรีตลดลงได้

ค่าการดูดซึมน้ำสามารถหาได้การนำผลต่างระหว่างน้ำหนักมวลรวมแห้งและมวลรวมเปียกหารน้ำหนักแห้งและคูณด้วย 100 ดังแสดงในสมการที่ (2-9) ที่กล่าวมาในช่วงต้น ตัวอย่างการคำนวณโดยอ้างจากผลการทดลองในตัวอย่างที่ 1 พบค่าดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ

$$\text{Absorption (\%)} = \left[ \frac{B - A}{B} \right] \left[ \frac{B - A}{B} \right] \times 100 \quad (2-9)$$

ค่าการดูดซึมน้ำมีผลต่อระดับความชื้นของมวลเช่นกัน โดยระดับความชื้นของมวลรวมสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับ ดังนี้ 1) ชุ่ม (Moist) มีน้ำเต็มช่องว่างทั้งหมดของมวลรวม ผิวภายนอกเปียกชุ่ม 2) อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) มีน้ำเต็มช่องว่างทั้งหมดของมวลรวมแต่ผิวภายนอกเปียกแต่ไม่ชุ่ม น้ำ 3) ผิวแห้ง (Air Dried) ผิวภายนอกแห้ง แต่ยังคงความชื้นอยู่ภายใน

ช่องว่างของมวลรวม และ 4) แห้งสนิท (Bonded Dry) ผิวภายนอกและช่องว่างทั้งหมดแห้งระดับความชื้นของมวลรวมก่อนนำไปผสมจะมีต่อความสามารถในการเทของคอนกรีต มวลรวมที่แห้งจะดูดน้ำออกจากส่วนผสมคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำบางส่วนไป ทำให้ความสามารถในการเทต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ในทางตรงกันข้ามมวลรวมที่มีความชื้นมากเกินไประดับอิ่มตัวผิวแห้งจะคายน้ำเข้าสู่ส่วนผสมคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความเหลวมากเกินไป ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c Ratio) สูงเกินกว่าที่ออกแบบไว้และทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าที่ออกแบบไว้

### 2.1.13 พลังงานไมโครเวฟ

**2.1.13.1 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ** ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นไมโครเวฟ (0.3-300 GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm.- 0.3 mm. ดังรูปที่ 2-3 มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ ไมโครเวฟมีความยาวคลื่นหรือความถี่ในการทะลุทะลวงเท่ากับ 2 cm. ในช่องว่าง เมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานของไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า (ใช้อากาศร้อนหรือน้ำ) ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายใน ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา : (กนกกาญจน์ ทองซิ้ม, 2553)

**2.1.13.2 สมการพื้นฐาน (Basic Equation)** สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือ Maxwell Curl Relation รูปอนุพันธ์ของ Maxwell's Equation สามารถแสดงในเทอมของความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity, E) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) เราสามารถแสดง Maxwell's Equation ในเทอมของเวลา (time) และระยะกระจัดของตำแหน่ง (space) โดยเมื่อแทนค่าจะได้ตั้งสมการที่ (2-10) ถึง (2-13)

$$\Delta \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-11)$$

$$\nabla \times \vec{D} = \vec{q} \quad (2-12)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2-13)$$

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็กตามลำดับ , J คือความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้า (Current Density), D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J, D และ B กับ E และ H โดยเมื่อแทนค่าจะได้ดังสมการที่ (2-14) ถึง (2-16)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2-14)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2-15)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2-16)$$

โดย  $\sigma$  คือ Electric Conductivity,  $\mu$  คือ Magnetic Permeability และ  $\epsilon$  คือ Permittivity หรือ Dielectric Constant แทนสมการที่ (2-14) ถึง (2-16) ลงในสมการที่ (2-11) ถึง (2-12) จะได้โดยเมื่อแทนค่าจะได้ดังสมการที่ (2-17) ถึง (2-20)

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2-17)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2-18)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2-19)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2-20)$$

The curl relation หรือสมการที่ (2-17) และ (2-18) อ้างอิงมาจาก Faraday's Law และ Ampere's Law ตามลำดับและสมการ Divergence หรือสมการที่ (2-19) และ (2-20) เป็นผลมาจาก Gauss's Law. The Curl relation ใน Maxwell's Equation จะวัดการหมุนของสนาม จากสมการที่ (2-17) อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการที่ (2-19) แสดงถึง divergence ของสนามแม่ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Position Charge Density และสมการที่ (2-20) แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (Source) หรือแหล่งรับ (Sink) ของสนามแม่เหล็กสำหรับคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ โดยเมื่อแทนค่าจะได้ดังสมการที่ (2-21) ถึง (2-23)

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2-21)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-22)$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon \tan \delta \quad (2-23)$$

เมื่อ  $f$  คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ,  $\tan \delta$  คือ Loss Tangent Coefficient, และ  $\epsilon_r$  คือ Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant และ  $\mu_r$  คือ Relative Magnetic Permeability ตามลำดับ ถ้าพิจารณาจากสนามแม่เหล็กค่า Magnetic Permeability,  $\mu$  ของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ใน

งานประยุกต์ทางการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถประมาณได้เท่ากับในอากาศ โดยทั่วไปสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะถูกสมมติให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของการทำความร้อน (Heating) และการหลอมเหลว (Melting) ด้วยไมโครเวฟและจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Drying) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

อุณหภูมิของชิ้นทดสอบที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟสามารถพิจารณาได้จากสมการการส่งผ่านความร้อน (Conventional Heat Transport Equation) ซึ่งรวมเทอมของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในวัสดุเนื่องจากไมโครเวฟ สมการพลังงานที่อธิบายการเพิ่มของอุณหภูมิในเชิงธรรมชาติคอมพิวเตอร์คือสมการการส่งถ่ายความร้อนที่ขึ้นกับเวลา ดังแสดงในสมการที่ (2-24)

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{Q}{k} \quad (2-24)$$

โดยกำหนดให้ เท่ากับ สำหรับพิกัดแกนฉาก แทนค่าลงในสมการ (2-24) จะได้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q}{k} \quad (2-25)$$

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$  คือ ค่าการกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) มีหน่วยเป็น

$m^2/s$  และค่า  $Q$  สำหรับงานวิจัยนี้แทนด้วย  $Q$  ของไมโครเวฟ นำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ (2-25) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho \cdot Cp} \quad (2-26)$$

จากสมการที่ (2-26) ได้ทำการแปลงสมการเพื่อใช้สำหรับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

**2.1.13.3 การเกิดความร้อนในเชิงธรรมชาติคอมพิวเตอร์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ** สำหรับการนำความร้อนในเชิงธรรมชาติคอมพิวเตอร์แบบทั่วไป จะนำความร้อนผ่านอนุภาคที่เรียกว่าโฟนอน (Phonon) เป็นกลุ่มของพลังงานที่สามารถพิจารณาได้ว่ามีสมบัติเหมือนอนุภาคใด ๆ จัดเรียงตัวไปตามโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ ให้ความร้อนกับยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ความร้อนจะถูกส่งผ่านโฟนอน ซึ่งโฟนอนจะเก็บสะสมพลังงานและโมเมนตัมไว้ในอนุภาค หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปชนโฟนอนอื่นตามทิศทางของโซ่โมเลกุล โดยพลังงานและโมเมนตัมที่สะสมอยู่ในโฟนอนนั้นจะถ่ายเทสู่อุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ชนกันนี้ไปเรื่อย ๆ จนสุดท้ายโซ่โมเลกุลหรือจนกว่าจะเจอกับบริเวณสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) หรือบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่นระดับของพลังงานและโมเมนตัมก็จะลดลง อย่างไรก็ตามโฟนอนสามารถที่จะบรรจุความร้อนไว้ได้ในระดับหนึ่งแต่ไม่มากนัก จึงส่งผลให้ความสามารถในการนำความร้อนของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์มีค่าต่ำ แต่พฤติกรรมการเกิดความร้อนในเชิงธรรมชาติคอมพิวเตอร์ที่ใช้ไมโครเวฟจะแตกต่างจากพฤติกรรมการเกิดความร้อนในเชิงธรรมชาติคอมพิวเตอร์ที่ให้ความร้อนแบบทั่วไป กล่าวคือ วัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การเกิดความร้อนเมื่อได้รับไมโครเวฟจะได้รับอิทธิพลมาจากผลของโมเลกุลของน้ำที่มีรูปแบบเป็นไดโพล เมื่อวัสดุดังกล่าวได้รับไมโครเวฟโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในตัววัสดุจะเกิดการ

เคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการเสียดสีกันเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้น แต่ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในช่วงแรกจะแสดงพฤติกรรมกลไกการเกิดโพล่าไรซ์ก่อนเพื่อทำให้เกิดการมีขั้วแบบชั่วคราว หลังจากนั้นจึงนำพลังงานที่ได้รับจากไมโครเวฟมาแปลงเป็นพลังงานความร้อนแต่ความร้อนที่เกิดขึ้นยังเกิดได้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่มากนอกจากนี้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลแต่ละสายโซ่ยังไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการเคลื่อนที่หรือการเคลื่อนตัวโมเลกุลเพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าจึงทำได้ค่อนข้างช้าและยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการเติมเขม่าเข้าไปในยางธรรมชาติคอมพาวด์เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานให้มากยิ่งขึ้น เพราะตัวเขม่าดำเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี ดังนั้นการเติมเขม่าเข้าไปจะช่วยให้เวลาในการเพิ่มของอุณหภูมิลดลง ยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะสามารถเกิดความร้อนได้มากขึ้นด้วย

**2.1.13.4 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept)** คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายใน วัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังแสดงในสมการที่ (2-27)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' (\tan \delta) E^2 \quad (2-27)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ  $\epsilon''$  คือ Relative Dielectric Constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟโดย  $\epsilon_0$  คือ Dielectric Constant ของอากาศและ  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน

ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า, และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่าของคลื่นไม่มีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากขึ้น แต่ถ้าค่ามีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านขึ้นไม่โดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ลักษณะของชิ้นไม้และขนาดของชิ้นไม้ด้วย

ส่วนค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้สามารถหาได้จากสมการที่ (2-28)

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon' r \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon' r}{\epsilon' r}\right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon' r (\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1)}{2}}} \quad (2-28)$$

เมื่อ  $v$  = ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s),  $f$  คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ,  $\epsilon'$  คือ Relative Dielectric Constant,  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าเมื่อค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย

### ข้อดีของการทำความร้อนไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

1. ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนชิ้นงานที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary Part)
2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) คลื่นไมโครเวฟจะทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในและความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั้งก้อนดังแสดงในภาพที่ 2-4 ในขณะที่วิธีให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนจากทางผิวด้านนอกซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปอีกทั้งยังใช้เวลามาก เนื่องจากมีข้อจำกัดทางการนำความร้อน ดังนั้นวิธีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า (อุณหภูมิเท่ากันทั้งชิ้นและได้อุณหภูมิสูงกว่า) ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การกระจายตัวของความร้อน

ที่มา : (กนกกาญจน์ ทองซิ้ม, 2554)

3. ความสามารถในการเลือกวัสดุที่จะรับความร้อน (Selective Energy Absorption) วัสดุบางอย่างสามารถดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางอย่างไม่มีคุณสมบัติเหล่านี้ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ในหีบห่อโดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

4. การควบคุมอย่างทันทีทันใดด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Instantaneous Electronic Control) ในอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่า เช่น เตาอบ ต้องใช้เวลามากในการปรับ

อุณหภูมิ ในขณะที่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิได้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลา น้อยมาก (ภายในเศษเสี้ยววินาที)

5. มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) ในการให้ปริมาณความร้อนที่เท่ากัน วิธีการทางไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีแบบเก่ามาก (ประสิทธิภาพโดยรวมประมาณร้อยละ 60-70 ในขณะที่วิธีแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณร้อยละ 10-30)

6. ไม่ก่อมลภาวะ (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟเป็นกระบวนการที่สะอาด ไม่สร้างมลภาวะต่างจากกระบวนการให้ความร้อนวิธีอื่นที่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เผ่าพงศ์ นิจจันทร์พันธ์ศรี และ ประชุม คำพุด (2548) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การใช้หินฝุ่นผสมคอนกรีตแทนทรายโดยใช้หินฝุ่นจากจังหวัดสระบุรีซึ่งใช้อัตราส่วนผสม 1:2:4 จากการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192 พบว่าที่อายุคอนกรีต 28 วันคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนทรายมีค่ากำลังอัดสูงสุดมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 0.8 เท่า

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าทลายปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมาก โดยการแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการทดสอบพบว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ โดยมีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ  $0.05 \times 10^{-10}$  m/s

ธีระ เทพพรหม (2552) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบ โดยใช้หินฝุ่นจากโรงโม่หิน นราธิวาสโรงโม่หิน โดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบที่ร้อยละ 0, 40, 60, 80, 90 และแทนทรายทั้งหมดที่ค่าการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัด  $250 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งจะป่มโดยวิธีแช่น้ำตลอดอายุคอนกรีตที่ อายุคอนกรีต 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน พบว่าจากอัตราส่วนผสมดังกล่าวจะได้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมหินฝุ่นมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ทรายหยาบเป็นมวลรวมแต่จะมีค่าการรับกำลังมากที่สุดที่ร้อยละ 40

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2553) ได้ทำการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดจนมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่อายุคอนกรีต 7 วันสูงกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานและมีแนวโน้มของกำลังอัดสูงขึ้นเรื่อยๆผลการทดสอบแสดงว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ ป่อโซโซลานเพื่อใช้แทนที่ซีเมนต์บางส่วนได้

กนกกาญจน์ ทองขี้ม และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวล โดยการนำเอาคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการควบคุมความชื้นในก้อนคอนกรีตตามเวลาที่กำหนดไว้จากการทดสอบพบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. โดยใช้คลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ 720 Watt เป็นอัตราส่วนและระยะเวลาในการบ่มที่ดีและเหมาะสมโดยที่มูลค่าของกำลังต้านทานแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ  $338.10 \text{ kg/cm}^2$  เมื่อเทียบกับระยะเวลาและอัตราส่วนอื่นๆที่ใช้ในการทดสอบการบ่มที่

28 วัน ซึ่งการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟในการทดสอบมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงมากกว่าการบ่มอุณหภูมิปกติที่ 28 วัน

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษานำเอาปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าเอาหลายปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ  $\text{SiO}_2$  มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน และพบว่ากำลังอัดของ มอร์ตาร์ที่ผสมเอาหลายปาล์มน้ำมันบดละเอียดร้อยละ 30 นั้น มีค่ากำลังอัดสูงสุดมากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน

Hansen และ Narud (2526) ศึกษาผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังแตกต่างกัน 3 ระดับ แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานลดลงและสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาย่อยเพื่อทำเป็นมวลรวมหยาบ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น

Ravindraja และ Tam (2528) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งนักวิจัยทั้งสองพบว่าคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลขึ้นอยู่กับกำลังและการเสีรูบของคอนกรีตเดิม โดยมวลรวมรีไซเคิลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมที่ใช้หินธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานต่อการกระแทกการย่อยและการขัดสีของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ต่ำกว่าหินแกรนิตย่อยเมื่อนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ในการผสมคอนกรีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงถึงร้อยละ 25 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงถึงร้อยละ 30

Limbachiya (2545) และคณะศึกษาถึงการใช่มวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล มวลรวมรีไซเคิลที่ได้มาจากการย่อยเศษคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ผ่านมาตรฐาน โดยขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 20 mm. มวลรวมรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัย นี้มีค่าสูงการดูดซึมน้ำเป็นสองเท่าของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่าต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติอยู่ในระหว่างร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 9 ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ส่วนผลกระทบจากการใช่มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมธรรมชาติพบว่าการใช่มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบจาก ธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแต่ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและทำให้คอนกรีตมีความพรุนตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สรุปไว้ว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนำมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีต เช่น กำลังอัด กำลังรับแรงดัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ยังคงเป็นที่น่าพอใจ

Ann และคณะ (2551) ได้ศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเอาถ่านหินร้อยละ 30 พบว่าสามารถช่วยพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

กล่าวโดยสรุป ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในการผลิตคอนกรีต โดยใช้เอาหลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายสำหรับนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยได้คำนึงถึงองค์ประกอบที่ได้จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้



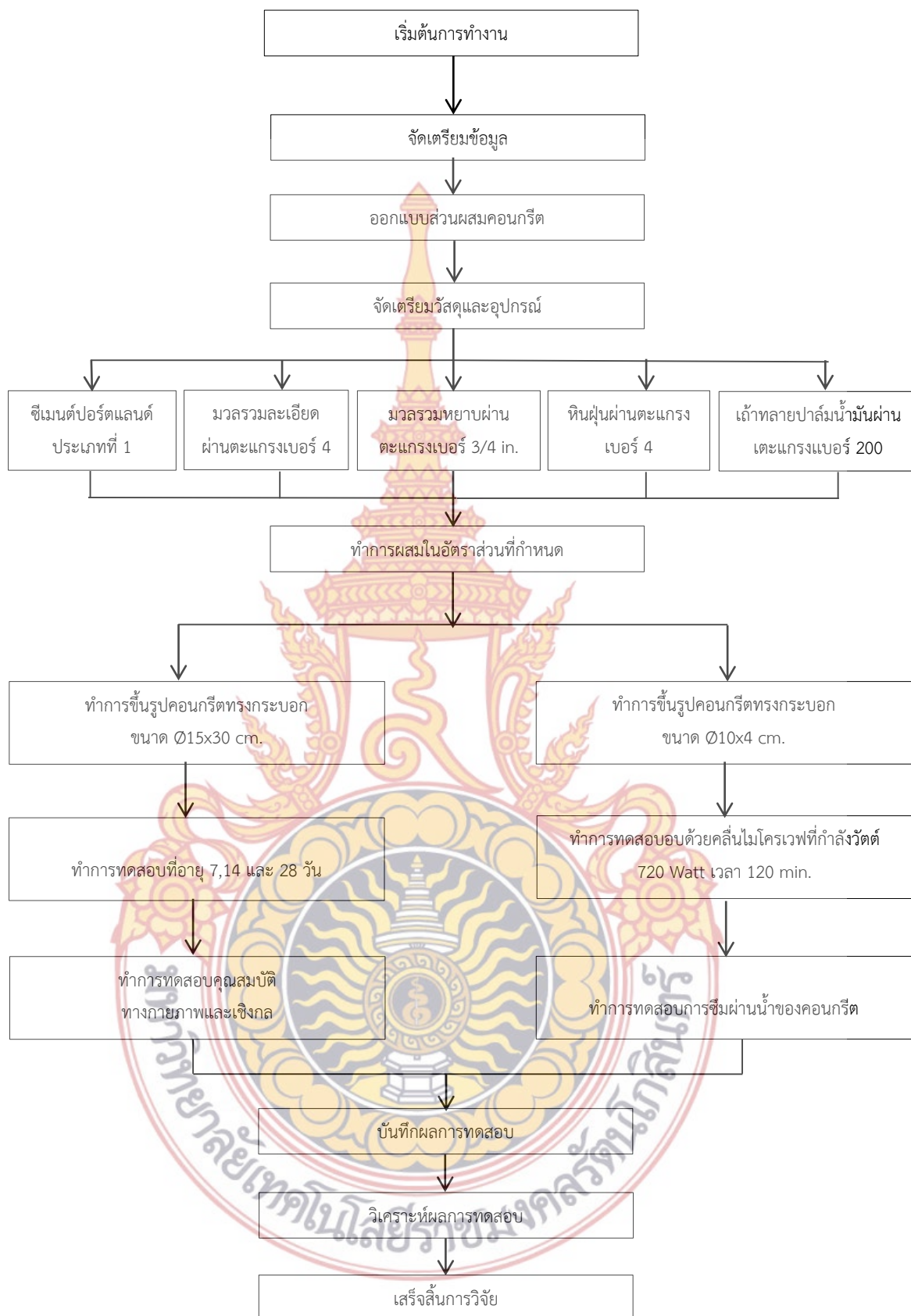
กล่าวมาข้างต้น สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกวัสดุดังนี้ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย หิน น้ำ สารผสมเพิ่ม เถ้าลอยปาล์มน้ำมัน และหินฝุ่น ซึ่งได้มีการทำงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นมาบ้างแล้ว แต่จะเห็นได้ว่าในงานก่อสร้างจริงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง ทางผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะนำเถ้าลอยปาล์มน้ำมันมาเป็นสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักในการแทนที่ซีเมนต์ และใช้หินฝุ่นนำมาเป็นสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักแทนที่การใช้ทราย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพให้กับคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างให้มากยิ่งขึ้น



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตด้วยการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อลดระยะเวลาในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายและเถ้าลอยปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ เพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตและศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต โดยมุ่งศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพในด้านความหนาแน่น คุณสมบัติทางกลในการรับกำลังต้านทานแรงอัด และเพื่อทราบถึงสัดส่วนที่ดีที่สุดของคอนกรีตที่ผสมหินฝุ่นแทนทรายและเถ้าลอยปาล์ม น้ำมันแทนซีเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผ่านการผสมหินฝุ่นแทนทรายและเถ้าลอยปาล์ม น้ำมันแทนซีเมนต์ โดยการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การจัดเตรียมวัสดุ การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล รวมทั้งการทดสอบการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3-1





ภาพที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการ

### 3.1 การศึกษาความเป็นไปได้ของการวิจัย

จะดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และการซึมผ่านน้ำได้ของคอนกรีต

3.1.1 การวิเคราะห์ทางด้านกายภาพ มีวิธีการทดสอบต่างๆ และการวิเคราะห์ข้อมูลจากปริภูมิพันธ์ ดังนี้

#### 1) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement)
- มวลรวมละเอียดหรือทรายผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
- มวลรวมหยาบหรือหินผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3/4 in.
- เถ้าทลายปาล์มน้ำมันบดละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200
- หินผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

#### 2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด
- เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต
- โม่ผสมคอนกรีต
- แบบหล่อเหล็กทรงกระบอกขนาด  $\varnothing$  15 x 30 cm.
- แบบหล่อท่อพีวีซีทรงกระบอกขนาด  $\varnothing$  10 x 4 cm.
- เครื่องชั่งขนาด 200 kg. อ่านได้ละเอียด 1 kg.
- เครื่องชั่งแบบ Balance สามารถชั่งได้อย่างน้อย 5,000 g. อ่านละเอียด 0.5 g.
- เตารอบไมโครเวฟ ขนาดกำลังวัตต์ 720 Watt
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

#### 3) ขั้นตอนการศึกษา

- การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ACI 211.3R-97 โดยใช้หลักการแทนที่โดยน้ำหนัก ซึ่งคอนกรีตประกอบไปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน ได้ออกแบบโดยการนำเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 โดยนำเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นน้ำมันมาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยนำหินฝุ่นมาใช้แทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ

- สัตส่วนที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด  $\varnothing$  15x30 cm. ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล โดยมีจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สัตส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้และจำนวนก้อนตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต

ชุดที่	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (kg)							จำนวน (ก้อน)
	ร้อยละของหินฝุ่นแทนที่ทราย	ซีเมนต์	เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน*	หิน	ทราย	หินฝุ่น	น้ำ	
Control	0	28.93	0	78.86	61.37	0	15.9	15
1/1	20	20.25	8.68	78.86	49.1	12.27	15.9	15
1/2	40	20.25	8.68	78.86	36.82	24.55	15.9	15
1/3	60	20.25	8.68	78.86	24.55	36.82	15.9	15
1/4	80	20.25	8.68	78.86	12.27	49.1	15.9	15
1/5	100	20.25	8.68	78.86	0	61.37	15.9	15
						รวม		90

หมายเหตุ\* (เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ ร้อยละ 30)

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด  $\varnothing$  10x4 cm. โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt เวลา 120 min. เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยมีจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้และจำนวนก้อนตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ชุดที่	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (kg)							จำนวน (ก้อน)
	ร้อยละของหินปูนแทนที่ทราย	ซีเมนต์	เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน*	หินทราย	ทราย	หินปูน	น้ำ	
Control	0	0.80	0	2.18	1.69	0	0.44	5
1/1	20	0.56	0.24	2.18	1.352	0.388	0.44	5
1/2	40	0.56	0.24	2.18	1.014	0.676	0.44	5
1/3	60	0.56	0.24	2.18	0.676	1.014	0.44	5
1/4	80	0.56	0.24	2.18	0.388	1.352	0.44	5
1/5	100	0.56	0.24	2.18	0	1.69	0.44	5
							รวม	30

หมายเหตุ\* (เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ ร้อยละ 30)

จากตารางการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมกับประเทศไทยตามมาตรฐานอเมริกา ให้ได้แนวทางในการออกแบบคอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยส่วนใหญ่จะดูในเรื่องการรับกำลังต้านทานแรงอัด ค่าการยุบตัว และความสามารถในการเทได้ให้เป็นไปตามแนวทางที่ต้องการซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- ขั้นตอนในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตและการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

การทำคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพ ต้องให้ความสำคัญในการคัดเลือกส่วนผสมและควบคุมการผสมอย่างดี ดังนั้นในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นตามมาตรฐานอเมริกา จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

ก. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องเลือกประเภทและแหล่งของซีเมนต์ที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน ASTM C917 และทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C311

ข. น้ำ ที่ผสมทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C94 ถ้าเป็นน้ำประปาก็ไม่จำเป็นต้องทดสอบ

ค. มวลรวมสำหรับมวลรวมหยาบจะต้องเลือกที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ไม่มีรอยแตกร้าว สะอาดและพื้นผิวต้องไม่มีอะไรปกคลุม ส่วนมวลรวมละเอียดจะต้องมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 3.2 และสะอาดซึ่งมวลรวมจะต้องทำการทดสอบหาคุณสมบัติโดยการทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- ขนาดคละ ควรมีส่วนคละตามมาตรฐาน ASTM C33 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136

- ความถ่วงจำเพาะ

มวลรวมละเอียด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

มวลรวมหยาบ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127

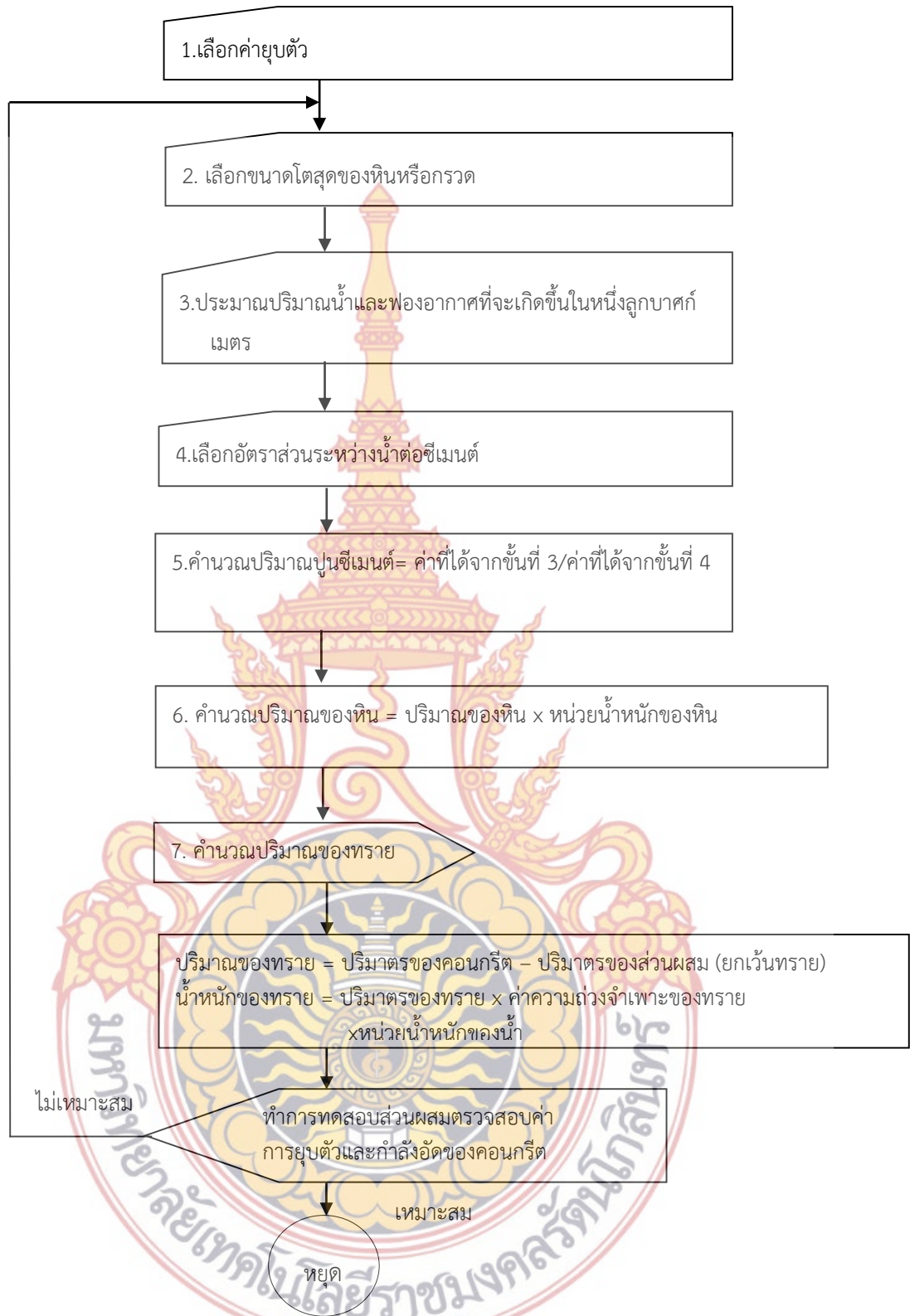
- ความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C70 และ ASTM C556

- ความละเอียดของทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C125

- หน่วยน้ำหนักของมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29

วิธีการออกแบบคอนกรีตน้ำหนักปกติโดยไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศโดยมีกำลังอัดประลัย  $240 \text{ kg/cm}^2$  ในการผสมจะใส่เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินฝุ่นแทนที่ทรายโดยน้ำหนัก





ภาพที่ 3-2 แผนภาพออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.3R-97

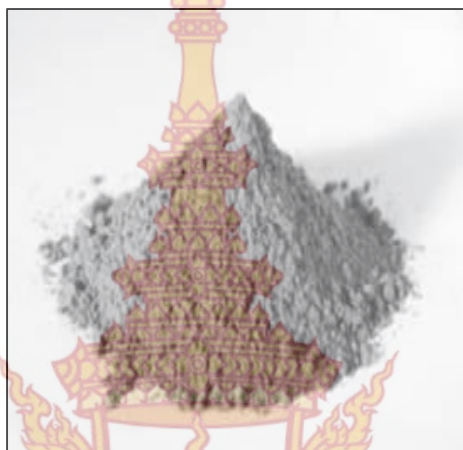
ที่มา : (ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2556)



### 3.2 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีต

#### 3.2.1 การหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Specific Gravity of Portland Cement) ตามมาตรฐาน ASTM C311

- 1) วัสดุประสงค์ เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประโยชน์ในการใช้กำหนดสัดส่วนในการผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ



ภาพที่ 3-3 ซีเมนต์

จากภาพที่ 3-3 เป็นซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Normal Portland Cement) เป็นซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไป



ภาพที่ 3-4 ขวดแก้วทดลองเลอชาแตรีแอร์ (LeChatelier)

จากภาพที่ 3-4 ใช้หาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นขวดแก้วใส ซึ่งจะมีขีดบอกขนาดเป็นหมายเลขตั้งแต่ 0-24 ml ที่คอขวดจะมีหมายเลข 0-1 ml โดยปริมาตรจะเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ml ซึ่งมีขีดเล็กๆภายในกระบอกไว้ด้วยช่วงละ 10 ขีด และความผิดพลาดของขีดต้องไม่เกิน 0.05 ml



ภาพที่ 3-5 เทอร์โมมิเตอร์

จากภาพที่ 3-5 เทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับความร้อนหรืออุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบให้คงที่เสมอ



ภาพที่ 3-6 กรวยก้านยาว

จากภาพที่ 3-6 ใช้ดวงควรเป็นแบบที่มีก้านยาว เพื่อน้ำมันก๊าดจะได้ไม่เปียกตรงส่วนบนของขวด



ภาพที่ 3-7 น้ำมันก๊าด

จากภาพที่ 3-7 ควรเป็นน้ำมันก๊าด (Kerosene) ที่ไม่มีน้ำเจอปนอยู่เลย



ภาพที่ 3-8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ

จากภาพที่ 3-8 ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้ของเหลวภายในขวดคงที่อยู่ตลอดเวลา



ภาพที่ 3-9 เครื่องชั่ง

จากภาพที่ 3-9 เครื่องชั่งเป็นเครื่องชั่งแบบ Balance สามารถชั่งได้อย่างน้อย 5,000 g อ่านละเอียดได้ถึง 0.5 g

### 3) วิธีทดสอบ

- เติมน้ำมันก๊าดลงในขวดแก้วมาตรฐานเลขอาเตอรรีแอร์จนถึงระดับระหว่าง 0-1 ml. ภายในขวดแก้วทดลองตอนบนเหนือระดับน้ำมันก๊าดจะต้องแห้ง

- ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้วแล้วนำไปจุ่มในถังที่มีอุณหภูมิคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำในนานพอที่จะอ่านค่าระดับได้ ทั้งนี้เพื่อให้อุณหภูมิต่างกันเกิน 0.2 °C จะต้องตรวจสอบค่าระดับที่อ่านได้จนกว่าจะคงที่ เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดที่บรรจุในขวดทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในถังแล้วจึงอ่านค่าระดับเป็นค่าแรก

- ชั่งซีเมนต์ตัวอย่างทดสอบประมาณ 64 g. แล้วรอกกลงไปในขวดแก้วทดลองลงทีละน้อย โดยใช้กรวยก้านยาวช่วยในการรอกเพื่อป้องกันไม่ให้ซีเมนต์เกาะบริเวณคอขวดแก้วทดลอง เมื่อรอกซีเมนต์ตัวอย่างจนหมดหรือจนกระทั่งระดับน้ำมันก๊าดในขวดแก้วทดลองสูงพอที่จะอ่านสเกลตอนบนได้ให้หยุดรอก ปิดปากขวดแก้วทดลองด้วยจุกแก้วแล้วทิ้งขวดแก้วทดลองซ้ำๆ ในลักษณะเอียงบนพื้นโต๊ะหรือแกว่งเบาๆ ในแนวราบเป็นวงกลมเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากปูนซีเมนต์จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมา จึงนำขวดแก้วทดลองนั้นจุ่มลงในถังน้ำตามวิธีในข้อ 2 จนระดับน้ำมันก๊าดในขวดแก้วทดลองคงที่จึงจะอ่านค่าเป็นระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง

## 4) วิธีการคำนวณ

- ปริมาตรของซีเมนต์ คือ ปริมาตรที่ของเหลวถูกแทนที่หาได้จากผลต่างระหว่างค่าปริมาตรที่อ่านได้ครั้งหลังลบกับค่าปริมาตรที่อ่านได้ครั้งแรก

A : ปริมาตรที่ถูกของเหลวแทนที่ครั้งแรก

B : ปริมาตรที่ถูกของเหลวแทนที่ครั้งหลัง

- การคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะให้คำนวณเป็นทศนิยม 3 ตำแหน่งแล้วปัดเศษเหลือ 2 ตำแหน่ง

$$\text{ค่าความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้}}{\text{ปริมาตรที่ถูกแทนที่} \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ}} \quad (3-1)$$

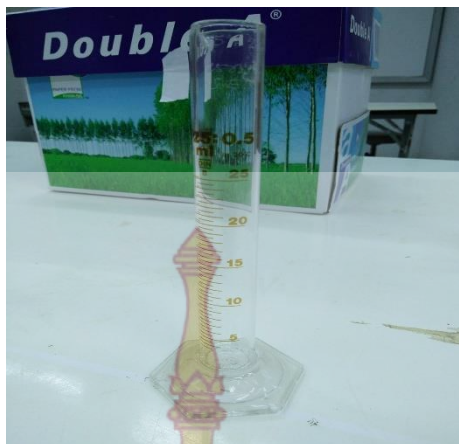
### 3.2.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (Specific Gravity and Absorbtion of Fine Aggregate)

- 1) วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ



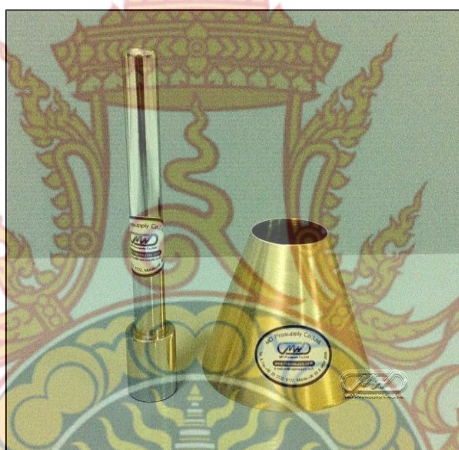
ภาพที่ 3-10 เครื่องชั่ง

จากภาพที่ 3-10 เครื่องชั่งแบบ Balance สามารถชั่งได้อย่างน้อย 5,000 g อ่านละเอียดได้ถึง 0.5 g.



ภาพที่ 3-11 กระบอกตวง

จากภาพที่ 3-11 ทำด้วยแก้ว หรือ พลาสติก ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ



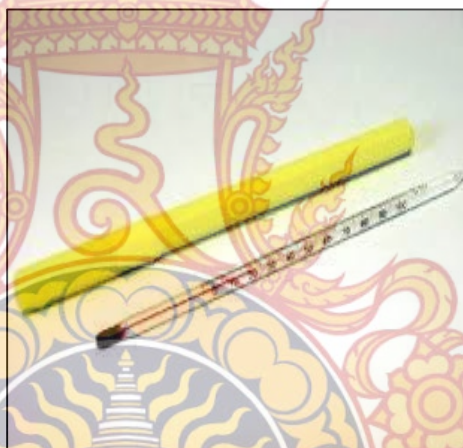
ภาพที่ 3-12 กรวยตัด

จากภาพที่ 3-12 กรวยตัดเป็นแบบโลหะรูปกรวยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตอนบน 38 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางตอนล่าง 89 mm. และมีความสูง 74 mm. ความหนาของแบบโลหะต้องหนาน้อยประมาณ 0.9 mm. โลหะกระทุ้งเป็นลวดโลหะหนัก  $340 \pm 15$  g. ผิวด้านหน้าที่ใช้กระทุ้งราบเป็นรูปวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $25 \pm 3$  mm.



ภาพที่ 3-13 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

จากภาพที่ 3-13 ใช้สำหรับอบตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นเป็นตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3-14 เทอร์โมมิเตอร์

จากภาพที่ 3-14 เทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับความร้อนหรืออุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบให้คงที่เสมอ



ภาพที่ 3-15 ททราย

จากภาพที่ 3-15 เป็นททรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ประมาณ 1000 g.



ภาพที่ 3-16 ถาดสแตนเลส

จากภาพที่ 3-16 ใช้สำหรับใส่วัสดุรวมหยาบเพื่อนำไปอบในตู้อบตัวอย่าง



## 3) วิธีการทดลอง

นำทรายตัวอย่างมาทำการแบ่งแล้วอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C เป็นเวลา 24 hr.

- นำทรายน้ำหนักประมาณ 1000 g. ที่ได้จากการแบ่งสุ่มมาแช่ไว้ 24 hr.

นำทรายตัวอย่างที่แช่น้ำไว้แล้วมาเกลี่ยกระจายบนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซึมน้ำใช้เครื่องเป่าลมเป่าให้ทั่วสม่ำเสมอ หรือผึ่งแดดจนกระทั่งทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

ซึ่งตรวจสอบได้โดยนำทรายไปใส่กรวยโลหะซึ่งวางอยู่บนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซึมน้ำแล้วใช้เหล็กกระทุ้ง 25 ครั้งโดยถือให้ปลายอยู่เหนือผิวทรายประมาณ 5 mm. แล้วปล่อยลงด้วยน้ำหนักตัวเองแล้วยกกรวยขึ้นตรงๆ ถ้าทรายยังเป็นรูปกรวยแสดงว่ายังมีความชื้นมากให้เป่าต่อไป จนกระทั่งเมื่อทดสอบแล้วปรากฏว่าทรายละลายลงมาโดยอิสระทรายในสภาพนี้ถือว่าอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักขวด Volumetric Flask เติมน้ำจนถึงขีด 500 ml.

นำทรายมาชั่ง 500 g. ใส่ลงใน Volumetric Flask เติมน้ำลงในขวดจนเท่ากับระดับทรายแล้วทำการไล่ฟองอากาศในทรายออกให้หมดโดยการแกว่งไปมาในแนวราบเติมน้ำลงไปอีกจนถึงระดับ 500 ml. แล้วชั่งน้ำหนักทรายในขวด Volumetric Flask ทั้งหมดใส่ถาดหรือถ้วยที่ทนความร้อนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C จนน้ำหนักคงที่นำออกจากเตาอบทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง

## 4) การคำนวณ

หาค่าความถ่วงจำเพาะรวม ( Bulk Specific Gravity ) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง (Oven Dry)} = \frac{A}{(D+B-C)} \quad (3-2)$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)} = \frac{B}{(D+B-C)} \quad (3-3)$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ} = \frac{A}{(D+A-C)} \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} &\text{การดูดซึมน้ำ (จากสภาพแห้ง) ของทรายอาจหาได้ โดยใช้สูตรการดูดซึมน้ำ} \\ &\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{(B-A) \times 100\%}{B} \quad (3-5) \end{aligned}$$

โดยที่

A น้ำหนักทรายแห้ง

B น้ำหนักทรายในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

C น้ำหนักขวด Volumetric Flask + ทรายในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง + น้ำ, g.

D น้ำหนักขวด Volumetric Flask + น้ำ, g.

### 3.2.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (Specific Gravity And Absorption Aggregate) ตามมาตรฐาน ASTM C127

- 1) วัสดุประสงค์ เพื่อศึกษาหาค่าความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ ประกอบด้วย



ภาพที่ 3-17 เครื่องชั่ง

จากภาพที่ 3-17 เครื่องชั่งเป็นเครื่องชั่งแบบ Balance สามารถชั่งได้อย่างน้อย 5,000 g อ่านละเอียดได้ถึง 0.5 g.





ภาพที่ 3-18 ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ

จากภาพที่ 3-18 ตะกร้าลวดตาข่าย (Wire Basket) เป็นตะกร้าลวดตาข่ายที่มีช่องขนาด 2.00 - 3.00 mm. เป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 mm. และสูงประมาณ 200 mm. หรือมีขนาดบรรจุขนาด 4,000 ถึง 7,000 cm<sup>3</sup>



ภาพที่ 3-19 ตะแกรงเบอร์ 3/4 in.

จากภาพที่ 3-19 ตะแกรงเบอร์ 3/4 in. ใช้สำหรับร่อนมวลรวมหยาบก่อนนำไปใช้ในการทดสอบ



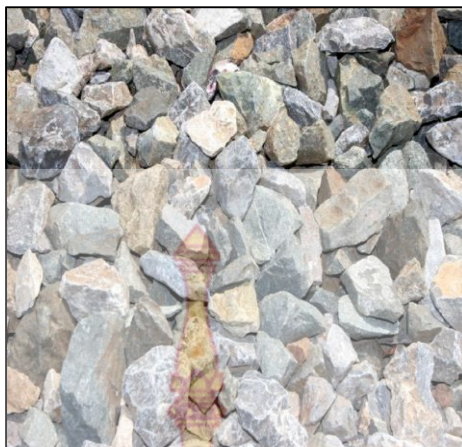
ภาพที่ 3-20 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

จากภาพที่ 3-20 ใช้สำหรับอบตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นเป็นตุบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3-21 เทอร์มิเตอร์

จากภาพที่ 3-21 เทอร์มิเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับความร้อนหรืออุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบให้คงที่เสมอ



ภาพที่ 3-22 หิน

จากภาพที่ 3-22 มวลรวมหยาบที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างหรือสุ่มตัวอย่างด้วยการแบ่งสี่ (Quartering) มาร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 3/4 in. นำส่วนที่ค้างมาประมาณ 5,000 g.



ภาพที่ 3-23 ถาดแสตนเลส

จากภาพที่ 3-23 ใช้สำหรับใส่วัสดุมวลรวมหยาบเพื่อนำไปอบในตู้อตัวอย่าง

## 3) วิธีการทดลอง

นำหินมาทำการแบ่งสี่แล้วร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 แล้วนำส่วนที่ค้างมาอบอุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C เป็นเวลา 24 hr. หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักประมาณ 5,000 g. แล้วนำไปแช่น้ำ 24 hr.

เทน้ำที่แช่หินออกแล้วนำหินขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าที่แห้งที่ละก้อนจนหินอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ซึ่งสังเกตได้จากหินที่แห้งแต่ยังมีความชื้นอยู่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียด

-ทำการชั่งตะกร้าเปล่าในน้ำแล้ววัดอุณหภูมินำหินใส่ตะกร้าแล้วชั่งน้ำหนักในน้ำก่อนชั่งควรสั้นตะกร้าเบาๆ เพื่อไล่ฟองอากาศและต้องให้ตะกร้ากับหินตัวอย่างจมอยู่ในน้ำขณะชั่ง

-นำหินตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C จนน้ำหนักคงที่นำออกจากเตาอบปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

## 4) การคำนวณ

-หาค่าความถ่วงจำเพาะรวม ( Bulk Specific Gravity ) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง (Oven Dry)} = \frac{A}{(B-C)} \quad (3-6)$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง (SSD)} = \frac{B}{(B-C)} \quad (3-7)$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ} = \frac{A}{(A-C)} \quad (3-8)$$

การดูดซึมน้ำ (จากสภาพแห้ง) ของทรายอาจหาได้ โดยใช้สูตรการดูดซึมน้ำ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{(B-A) \times 100\%}{B} \quad (3-9)$$

โดยที่

A น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้ง, g.

B น้ำหนักของตัวอย่างในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง ชั่งในอากาศ, g.

C น้ำหนักของตัวอย่างชั่งในน้ำ, g.

### 3.3 การขึ้นรูปของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีต

1) ทำการชั่งซีเมนต์ ทราย หิน ผงหินฝุ่น เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน น้ำ ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด

2) นำซีเมนต์ ทราย หิน ผงหินฝุ่น เถ้าทลายปาล์มน้ำมันและน้ำลงในที่ผสมคอนกรีต แล้วผสมให้เข้ากันอย่าทั่วถึงด้วย

3) ใส่น้ำสะอาด ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ลงในที่ผสมของคอนกรีต

4) นำหินตามอัตราส่วนที่กำหนดใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต และผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง

ทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันประมาณ 2-3 min. แล้วจึงนำเทลงในภาชนะที่เตรียมไว้เพื่อทำการลำเลียงส่วนผสมของคอนกรีตเข้าสู่แบบหล่อ

5) นำส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วเทลงในแบบหล่อของคอนกรีตที่ได้เตรียมไว้ (คอนกรีตเมื่อผสมเสร็จแล้วจะต้องใช้ภายใน 30 min.)

6) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 24 hr. เพื่อให้คอนกรีตจับตัวเป็นก้อนและจึงทำการถอดแบบหล่อออกโดยจะต้องทำเครื่องหมายที่คอนกรีตไว้ทุกก้อนโดยใช้สูตรอัตราส่วนผสมเรียงกันแล้วนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปบ่มน้ำเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน และอีกส่วนหนึ่งจะนำไปทำการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 120 min. โดยอบด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt เพื่อนำไปทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตและอัตราการซึมน้ำของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตเพื่อตรวจสอบหาความหนาแน่น และกำลังต้านทานแรงอัดซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ จะใช้ตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. สูง 30 cm. ที่อายุของคอนกรีต 7, 14 และ 28 วัน และอีกส่วนหนึ่งจะใช้ตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 4 cm.จะนำไปทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 120 min. โดยบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt เพื่อนำไปทดสอบอัตราการซึมน้ำของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

#### 3.4.1 วิธีการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM C39 / CM39M – 99

1) วัดขนาดและชั่งมวลตัวอย่างทดสอบ เพื่อหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

2) ทำการ Cap ที่ปลายตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านที่รับแรงโดยใช้ Sulfur Mortar โดย Sulfur Mortar ต้องมีความหนาเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 6 mm. โดยส่วนที่บางสุดไม่น้อยกว่า 3 mm. ส่วนที่หนาสุดต้องไม่เกิน 8 mm. ทิ้งไว้อย่างน้อย 2 hr.

3) นำตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 5 ก้อน โดยทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 5 ก้อนตัวอย่างแล้วนำ 2 ก้อนที่มีค่าน้อยสุดกับมากที่สุดออกโดยนำ 3 ก้อนตัวอย่างที่เหลือมาเปรียบเทียบกับกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งต้องมีคอนกรีตอย่างน้อย 3 ตัวอย่างที่มีกำลังต้านทานแรงอัดเท่ากับหรือมากกว่าเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ออกแบบไว้ตาม ACI 211.3R-97 และนำกำลังต้านทานแรงอัดมาหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัดทั้งหมด

4) นำก้อนคอนกรีตวางบนที่รองรับเริ่มให้น้ำหนักในอัตราสม่ำเสมอโดยกำหนดให้ไม่เกิน 1,000 kg/min หรืออัตราห้วงกวดไม่เกิน 0.05 in/min จนกระทั่งชั้นทดสอบวิบัติอ่านค่ากำลังที่ทำให้ชั้นทดสอบวิบัติ บันทึกค่าเพื่อนำไปทำการคำนวณ



ภาพที่ 3-24 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

จากภาพที่ 3-24 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต เพื่อทดสอบหาค่ากำลังอัดตามที่ต้องการ





### 3.4.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (Water Permeability of Concrete) ตามมาตรฐาน ASTM C125 โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

- 1) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ ประกอบด้วย



ภาพที่ 3-25 เตาอบไมโครเวฟ

จากภาพ 3-25 เตาอบไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยใช้เวลาในการบ่ม 120 min.



ภาพที่ 3-26 ท่อพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด  $\varnothing 10 \times 4$  cm.

จากภาพที่ 3-26 แบบหล่อก่อนตัวอย่างทดสอบท่อพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด  $\varnothing 10 \times 4$  cm.



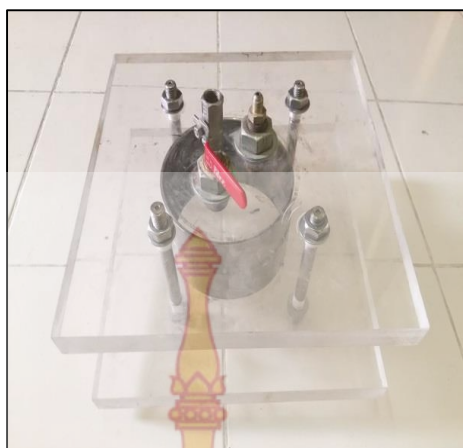
ภาพที่ 3-27 แผ่นยาง

จากภาพที่ 3-27 แผ่นยางรองก้นตัวอย่างในการทดสอบการซึมผ่านน้ำสำหรับก้อน  
ตัวอย่าง



ภาพที่ 3-28 อีพอกซี (Epoxy)

จากภาพที่ 3-28 อีพอกซี (Epoxy) ใช้สำหรับหล่อด้านข้างก่อนตัวอย่าง โดยมีความหนา  
2.5 cm. จากผิวตัวอย่างคอนกรีตและสูงเท่ากับก้อนตัวอย่าง



ภาพที่ 3-29 ชุดเซลล์ทดสอบ

จากภาพที่ 3-29 ชุดเซลล์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต



ภาพที่ 3-30 ถังออกซิเจนสำหรับให้แรงดันโดยสามารถให้แรงดันได้ถึง 20 bar

จากภาพที่ 3-30 ถังออกซิเจนสำหรับให้แรงดันโดยสามารถให้แรงดันได้ถึง 20 bar ใช้เพื่อส่งแรงดันไปยังเครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

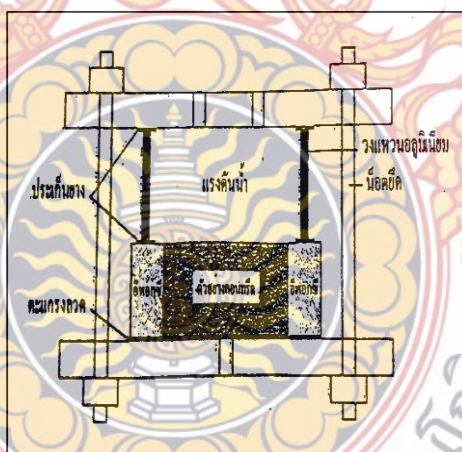


ภาพที่ 3-31 เครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต

จากภาพที่ 3-31 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต

## 2) การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านน้ำ

ในการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยอาศัยหลักการไหลของของเหลว ทำได้โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดมาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 4 cm. หลังจากนั้นทำการหล่อ อีพอกซี (Epoxy) ที่ด้านข้างของตัวอย่าง ให้มีความหนา 2.5 cm. จากผิวตัวอย่างคอนกรีตสูงเท่ากับก้นตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 3-32 เซลล์ทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

หลังจากหล่ออีพอกซีเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 hr. อีพอกซีจะแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างมาประกอบเข้าชุดทดสอบ ดังภาพที่ 3-32 แล้วทำการอัดน้ำที่ความดัน 5 bar ให้ไหลผ่านแท่งตัวอย่าง

คอนกรีต บันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลา เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำตามสมการที่ (3-10) คือ

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA}, m/s \quad (3-10)$$

เมื่อ

$K$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m/s)

$\rho$  = ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = แรงโน้มถ่วงของโลก (m<sup>2</sup>/s)

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำแบบคงที่ (m<sup>3</sup>/s)

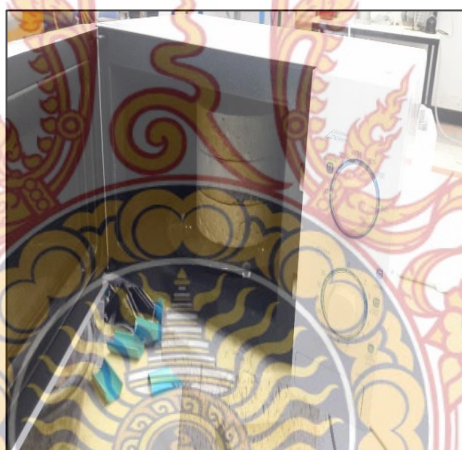
$L$  = ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีต (m)

$P$  = แรงดันน้ำสุทธิที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (kg.m/sec<sup>2</sup>) / (m<sup>2</sup>) หรือ N/m<sup>2</sup>

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (m<sup>2</sup>)

### 3) วิธีการใช้เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

3.1) นำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบไปบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min.



ภาพที่ 3-33 นำก้อนตัวอย่างไปบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขนาดกำลังวัตต์ 720 Watt

3.2) หลังจากการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟตามเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำมาวางที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 30 hr. แล้วจึงนำมาซีล เพื่อเก็บรักษาเพื่อความชื้น หลังจากนั้นนำไปหล่อ อีพอกซี (Epoxy) ที่ด้านข้างของตัวอย่าง ให้มีความหนา 2.5 cm. จากผิวตัวอย่างคอนกรีตสูงเท่ากับก่อนตัวอย่างคอนกรีต โดยหล่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 hr.

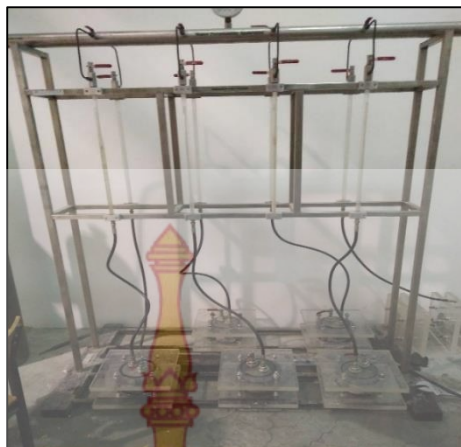


ภาพที่ 3-34 นำก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วมาซีล

3.3) นำตัวอย่างที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใส่ในเซลล์โดยใช้แผ่นยางรองหลังจากนั้นทำการขันน็อตทั้ง 4 ด้านให้แน่น ต่อสายทนแรงดันสูงกับเซลล์ ซึ่งจะทำให้การขันให้แน่น แล้วนำไปติดตั้งกับชุดโครงทดสอบ



ภาพที่ 3-35 ทำการประกอบตัวอย่างเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบ



ภาพที่ 3-36 ติดตั้งชุดเซลล์ทดสอบเข้ากับชุดโครงทดสอบ

3.4) เติมน้ำผ่านวาล์วตัวด้านบนบนหลอดแก้ววัดปริมาตรจนน้ำเต็มเซลล์ ดูได้จากน้ำที่ผ่านวาล์วที่ติดอยู่บริเวณบนเซลล์ทดสอบ เมื่อน้ำเต็มเซลล์จึงทำการปิดวาล์วที่ติดอยู่กับเซลล์ แล้วจึงเติมน้ำในหลอดแก้ววัดปริมาตรประมาณ 3 ใน 4 ของหลอดแก้ว แล้วจึงปิดวาล์วด้านบนบนหลอดแก้ว และทำการจดค่าของระดับน้ำในหลอดแก้วไว้



ภาพที่ 3-37 ทำการเติมน้ำเข้าไปในเซลล์ทดสอบกับหลอดแก้ววัดปริมาตร

3.5) ทำการเปิดถังออกซิเจนที่มีชุดควบคุมปรับแรงดันอยู่ เปิดวาล์วที่ติดกับชุดโครงทดสอบให้แรงดันเข้าไปอยู่ในโครงทดสอบ ซึ่งจะทดสอบที่ 5 bar เมื่อได้แรงดันตามที่กำหนดจึงทำการปิดวาล์วที่ติดอยู่กับชุดโครงทดสอบ



ภาพที่ 3-38 ทำการเปิดแรงดันเข้าไปในชุดโครงทดสอบ

3.6) เปิดแรงดันให้เข้าไปในชุดโครงทดสอบไปยังเซลล์ทดสอบ และทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลา และทำการคำนวณตามสูตรที่แสดงไว้

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) หาคความหนาแน่น โดยใช้สมการ

$$\rho = \frac{M}{V}, \text{ kg/cm}^3 \quad (3-11)$$

โดยที่

$\rho$  ความหนาแน่นของวัตถุ,  $\text{kg/cm}^3$

$M$  มวล (Mass) หรือน้ำหนักที่แท้จริง,  $\text{kg}$

$V$  ปริมาตร (Volume),  $\text{m}^3$



2) หาเปอร์เซ็นต์การดูดซึม โดยสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (3-12)$$

โดยที่

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ แทน ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำ (% Absorption)

$W_1$  น้ำหนักคอนกรีตที่แห้ง, kg

$W_2$  น้ำหนักคอนกรีตที่ดูดซึมน้ำ, kg

3) วิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะที่ต้องการด้านลักษณะทั่วไปและความต้านทานแรงอัดใช้สถิติในการหาความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย โดยใช้สูตร

$$F = \frac{P}{A}, \text{ kg/cm}^2 \quad (3-13)$$

โดยที่

F ความต้านทานแรงอัด, kg/cm<sup>2</sup>

P แรงอัดที่ทำให้ชิ้นทดสอบวิบัติ, kg

A พื้นที่รับแรงอัด, cm

4) วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA}, \text{ m/s} \quad (3-14)$$

เมื่อ

K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m/s)

$\rho$  = ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m<sup>3</sup>)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m<sup>2</sup>/s)

Q = อัตราการไหลของน้ำแบบคงที่ (m<sup>3</sup>/s)

L = ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีต (m)

P = แรงดันน้ำสุทธิที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (kg.m/sec<sup>2</sup>) / (m<sup>2</sup>)

หรือ N/m<sup>2</sup>

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (m<sup>2</sup>)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการดำเนินงานปริญญานิพนธ์ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูปก้อนตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. และสูง 30 cm. และก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 4 cm. โดยใช้เถ้าทลายปาล์ม น้ำมันแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 30 ในทุกสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อมาเป็นสัดส่วนผสมในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ตามหลักการออกแบบตามวิธี ACI 211.3R-97 เพื่อจะนำข้อมูลต่างๆมาทำการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมและการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

เมื่อนำตัวอย่างของเถ้าทลายปาล์ม น้ำมัน มาทำการทดสอบคุณสมบัติเพื่อวิเคราะห์หาร้อยละ โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมี ณ ห้องปฏิบัติการเคมี คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล โดยมีผลทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นต่างๆ ของวัสดุ ดังต่อไปนี้



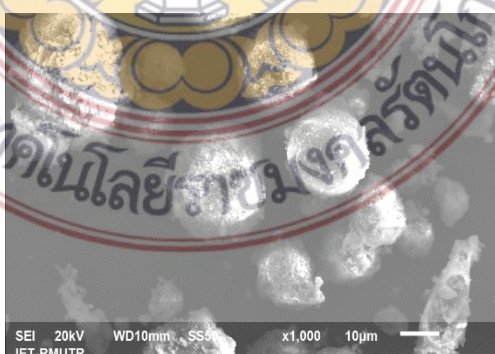
#### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ได้องค์ประกอบทางเคมีร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าทลายปาล์มน้ำมันได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-1 แสดงผลร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน

ธาตุ	เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	55.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10
CaO	15.83
MgO	3.94
SO <sub>3</sub>	0.5
FeS <sub>2</sub>	1.10
ออกไซด์อื่นๆ	8.6
LOI	10.30

จากตารางที่ 4-1 พบว่าเมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน โดยส่วนประกอบทางเคมี พบว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีปริมาณของ SiO<sub>2</sub> เท่ากับร้อยละ 55.85, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 2.78, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 1.10 และ CaO เท่ากับร้อยละ 15.83 ซึ่งเมื่อนำองค์ประกอบทางเคมีทั้งสี่ตัวมารวมกันจะได้ค่าร้อยละ 75.56 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

ดังนั้นจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีที่ได้ข้อมูลโดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ดังตารางที่ 4-1 จึงจัดได้ว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันอยู่ในวัสดุปอซโซลานประเภท C ดังนั้นสามารถนำเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ ซึ่งมีรูปทรงอนุภาคของเถ้าทลายปาล์มน้ำมันดังแสดงในภาพที่ 4-1



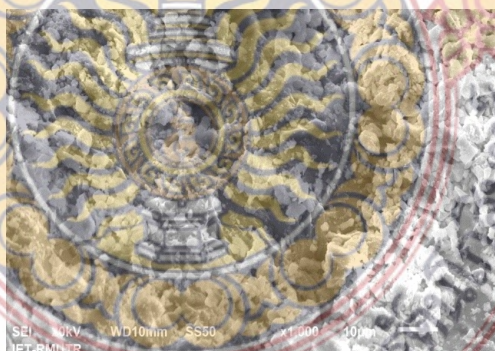
ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 1000 เท่า) ของเถ้าทลายปาล์มน้ำมันขนาด 10 ไมโครเมตร

4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของหินฝุ่น โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) และวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ได้องค์ประกอบทางเคมีร้อยละโดยน้ำหนักของหินฝุ่นได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-2 แสดงผลร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีของหินฝุ่น

ธาตุ	หินฝุ่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	57.15
CaCO <sub>3</sub>	21.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.56
MgO	1.33
ออกไซด์อื่นๆ	0.17
LOI.	19.75

จากตารางที่ 4-2 พบว่าเมื่อทำการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของหินฝุ่น โดยมีส่วนประกอบทางเคมีพบว่าหินฝุ่นมีปริมาณของ SiO<sub>2</sub> เท่ากับร้อยละ 57.15 ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักขององค์ประกอบทางเคมีของหินฝุ่น เช่นเดียวกับทรายซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ SiO<sub>2</sub> ประมาณร้อยละ 90-95 ซึ่งทรายจะมีมากกว่าหินฝุ่นซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักเช่นเดียวกัน และในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น เท่ากับ 2.14 และทรายเท่ากับ 2.05 จะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หินฝุ่นจึงสามารถนำไปใช้แทนที่ทรายเพื่อในการผสมเป็นคอนกรีตได้ ซึ่งมีรูปทรงอนุภาคของหินฝุ่นดังแสดงในภาพที่ 4-2

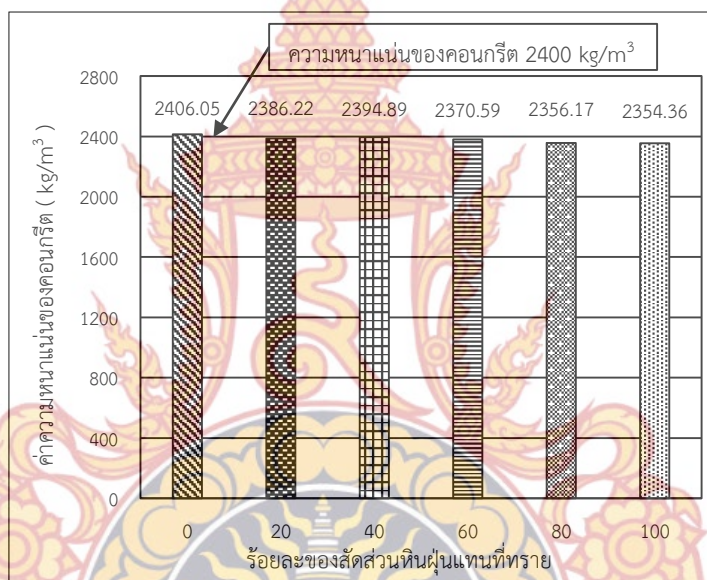


ภาพที่ 4-2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 1000 เท่า) ของหินฝุ่นขนาด 10 ไมโครเมตร

## 4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

จากการนำเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานการออกแบบวิธี ACI 211.3R-97 โดยทำการขึ้นรูปคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 cm. สูง 30 cm. ตามอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยมีผลการทดสอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

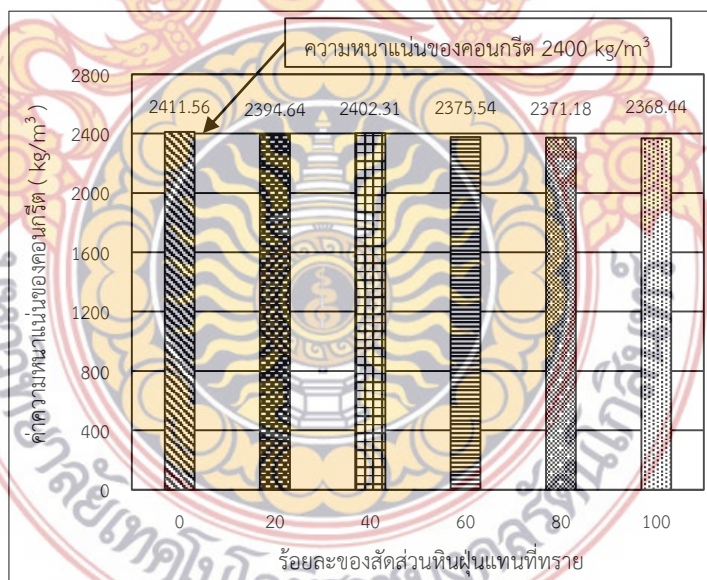


ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากภาพที่ 4-3 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติซึ่งมีความหนาแน่นที่ 2,400 kg/m<sup>3</sup> จากความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ 2,406.05 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ 2,386.22 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ 2,394.89 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย

ในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ  $2,370.59 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ  $2,356.17 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $2,354.36 \text{ kg/m}^3$  พบว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยมากที่สุดด้วยสัดส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 และที่สัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 20 ค่าความหนาแน่นต่างกันเพียงเล็กน้อยหลังจากนั้นความหนาแน่นจะลดลงด้วยสัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100 ตามลำดับ เนื่องจากซีเมนต์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 3.085 และเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะ 2.07 แสดงว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันเบากว่าซีเมนต์ทำให้มีมวลลดลงและจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อแทนที่หินฝุ่นมากขึ้นมวลจะลดลงเนื่องจากความละเอียดของรูปทรงของหินฝุ่นมีน้อยกว่าทรายเมื่อผสมตามสัดส่วนที่กำหนดจะทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้น้อยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อคอนกรีตซึ่งส่งผลทำให้มวลเบาลงค่าความหนาแน่นจึงลดลง แต่ในทุกสัดส่วนที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนที่ทรายค่าความหนาแน่นน้อยกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปกติ

4.2.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน

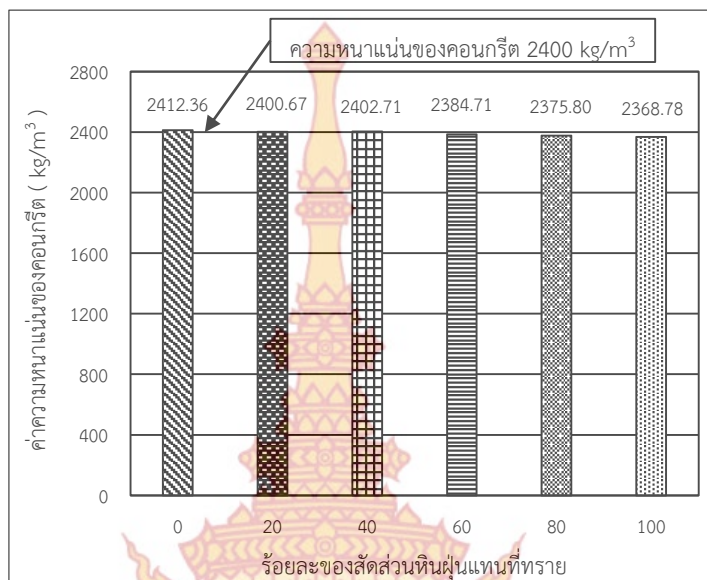


ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน

จากภาพที่ 4-4 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์ม น้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติ ซึ่งมีความหนาแน่นที่  $2,400 \text{ kg/m}^3$  จากความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ  $2,411.56 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้า ทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ  $2,394.64 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ  $2,402.31 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ  $2,375.54 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของ คอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อย ละ 80 เท่ากับ  $2,371.18 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $2,368.44 \text{ kg/m}^3$  พบว่าค่าหนาแน่นเฉลี่ยมากที่สุดด้วยสัดส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 และที่สัดส่วนการแทนที่ ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 20 ค่าความหนาแน่นต่างกันเพียงเล็กน้อยหลังจากนั้นความ หนาแน่นจะลดลงด้วยสัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100 ตามลำดับ เนื่องจากซีเมนต์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 3.085 และเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะ 2.07 แสดงว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันเบากว่าซีเมนต์ทำให้มีมวลลดลงและจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่น จะลดลงเมื่อแทนที่หินฝุ่นมากขึ้นมวลจะลดลงเนื่องจากความละเอียดของรูปทรงของหินฝุ่นมีน้อยกว่า ทรายเมื่อผสมตามสัดส่วนที่กำหนดจะทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้น้อยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อ คอนกรีตซึ่งส่งผลทำให้มวลเบาลงค่าความหนาแน่นจึงลดลง แต่ในทุกสัดส่วนที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้า ทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนที่ทรายค่าความหนาแน่นน้อยกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งน้อยกว่า คอนกรีตปกติ ยกเว้นค่าความหนาแน่นที่แทนที่หินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 40 ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีต ปกติ



4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน



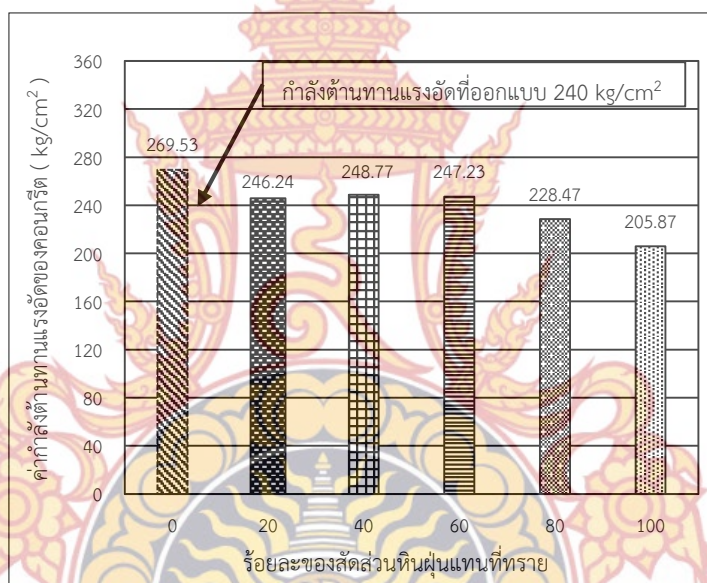
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติซึ่งมีความหนาแน่นที่ 2,400 kg/m<sup>3</sup> จากความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ 2,412.36 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ 2,400.67 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ 2,402.71 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ 2,384.71 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ 2,375.80 kg/m<sup>3</sup> ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ 2,368.78 kg/m<sup>3</sup> พบว่าค่าหนาแน่นเฉลี่ยมากที่สุดด้วยสัดส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 และที่สัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 20 ค่าความหนาแน่นต่างกันเพียงเล็กน้อยหลังจากนั้นความหนาแน่นจะลดลงด้วยสัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100

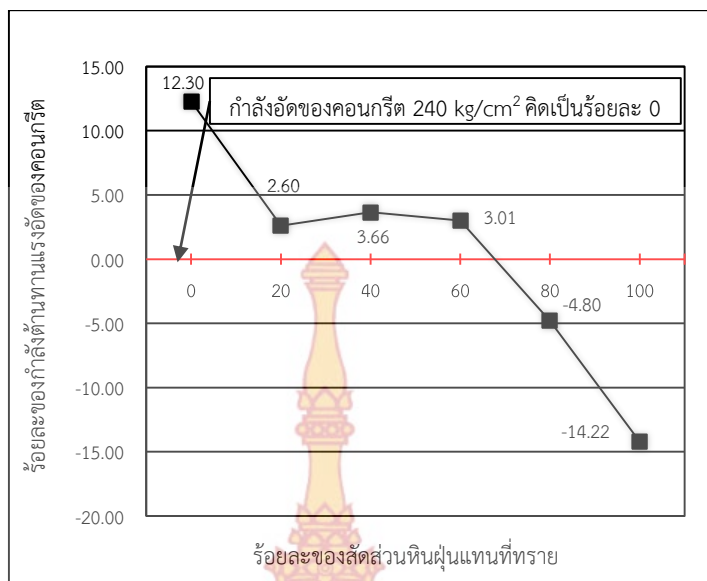


ตามลำดับ เนื่องจากซีเมนต์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 3.085 และเถ้าลอยปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะ 2.07 แสดงว่าเถ้าลอยปาล์มน้ำมันเบากว่าซีเมนต์ทำให้มีมวลลดลงและจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อแทนที่หินปูนมากขึ้นมวลจะลดลงเนื่องจากความละเอียดของรูปทรงของหินปูนมีน้อยกว่าทรายเมื่อผสมตามสัดส่วนที่กำหนดจะทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้น้อยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อคอนกรีตซึ่งส่งผลทำให้มวลเบาลงค่าความหนาแน่นจึงลดลง แต่ในทุกสัดส่วนที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปาล์มน้ำมันและหินปูนแทนที่ทรายค่าความหนาแน่นน้อยกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ยกเว้นค่าความหนาแน่นที่แทนที่หินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

4.2.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

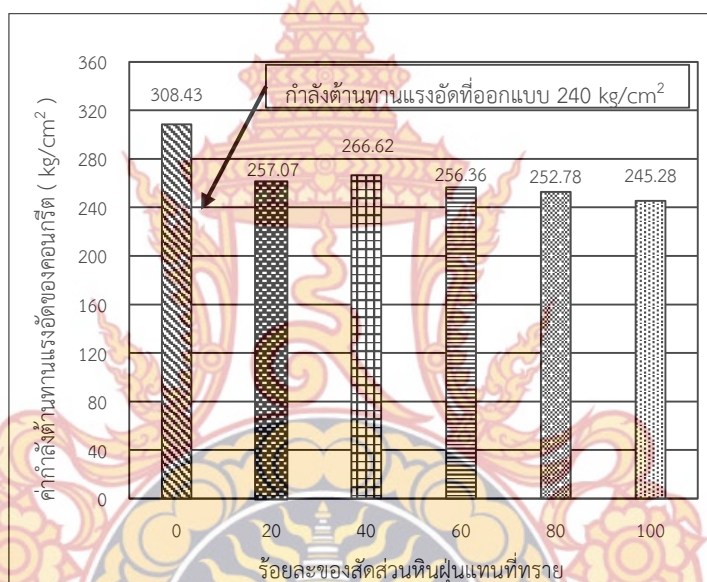


ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

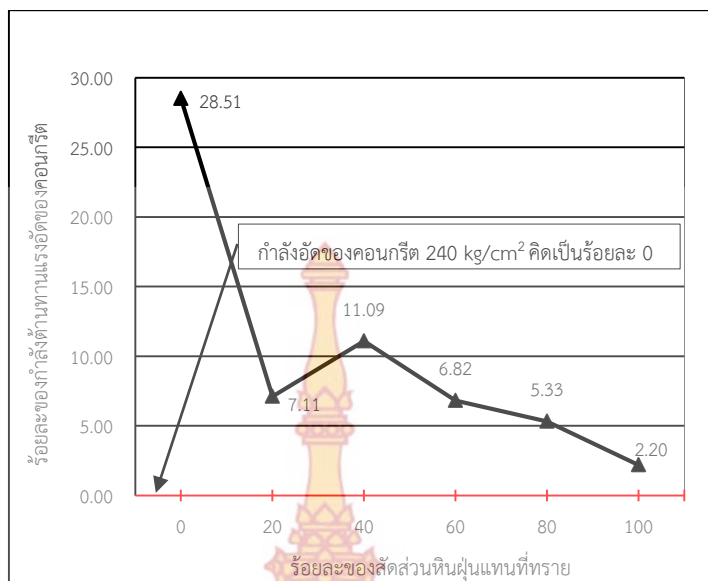
จากภาพที่ 4-6 และ 4-7 กราฟแสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละการเพิ่ม-ลดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ  $269.53 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.30) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ  $246.24 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.60) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ  $248.77 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.66) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ  $247.23 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.01) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ  $228.47 \text{ kg/cm}^2$  (ลดลงร้อยละ 4.80) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $205.87 \text{ kg/cm}^2$  (ลดลงร้อยละ 14.22) พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมากที่สุดในอัตราส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะดึงแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) จากซีเมนต์มารวมกับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ กล่าวคือ เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ที่มีความเหมาะสม โดยจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในด้านการพัฒนากำลังจะช้าลงเนื่องจากปริมาณของซีเมนต์ลดลง แต่ในระยะยาวจะพัฒนากำลังได้มาก

ขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ซิลิกาที่มีอยู่มากในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจะทำการล้างต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และกำลังต้านทานแรงอัดยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นมวลรวมและรูปทรงของมวลรวม กล่าวคือ เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้การรับกำลังต้านทานแรงอัดลดลงเนื่องจากอิทธิพลจากรูปทรงของมวลรวมที่เกิดการขัดล็อกกันได้ไม่ดีทำให้เกิดความเข้ากันในเนื้อคอนกรีตได้น้อยหรือเกิดความพรุนมาก ทำให้รับกำลังต้านทานแรงอัดได้ไม่ดี จึงต้องใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสมกัน

4.2.5 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน

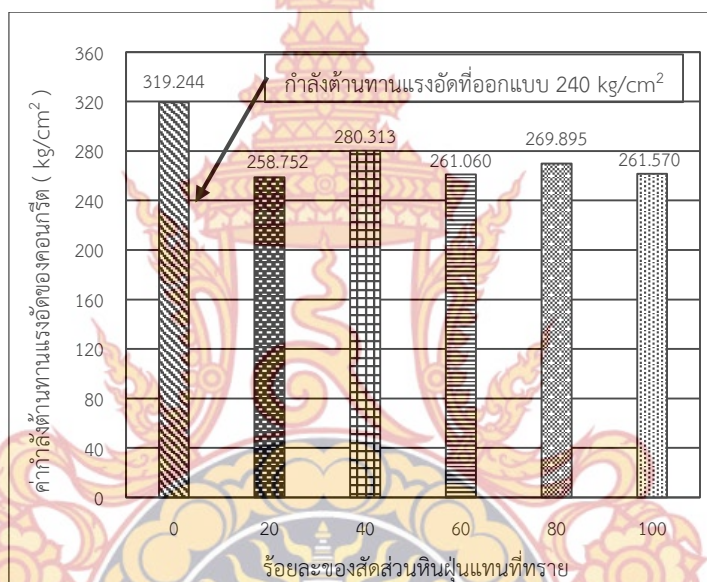


ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถา ทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน

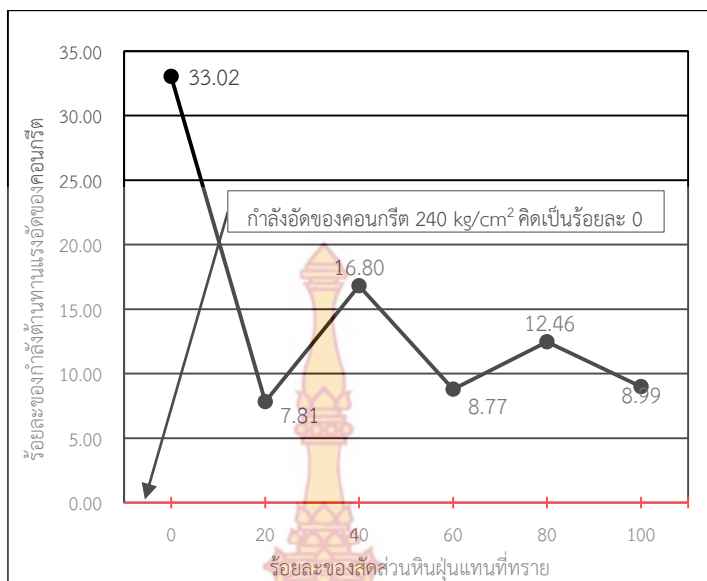
จากภาพที่ 4-8 และ 4-9 กราฟแสดงผลการทดสอบการหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยและ ร้อยละการเพิ่ม-ลด ของคอนกรีตที่ใช้เถาทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 14 วัน จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ  $308.43 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 28.51) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ  $257.07 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.11) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีต แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ  $266.62 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.09) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของ คอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 60 เท่ากับ  $256.36 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.82) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อน ตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายใน อัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ  $252.78 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.33) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ย ของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $245.28 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.20) พบว่าค่ากำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ยมากที่สุดในอัตราส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หิน ปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะดึงแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) จากซีเมนต์มารวมกับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮ เดรต (CSH) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสามารถ รับกำลังต้านทานแรงอัดได้ กล่าวคือ เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาทลายปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ที่มีความเหมาะสม โดยจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันใน ด้านการพัฒนา กำลังจะช้าลงเนื่องจากปริมาณของซีเมนต์ลดลง แต่ในระยะยาวจะพัฒนา กำลังได้มาก

ขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ซิลิกาที่มีอยู่มากในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจะทำการต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และกำลังต้านทานแรงอัดยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นมวลรวมและรูปทรงของมวลรวม กล่าวคือ เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้การรับกำลังต้านทานแรงอัดลดลงเนื่องจากอิทธิพลจากรูปทรงของมวลรวมที่เกิดการขัดล็อกกันได้ไม่ดีทำให้เกิดความเข้ากันในเนื้อคอนกรีตได้น้อยหรือเกิดความพรุนมาก ทำให้รับกำลังต้านทานแรงอัดได้ไม่ดี จึงต้องใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสมกัน

4.2.6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

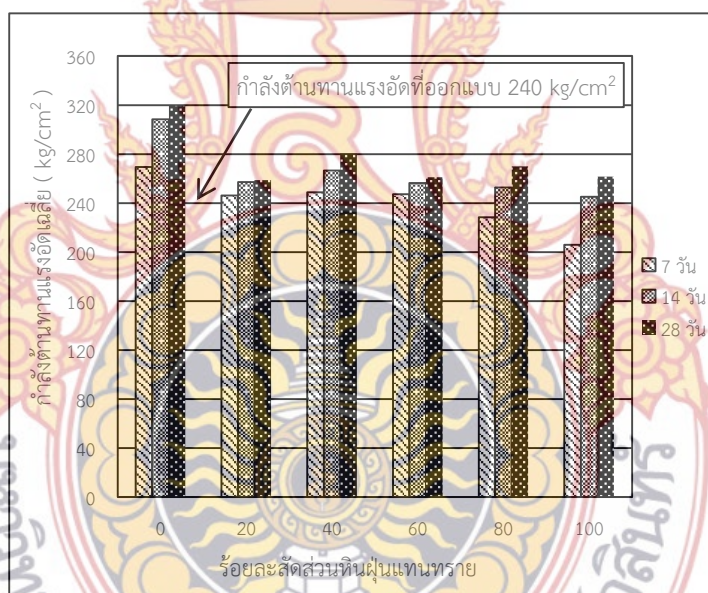


**ภาพที่ 4-11** กราฟแสดงร้อยละการเพิ่ม-ลดของกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4-10 และ 4-11 กราฟแสดงผลการทดสอบการหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยและร้อยละการเพิ่ม-ลดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ  $319.244 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 33.02) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ  $258.752 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.81) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ  $280.313 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.80) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ  $261.060 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.77) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ  $269.895 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.46) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $261.570 \text{ kg/cm}^2$  (เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.99) พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมากที่สุดในอัตราส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะดึงแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) จากซีเมนต์มารวมกับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำให้

คอนกรีตสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ กล่าวคือ เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน ใน สัดส่วนร้อยละ 30 ซึ่งเป็นสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ที่มีความเหมาะสม โดยจะส่งผลกระทบต่อ ปฏิกริยาไฮเดรชันในด้านการพัฒนากำลังจะช้าลงเนื่องจากปริมาณของซีเมนต์ลดลง แต่ในระยะยาว จะพัฒนากำลังได้มากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ซิลิกาที่มีอยู่มากในปอซโซลานจะ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจะทำการกำลังต้านทานแรงอัด เพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และกำลังต้านทานแรงอัดยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นมวลรวมและรูปร่าง ของมวลรวม กล่าวคือ เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้การรับกำลัง ต้านทานแรงอัดลดลงเนื่องจากอิทธิพลจากรูปร่างของมวลรวมที่เกิดการขัดล็อกกันไม่ดีทำให้เกิด ความเข้ากันในเนื้อคอนกรีตได้น้อยหรือเกิดความพรุนมาก ทำให้รับกำลังต้านทานแรงอัดได้ไม่ดี จึง ต้องใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสมกัน

4.2.7 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



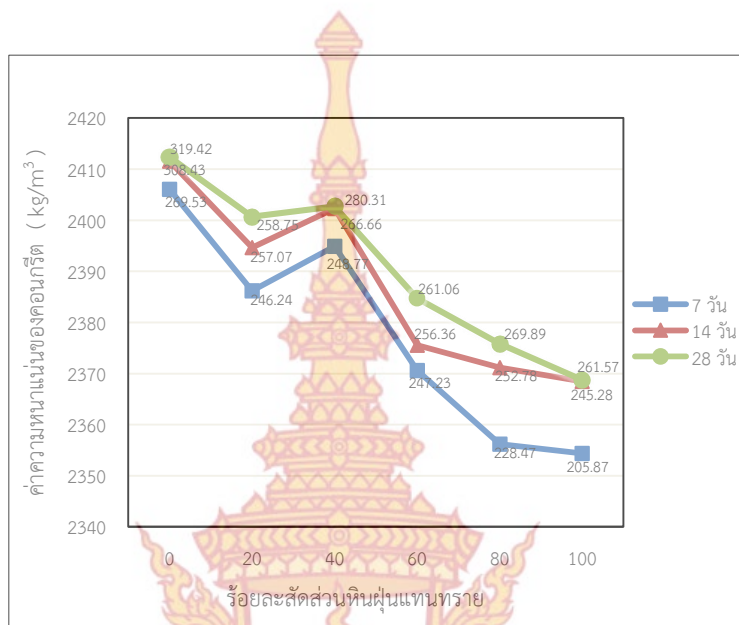
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลาย ปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

จากภาพที่ 4-12 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้า ทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ได้ว่าค่ากำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ  $269.53 \text{ kg/cm}^2$ ,  $308.43 \text{ kg/cm}^2$  และ

319.42 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ 246.24 kg/cm<sup>2</sup>, 257.07 kg/cm<sup>2</sup> และ 258.75 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ 248.77 kg/cm<sup>2</sup>, 266.66 kg/cm<sup>2</sup> และ 280.31 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ 247.23 kg/cm<sup>2</sup>, 256.36 kg/cm<sup>2</sup> และ 261.06 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ 228.47 kg/cm<sup>2</sup>, 252.78 kg/cm<sup>2</sup> และ 269.89 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 100 เท่ากับ 205.87 kg/cm<sup>2</sup>, 245.28 kg/cm<sup>2</sup> และ 261.57 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นโดยจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะดึงแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) จากซีเมนต์มารวมกับน้ำ (H<sub>2</sub>O) ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ ซึ่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาและใช้น้ำ (H<sub>2</sub>O) มากขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมในเนื้อคอนกรีตจะเป็นตัวช่วยลดช่องว่างระหว่างตัวซีเมนต์เพสกับมวลรวม ทำให้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตลดลง และจะทำให้สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น จึงกล่าวได้ว่าระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตเมื่อมีมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น



4.2.8 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

จากภาพที่ 4-13 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ได้ว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ 269.53 kg/cm<sup>2</sup>, 308.43 kg/cm<sup>2</sup> และ 319.42 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ 246.24 kg/cm<sup>2</sup>, 257.07 kg/cm<sup>2</sup> และ 258.75 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ 248.77 kg/cm<sup>2</sup>, 266.66 kg/cm<sup>2</sup> และ 280.31 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ 247.23 kg/cm<sup>2</sup>, 256.36 kg/cm<sup>2</sup> และ 261.06 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วย

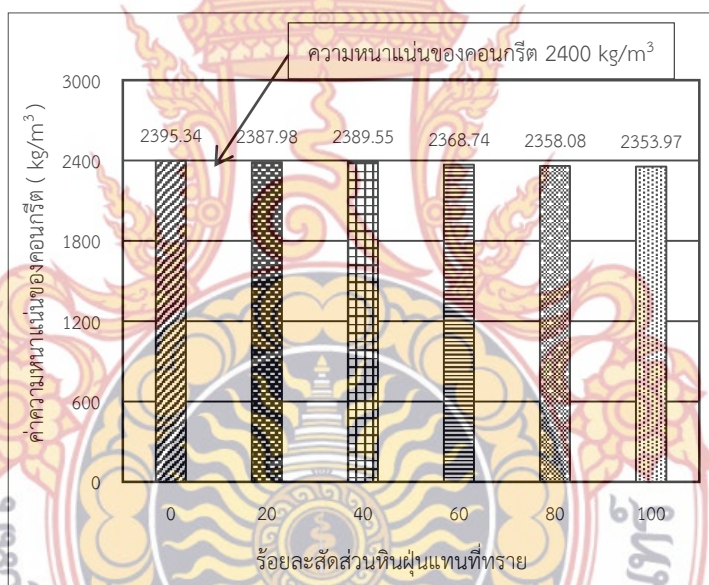
กล้วยปา ล้มน้ำมัน ร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ 228.47 kg/cm<sup>2</sup>, 252.78 kg/cm<sup>2</sup> และ 269.89 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยกล้วยปา ล้มน้ำมัน ร้อยละ 30 ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 100 เท่ากับ 205.87 kg/cm<sup>2</sup>, 245.28 kg/cm<sup>2</sup> และ 261.57 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ได้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้น และเมื่อนำค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นเฉลี่ย พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีค่ามากขึ้นค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อค่าความหนาแน่นเฉลี่ยมีค่าลดลงค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยก็จะมีค่าลดลงไปด้วย กล่าวคือ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยและอายุของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อกำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากแสดงว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดี ซึ่งเมื่อเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้มากขึ้นก็จะทำให้วัสดุเชื่อมประสานกันได้ดีจึงส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยกล้วยปา ล้มน้ำมัน จะทำให้ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ช้าลงจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ซิลิกาที่มีอยู่มากในปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า ทำให้เกิดไฮเดรชันได้ต่ำในช่วงแรกและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จึงเป็นผลทำให้เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการไฮเดรชันก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดในระยะยาวเพิ่มขึ้นตามอายุของก้อนตัวอย่างคอนกรีต



### 4.3 การศึกษาทางด้านความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการนำเอาถลายปาล์มน้ำมันมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยใช้ในการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. โดยการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานการออกแบบวิธี ACI 211.3R-97 โดยทำการขึ้นรูปคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 cm. สูง 4 cm. ตามอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของถลายปาล์มน้ำมันและหินปูนที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยมีผลการทดสอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ถลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้ในการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min.



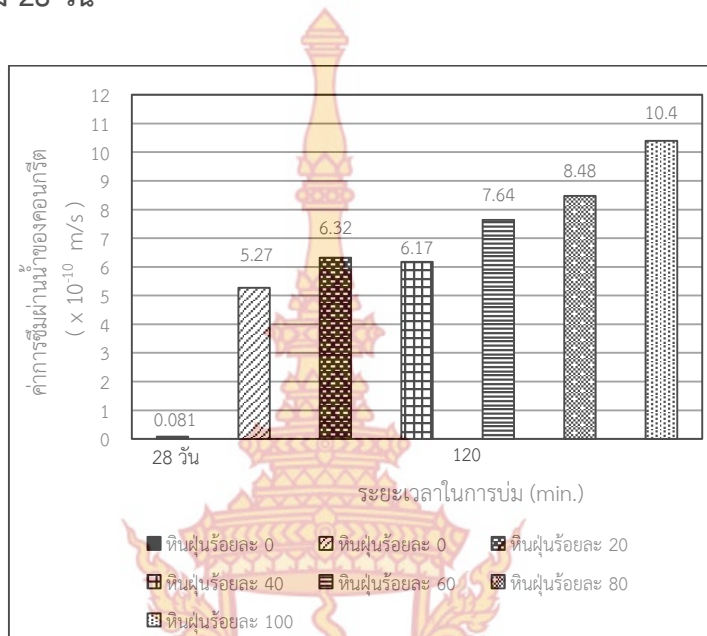
ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ถลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้ในการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min.

จากภาพที่ 4-14 กราฟแสดงผลการทดสอบหาความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้ถลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้ในการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตปกติซึ่งมีความหนาแน่นที่ 2,400 kg/m<sup>3</sup> จากความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตปกติ เท่ากับ 2395.34 kg/m<sup>3</sup>

ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 เท่ากับ  $2,387.98 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ  $2,389.55 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 เท่ากับ  $2,368.74 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 เท่ากับ  $2,358.08 \text{ kg/m}^3$  ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 เท่ากับ  $2,353.97 \text{ kg/m}^3$  เนื่องจากซีเมนต์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 3.085 และเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะ 2.07 แสดงว่าเถ้าทลายปาล์มน้ำมันเบากว่าซีเมนต์ทำให้มีมวลลดลงและจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อแทนที่หินฝุ่นมากขึ้นมวลจะลดลงเนื่องจากความละเอียดของรูปทรงของหินฝุ่นมีน้อยกว่าทรายเมื่อผสมตามสัดส่วนที่กำหนดจะทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้น้อยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อคอนกรีตซึ่งส่งผลทำให้มวลเบาลงค่าความหนาแน่นจึงลดลง แต่ในทุกสัดส่วนที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนที่ทรายค่าความหนาแน่นน้อยกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$  เนื่องจากเมื่อนำไปบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้มวลรวมภายในคอนกรีตเกิดการขยายตัวและสูญเสียน้ำจากการระเหยทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลง เมื่อน้ำหนักลดลงจะส่งผลทำให้ความหนาแน่นลดลงด้วย



4.3.2 ผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติ โดยระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 4-15 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติ โดยระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4-15 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในทุกอัตราส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. ได้ว่าค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ  $5.27 \times 10^{-10}$  m/s ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ  $6.32 \times 10^{-10}$  m/s ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีค่าเท่ากับ  $6.17 \times 10^{-10}$  m/s ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 60 มีค่าเท่ากับ  $7.64 \times 10^{-10}$  m/s ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 80 มีค่าเท่ากับ  $8.48 \times 10^{-10}$  m/s ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ  $10.4 \times 10^{-10}$  m/s พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านน้ำโดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์ 720 Watt โดยระยะเวลาการบ่มที่ 120 min. ค่าอัตราการซึมผ่าน

น้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 มีค่าอัตราการซึมผ่านน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20, 60, 80 และ 100 แต่จะเห็นได้ว่าคอนกรีตปกติมีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำได้น้อยกว่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ในสัดส่วนที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 40 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตปกติเกิดขึ้นได้มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินฝุ่นแทนที่ทราย กล่าวคือคอนกรีตปกติมีปริมาณซีเมนต์ที่มากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วกว่าเมื่อเทียบการใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมัน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากทำให้วัสดุมวลรวมเกิดการประสานกันได้ดีขึ้นซึ่งทำให้ลดช่องว่างระหว่างมวลรวมจึงทำให้ลดความพรุนของคอนกรีต แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้การบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟกับคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำที่อายุคอนกรีต 28 วัน ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เท่ากับ  $0.081 \times 10^{-10}$  m/s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ ปริญา จินดาประเสริฐ มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ  $0.05 \times 10^{-10}$  m/s ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการซึมผ่านของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีค่ามากกว่าอัตราการซึมผ่านของคอนกรีตปกติที่บ่มด้วยน้ำที่อายุคอนกรีต 28 วัน เนื่องจากการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนสูงมากจึงทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็วซึ่งน้ำเป็นส่วนสำคัญในเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อน้ำที่ทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดแคลเซียมซิวลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมได้น้อยมาก คอนกรีตจึงเกิดความพรุนและช่องว่างภายในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยที่คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำที่อายุคอนกรีต 28 วัน มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์มากกว่า จึงส่งผลทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติที่บ่มด้วยน้ำที่อายุคอนกรีต 28 วัน

ดังนั้นการนำเถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 watt ใช้ระยะเวลาการบ่ม 120 min. พบว่าการใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังต้านทานแรงอัดที่ออกแบบไว้มีค่าเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติที่จะใช้ในงานต่างๆ ได้ เช่น เสาคาน และผนัง เป็นต้น

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

พิจารณาการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่น คุณสมบัติทางกล ทางด้านการรับกำลังด้านทานแรงอัดและคุณสมบัติทางด้านอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีตโดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt โดยใช้ระยะเวลาการบ่ม 120 min. ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนการผสมและเปรียบเทียบกับอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติระยะเวลา 28 วัน โดยได้ทำการออกแบบกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีต เท่ากับ  $240 \text{ kg/cm}^2$

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

1. จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพในด้านความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินปูนแทนที่ทรายโดยบ่มที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 จะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่อายุคอนกรีต 28 วัน เท่ากับ  $2,402.71 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปกติที่ได้ออกแบบไว้ที่อายุคอนกรีต 28 วัน เท่ากับ  $2,412.36 \text{ kg/m}^3$  เนื่องจากเถ้าทลายปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.07 ซึ่งน้อยกว่าซีเมนต์เท่ากับ 3.085 และการใช้หินปูนที่มีรูปทรงเหลี่ยมและแบนแรงยึดเกาะระหว่างมวลรวมจึงน้อยกว่าทรายส่งผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวม ซึ่งจะส่งผลให้มวลของคอนกรีตลดลง ความหนาแน่นจึงน้อยกว่าคอนกรีตปกติที่ออกแบบไว้ แต่จะมีความหนาแน่นมากกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$

2. จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพในด้านความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินปูนแทนที่ทรายโดยบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ที่ระยะเวลา 120 min. พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 จะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ  $2,389.55 \text{ kg/m}^3$  และคอนกรีตปกติที่ออกแบบไว้เท่ากับ  $2,395.34 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่า  $2,400 \text{ kg/m}^3$  เนื่องจากการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีความร้อนสูงจึงทำให้น้ำภายในคอนกรีตเกิดการระเหยออกมาทำให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติ ส่งผลให้มวลของคอนกรีตลดลง ความหนาแน่นของคอนกรีตจึงลดมากกว่าการบ่มด้วยน้ำ

3. จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์และหินปูนแทนที่ทรายโดยบ่มที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 ที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $280.313 \text{ kg/cm}^2$  ทำให้ค่ากำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.80 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ออกแบบไว้  $240 \text{ kg/cm}^2$  เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ทำให้มี

ปริมาณแคลเซียมซิติลเกตไฮเดต (CSH) ซึ่งเป็นวัสดุประสานมากพอที่จะส่งผลในด้านการรับกำลัง ซึ่งในช่วงแรกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะช้าจากการลดปริมาณซีเมนต์และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้การพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นในระยะยาว

4. จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตโดยการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ที่ระยะเวลา 120 min. พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าหลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตต่ำที่สุดเท่ากับ  $6.17 \times 10^{-10}$  m/s เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่มีความหนาแน่นมากที่สุด จึงมีช่องว่างในเนื้อคอนกรีตน้อยสุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น เป็นผลทำให้สามารถผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำจึงมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนอื่น แต่ยังมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติที่ควบคุมไว้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.27 \times 10^{-10}$  m/s

5. จากการทดสอบจากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตโดยการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ที่ระยะเวลา 120 min. เปรียบเทียบกับการบ่มด้วยน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน พบว่าการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟมีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำน้อยสุดที่สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าหลายปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 เท่ากับ  $6.17 \times 10^{-10}$  m/s และคอนกรีตปกติที่ออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ  $5.27 \times 10^{-10}$  m/s โดยที่การบ่มด้วยน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ  $0.081 \times 10^{-10}$  m/s จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่บ่มน้ำจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่มาก เนื่องจากการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดแคลเซียมซิติลเกต (CSH) ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมไม่เพียงพอ ทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตจำนวนมาก ส่งผลทำให้ไม่สามารถทนทานต่อการซึมผ่านน้ำได้

6. จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่มีความเหมาะสม คือ การใช้เถ้าหลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 40 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน เนื่องจากมีความหนาแน่นและมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น

## 5.2 อุปสรรค

1. ในการประกอบก้อนตัวอย่างเข้ากับเซลล์ทดสอบการซึมผ่านน้ำนั้นต้องทำการไล่ฟองอากาศภายในเซลล์ทดสอบหลังประกอบกับก้อนตัวอย่างแล้วออกให้หมดซึ่งเป็นไปได้ยากมาก จึงทำการแก้ไขโดยนำก้อนตัวอย่างไปประกอบกับเซลล์ทดสอบในน้ำเพื่อไล่ฟองอากาศให้เหลือน้อยที่สุดและลดค่าความคลาดเคลื่อน

2. การหล่ออีพ็อกซีนั้นทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากเวลาหล่อก้อนตัวอย่างเข้ากับ อีพ็อกซีนั้นมีการรั่วไหลออกมาด้านข้างแบบหล่อและอีพ็อกซีจะแข็งตัวค่อนข้างเร็วหลังจากที่ผสมแล้ว จึงทำการแก้ไขโดยยิงซิลิโคนอุดรอยรั่วและเร่งมือในการเทอีพ็อกซีก่อนที่จะแข็งตัว



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตโดยการบ่มน้ำหรือการบ่มที่อุณหภูมิห้องเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตในวิธีการบ่มที่ต่างกัน
2. อาจมีการเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าหลายปาล์มน้ำมันจากร้อยละ 30 เพิ่มเติมเป็นสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากการเพิ่ม-ลด ปริมาณซีเมนต์ ซึ่งโดยปกติแล้วงานวิจัยที่ผ่านมาจะใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 40
3. อาจมีการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติที่อายุ 7 และ 14 วันเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านน้ำโดยการบ่มที่อุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน
4. ควรศึกษาเกี่ยวกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นที่ได้มาจากการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย และเถ้าตะกรัน เพื่อนำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผสมคอนกรีตและเพื่อใช้ศึกษาในด้านอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตของวัสดุทดแทนชนิดอื่น
5. ในการหล่ออิพ็อกซีควรรหาน้ำมันหล่อลื่นผิวด้านในของแบบ เพื่อให้สะดวกในการแกะก่อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ



## บรรณานุกรม

1. Hansen, T.C. and Narud, H., “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate”, Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83. 2526.
2. Ravindrajah และ Tam, ศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ, 2528.
3. Soroushian P. and Mirza F. “Permeability and Resistance to Impact and Abrasion of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete.” Fibre Reinforced Cement and Concrete. Edited by Swamy, R.N. London : E & FN Spon , 2535.
4. ชัชวาล เศรษฐบุต, “คอนกรีตเทคโนโลยี,” คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2536.
5. Limbachiya และคณะ, ศึกษาถึงการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังสูงมวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล, 2545.
5. เผ่าพงศ์ นิจจันทร์พันธ์ศรี และ ประชุม คำพุด, การศึกษาการใช้หินฝุ่นผสมคอนกรีตแทนทราย, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2548.
6. ASTM C 150, “Standard specification for Portland cement”, Annual Book of ASTM Standard, ASTM International, Vol. 4.01, Part 2, pp. 1-7. 2549.
7. ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, การศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต, 2550.
8. ประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, Cement Pozzolan and Concrete, พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีต, 2551.
9. Ann และคณะ, ได้ศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30, 2551.
10. ชีระ เทพพรหม, การศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบ, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 2552.
11. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต, “วารสารวิจัยและพัฒนา มจร,” ปีที่ 35, ฉบับที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.
12. กนกกาญจน์ ทองขิม และคณะ, การศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ซีเถ้าจากวัสดุชีวมวลเป็นส่วนผสม, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วังไกลกังวล, 2554.
13. ชีรวุฒน์ สิ้นศิริ, การใช้ดินเผาเป็นวัสดุประสาน, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
15. ชูติพงศ์ เอื้อธิตาภรณ์, การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุมวลรวม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
16. สุรพันธ์ และคณะ, การศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน, 2558.
17. นิธิส สุภาณี, การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตและความสามารถในการซึมผ่านน้ำ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการและประหยัด คุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่ใช้เป็นส่วนประกอบ จึงได้ทำการแสดงขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามวิธีของ ACI 211.3R-97

ขั้นตอนการออกแบบตามวิธีของ ACI 211.3R-97

ขั้นตอนที่ 1 กำลังที่ต้องการผลิต

$$\begin{aligned} \text{กำลังที่ต้องการผลิต} &= (fc') + ks \\ &= 240 + (1.945 \times 30) = 300 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกค่ายุบตัว

เลือกค่าการยุบตัว โดยในแนวทางปฏิบัติทั่วไปเห็นว่าควรใช้ค่าความยุบตัว 8-10 cm.

ขั้นตอนที่ 3 ข้อกำหนดให้ใช้ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 20 mm.

ขั้นตอนที่ 4 เลือกปริมาณน้ำที่ต้องการใช้

เลือกปริมาณน้ำที่ต้องใช้ จากค่าความยุบตัวที่กำหนด และ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ โดยไม่ต้องใส่สารกระจายฟองอากาศจากตารางที่ ก-1



ตารางที่ ก-1 ปริมาณน้ำที่ต้องใช้สำหรับผสมคอนกรีตให้มีค่ายุบตัวตามต้องการ

ค่ายุบตัว (cm.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 m <sup>3</sup>							
	3/8 in.	1/2 in.	3/4 in.	1 in.	1 ½ in.	2 in.	3 in.	6 in.
	10 mm.	12.5 mm.	20 mm.	25 mm.	40 mm.	50 mm.	75 mm.	150 mm.
3 - 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 - 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 - 18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณ ฟองอากาศ ร้อยละโดย ปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.3

(ที่มา : ชีวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ขั้นตอนที่ 5 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จากค่ากำลังอัดประลัยที่ต้องการออกแบบเลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จากค่ากำลังอัดประลัยที่ต้องการออกแบบจากตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน kg/cm <sup>2</sup>	w/c โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่ใช้สารกระจาย กักฟองอากาศ	คอนกรีตใช้สารกระจายกัก ฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.8	0.71

(ที่มา : ชีวาล เศรษฐบุตร, 2536)

### ขั้นตอนที่ 6 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ} &= \text{ปริมาณน้ำ/อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์} \\ &= 200/0.55 = 364 \text{ kg} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ 7 ปริมาณของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นหาปริมาณของวัสดุผสมหยาบ

โดยทั่วไปเลือกค่าโมดูลัสความละเอียดของวัสดุผสมละเอียดเท่ากับ 2.8 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบตามที่กำหนดไว้ จะได้ปริมาณของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นจากตารางที่ ก-3 เท่ากับ  $0.62 \text{ m}^3 / \text{m}^3$  ของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของหิน  $1600 \text{ kg/m}^3$

ดังนั้นน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบใช้

$$= 0.62 \times 1,600 = 992 \text{ kg}$$

### ตารางที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาณทรายเป็นในสภาพแห้งอัดแน่น ต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่า Fineness Modulus ของทรายต่างๆ			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 in. (10 mm.)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 in. (12.5 mm.)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 in. (20 mm.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 in. (25 mm.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2 in. (40 mm.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2 in. (50 mm.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3 in. (75 mm.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6 in. (150 mm.)	0.87	0.85	0.83	0.81

(ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุต, 2536)

### ขั้นตอนที่ 8 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียดปริมาตรของทราย = ปริมาตรของคอนกรีต-ปริมาตร

ของส่วนผสม(ยกเว้นทราย)น้ำหนักของทราย = ปริมาตรของทราย x ความถ่วงจำเพาะของทราย x หน่วยน้ำหนักของน้ำ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของ ซีเมนต์ ทราย หิน ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก-4

ตารางที่ ก-4 ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

วัตถุดิบ	ค่าความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละค่าการดูดซึม
ซีเมนต์	3.15	-
หินย่อย	2.70	0.50
ทรายแม่น้ำ	2.65	0.70

(ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตตร, 2536)

## ขั้นตอนที่ 9 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาณเนื้อแท้ของส่วนผสม :

$$\text{ปริมาตรของน้ำ} = \frac{200}{1,000} = 0.200 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของซีเมนต์} = \frac{364}{3.15 \times 1,000} = 0.116 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ} = \frac{992}{2.70 \times 1,000} = 0.367 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของฟองอากาศ} = 0.02 \times 1.0 = 0.020 \text{ m}^3$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณของส่วนผสมทั้งหมดยกเว้นทราย} = 0.703 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้} = 1 - 0.703 = 0.297 \text{ m}^3$$

$$\text{น้ำหนักของทรายแห้ง} = 0.297 \times 2.60 \times 1,000 = 772 \text{ m}^3$$

ฉะนั้น คอนกรีต 1 m<sup>3</sup> ต้องใช้

$$\text{ซีเมนต์} \quad 364 \text{ kg.}$$

$$\text{น้ำ} \quad 200 \text{ kg}$$

$$\text{วัสดุผสมหยาบ} \quad 992 \text{ kg}$$

$$\text{วัสดุผสมละเอียด} \quad 772 \text{ kg}$$

$$\text{รวมน้ำหนักทั้งหมด} \quad 2,328 \text{ kg}$$

## ขั้นตอนที่ 10 หาส่วนผสมพื้นฐานของก้อนคอนกรีตควบคุม

ปริมาตรของก้อนคอนกรีตแบบเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 cm. สูง 30 cm.

จำนวน 15 ก้อน ในทุกสัดส่วน จะมีปริมาตรเท่ากับ 0.0795 m<sup>3</sup>

$$\text{ซีเมนต์} = 364 \times 0.0795 = 28.938 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำ} = 200 \times 0.0795 = 15.9 \text{ kg}$$

$$\text{ทราย} = 772 \times 0.0795 = 61.374 \text{ kg}$$

$$\text{หิน} = 992 \times 0.0795 = 78.864 \text{ kg}$$



### ขั้นตอนที่ 11 หาส่วนผสมเคียงที่ใช้

ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 30 และใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60 และ 80

11.1	เถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 คิดเป็น	= $0.3 \times 28.935$	= 8.68 kg
	ซีเมนต์	= $0.7 \times 28.935$	= 20.25 kg
	หินปูน ร้อยละ 20 คิดเป็น	= $0.2 \times 61.374$	= 12.275 kg
	ทราย	= $0.8 \times 61.374$	= 49.1 kg
	น้ำ	= 15.9 kg	
	หิน	= 78.864 kg	
11.2	เถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 คิดเป็น	= $0.3 \times 28.935$	= 8.68 kg
	ซีเมนต์	= $0.7 \times 28.935$	= 20.25 kg
	หินปูน ร้อยละ 40 คิดเป็น	= $0.4 \times 61.374$	= 24.549 kg
	ทราย	= $0.6 \times 61.374$	= 36.82 kg
	น้ำ	= 15.9 kg	
	หิน	= 78.864 kg	
11.3	เถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 คิดเป็น	= $0.3 \times 28.935$	= 8.68 kg
	ซีเมนต์	= $0.7 \times 28.935$	= 20.25 kg
	หินปูน ร้อยละ 60 คิดเป็น	= $0.6 \times 61.374$	= 36.82 kg
	ทราย	= $0.4 \times 61.374$	= 24.549 kg
	น้ำ	= 15.9 kg	
	หิน	= 78.864 kg	
11.4	เถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 คิดเป็น	= $0.3 \times 28.935$	= 8.68 kg
	ซีเมนต์	= $0.7 \times 28.935$	= 20.25 kg
	หินปูน ร้อยละ 80 คิดเป็น	= $0.8 \times 61.374$	= 49.099 kg
	ทราย	= $0.2 \times 61.374$	= 12.27 kg
	น้ำ	= 15.9 kg	
	หิน	= 78.864 kg	

11.5	ถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 30 คิดเป็น	= $0.3 \times 28.935$	= 8.68 kg
	ซีเมนต์	= $0.7 \times 28.935$	= 20.25 kg
	หินฝุ่น ร้อยละ 100 คิดเป็น	= $1.0 \times 61.374$	= 61.374 kg
	ทราย	= $0.0 \times 61.374$	= 0 kg
	น้ำ	= 15.9 kg	
	หิน	= 78.864 kg	






ภาคผนวก ข

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตาราง ข-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล	
	การทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ SPECIFIC GRAVITY OF PORTLAND CEMENT	
Project Name : การทดสอบความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		
Location : RMUTR/KKW.	Date of Test :07/11/58	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล	Test by : ชาญชัย วอนปลอบ	
รายการ	ทดสอบครั้งที่	
	1	2
ระดับน้ำมันก๊าดครั้งแรก (ml.)	0.3	0.4
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C)	30	30
น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ (g.)	64	64
ระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (ml.)	21.2	21
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml.)	20.9	20.6
ความถ่วงจำเพาะ	3.06	3.11
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	3.085	




ภาคผนวก ค

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเก้าทลายปาล์มน้ำมัน

ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน

ตาราง ค-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล	
	การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน SPECIFIC GRAVITY OF PALM OIL REGIONALISM ASH	
Project Name : การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าทลายปาล์มน้ำมัน		
Location : RMUTR/KKW.		Date of Test :07/11/58
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล		Test by : ชาญชัย วอนปลอบ
รายการ	ทดสอบครั้งที่	
	1	2
ระดับน้ำมันก๊าดครั้งแรก (ml.)	0.5	0.6
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C)	30	30
น้ำหนักเถ้าทลายปาล์มน้ำมันที่ใช้ (g.)	48	48
ระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (ml.)	23.9	23.5
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml.)	23.4	22.9
ความถ่วงจำเพาะ	2.05	2.09
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.07	




ภาคผนวก ง

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

ตาราง ง-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล	
	การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด SPECIFIC GRAVITY OF FINE AGGREGATE	
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด		
Location : RMUTR/KKW.	Date of Test :07/11/58	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล	Test by : ชาญชัย วอนปลอบ	
รายการ	ทดสอบครั้งที่	
	1	
WT. SAND (SSD)	500	
WT. FLASK+SAND (SSD)+WATER ;(g.)	959	
TEMPERATER ; (°C)	29	
WT. BOWL ;(g.)	488	
WT. BOWL+DRY SAND ;(g.)	938	
DRY SAND ;(g.)	450	
WT. FLASK+WATER ;(g.)	677.76	
BULK SPECIFIC GRAVITY ;	2.05	
BULK SPECIFIC GRAVITY(SSD) ;	2.285	




ภาคผนวก จ  
การทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น



ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น

ตาราง จ-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น


	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล	
	การทดสอบความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น SPECIFIC GRAVITY OF CRUSHED DUST	
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่น		
Location : RMUTR/KKW.	Date of Test :07/11/58	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล	Test by : ชาญชัย วอนปลอบ	
รายการ	ทดสอบครั้งที่	
	1	
WT. SAND (SSD)	500	
WT. FLASK+SAND (SSD)+WATER ;(g.)	976.32	
TEMPERATER ;°C	29	
WT. BOWL ;(g.)	134.23	
WT. BOWL+DRY SAND ;(g.)	530.81	
DRY SAND ;(g.)	396.58	
WT. FLASK+WATER ;(g.)	660.89	
BULK SPECIFIC GRAVITY ;	2.14	
BULK SPECIFIC GRAVITY(SSD) ;	2.708	

ภาคผนวก ฉ  
การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ



การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ ฉ-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล	
	การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF COARSE AGGREGATE	
Project Name : การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ		
Location : RMUTR/KKW.	Date of Test :08/11/58	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล	Test by : ชาญชัย วอนปลอบ	
รายการ	ทดสอบครั้งที่	
	1	2
WEGHT. OF SSD SAMPLE ;(g.)	5045	5035
WEGHT. OF CONTAINER (BASKET) IN WATER ;(g.)	704	702
WEGHT. OF CONTAINER+SAMPLE IN WATER ;(g.)	3895	3874
WEGHT. OF SAMPLE IN WATER ;(g.)	3191	3172
WEGHT. OF OVEN-DRY SAMPLE IN AIR ;(g.)	4950	4946
BULK SPECIFIC GRAVITY (OVEN-DRY)	2.67	2.65
BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD)	2.72	2.70
APRARENT SPECIFIC GRAVITY	2.81	2.78
ABSORPTION (%)	1.81	1.79
AVERAGE BULK SPECIFIC GRAVITY (OVEN-DRY)	2.66	
AVERAGE BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD)	2.71	
AVERAGE APPARENT SPECIFIC GRAVITY (SSD)	2.795	
AVERAGE ABSORPTION (%)	1.8	

ภาคผนวก ซ

การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน



ตารางที่ ข-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ไม้ทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 0			หินฝุ่นร้อยละ 20			หินฝุ่นร้อยละ 40		
	ไม้ปาล์มร้อยละ 0			ไม้ปาล์มร้อยละ 30			ไม้ปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Diameters, D (cm)	14.92	14.87	14.91	15.00	15.05	14.98	14.89	14.87	14.90
Height, H (cm)	29.57	29.96	29.87	30.00	30.01	29.95	30.03	30.09	30.07
Mass, M (kg)	12.50	12.48	12.54	12.70	12.68	12.62	12.57	12.51	12.53
Area, A (cm <sup>2</sup> )	174.91	173.73	174.67	176.79	177.97	176.31	174.20	173.73	174.44
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5171.94	5204.74	5217.94	5303.57	5340.77	5280.62	5231.30	5227.68	5245.30
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2416.89	2397.81	2403.44	2394.61	2374.19	2389.87	2402.85	2393.03	2388.80
Load Max (kN)	512.90	445.90	425.00	461.60	467.50	354.20	442.70	426.90	405.20
Load, P (kg)	52283.38	45453.62	43323.14	47054.03	47655.45	36106.01	45127.42	43516.82	41304.79
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	298.92	261.63	248.03	266.16	267.78	204.78	259.05	250.48	236.79
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	269.53			246.24			248.77		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2406.05			2386.22			2394.89		

ตารางที่ ข-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ไม้ทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 60			หินฝุ่นร้อยละ 80			หินฝุ่นร้อยละ 100		
	ไม้ปาล์มร้อยละ 30			ไม้ปาล์มร้อยละ 30			ไม้ปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Diameters, D (cm)	15.00	14.97	14.98	15.07	15.00	14.98	15.025	15.01	14.96
Height, H (cm)	30.05	30.20	30.00	30.09	30.09	30.10	30.1	30.17	30.07
Mass, M (kg)	12.58	12.59	12.56	12.57	12.46	12.64	12.614	12.536	12.443
Area, A (cm <sup>2</sup> )	176.79	176.08	176.20	178.44	176.79	176.20	177.38	177.02	175.84
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5312.41	5317.59	5285.91	5369.96	5319.48	5303.53	5339.00	5340.74	5287.63
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2368.04	2367.61	2376.13	2341.54	2342.90	2384.07	2362.61	2347.24	2353.23
Load Max (kN)	440.20	422.10	420.90	393.30	393.00	404.70	364.6	352.5	353.8
Load, P (kg)	44872.58	43027.52	42905.20	40091.74	40061.16	41253.82	37166.16	35932.72	36065.24
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	253.82	244.36	243.51	224.68	226.61	234.13	209.53	202.99	205.10
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	247.23			228.47			205.87		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2370.59			2356.17			2354.36		



ภาคผนวก ซ

การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัด  
ของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน



ตารางที่ ซ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เถ้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 0			หินฝุ่นร้อยละ 20			หินฝุ่นร้อยละ 40		
	เถ้าปาล์มร้อยละ 0			เถ้าปาล์มร้อยละ 30			เถ้าปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Diameters, D (cm)	14.98	14.90	15.06	15.01	14.95	14.97	14.97	14.97	15.01
Height, H (cm)	29.88	29.89	29.89	30.00	29.69	29.95	29.35	29.87	29.32
Mass, M (kg)	12.67	12.72	12.72	12.59	12.60	12.63	12.44	12.50	12.56
Area, A (cm <sup>2</sup> )	176.20	174.44	178.20	177.02	175.61	175.96	176.08	175.96	176.90
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5263.88	5213.90	5326.48	5310.65	5213.83	5270.05	5167.93	5255.98	5186.81
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2406.97	2439.63	2388.07	2370.71	2416.65	2396.56	2407.15	2378.25	2421.53
Load Max (kN)	517.30	539.60	543.10	451.50	434.30	447.30	454.90	484.20	444.30
Load, P (kg)	52731.91	55005.10	55361.88	46024.46	44271.15	45596.33	46371.0	49357.8	45290.52
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	299.28	315.33	310.67	259.99	252.10	259.13	263.35	280.50	256.02
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	308.43			257.07			266.62		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2411.56			2394.64			2402.31		

ตารางที่ ซ-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 14 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 60			หินฝุ่นร้อยละ 80			หินฝุ่นร้อยละ 100		
	เก้าปาล์มร้อยละ 30			เก้าปาล์มร้อยละ 30			เก้าปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Diameters, D (cm)	14.97	15.02	15.01	15.01	15.02	15.015	15.01	14.95	15
Height, H (cm)	29.96	30.04	29.95	30.08	30.08	30	29.98	29.99	30
Mass, M (kg)	12.55	12.54	12.66	12.661	12.642	12.567	12.534	12.5	12.57
Area, A (cm <sup>2</sup> )	175.96	177.14	176.90	177.02	177.26	177.14	177.02	175.61	176.79
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5271.81	5321.27	5298.26	5324.81	5331.90	5314.18	5307.10	5266.52	5303.57
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2381.34	2356.77	2388.52	2377.74	2371.01	2364.80	2361.74	2373.49	2370.10
Load Max (kN)	444.30	444.30	444.30	443.9	440.1	433.8	405.9	429	438.9
Load, P (kg)	45290.52	45290.52	45290.52	45249.75	44862.39	44220.18	41376.15	43730.89	44740.06
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	257.39	255.68	256.02	255.62	253.09	249.63	233.74	249.02	253.08
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	256.36			252.78			245.28		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2375.54			2371.18			2368.44		




ภาคผนวก ฅ  
การคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัด  
ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ ฅ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ใ้แก่หลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 0			หินฝุ่นร้อยละ 20			หินฝุ่นร้อยละ 40		
	เถ้าปาล์มร้อยละ 0			เถ้าปาล์มร้อยละ 30			เถ้าปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Diameters,D (cm)	15.00	14.90	15.11	15.05	14.98	15.03	15.02	15.03	14.94
Height, H (cm)	30.00	30.00	30.01	29.57	30.01	29.91	30.10	29.94	29.74
Mass, M (kg)	12.81	12.79	12.80	12.70	12.69	12.69	12.69	12.68	12.72
Area, A (cm <sup>2</sup> )	176.79	174.44	179.39	177.97	176.31	177.49	177.14	177.38	175.26
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5303.57	5233.09	5383.44	5262.46	5291.20	5308.83	5331.90	5310.62	5212.14
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2415.35	2444.06	2377.66	2413.32	2398.32	2390.36	2380.02	2387.67	2440.46
Load Max (kN)	543.30	557.10	561.20	456.50	439.70	453.70	520.70	465.80	470.40
Load, P (kg)	55382.26	56788.99	57206.93	46534.15	44821.61	46248.73	53078.49	47482.16	47951.07
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	313.27	325.56	318.90	261.48	254.21	260.57	299.64	267.69	273.60
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>3</sup> )	319.24			258.75			280.31		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2412.36			2400.67			2402.71		

ตารางที่ ฅ-2 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ใ้แก่ทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 60			หินฝุ่นร้อยละ 80			หินฝุ่นร้อยละ 100		
	เถ้าปาล์มร้อยละ 30			เถ้าปาล์มร้อยละ 30			เถ้าปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Days	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Diameters, D (cm)	15.03	15.035	15.09	15.00	14.965	15.045	14.98	15.045	14.90
Height, H (cm)	30.05	30.05	29.97	30.07	30.01	29.88	30.02	29.94	30.16
Mass, M (kg)	12.759	12.758	12.708	12.788	12.690	12.826	12.542	12.510	12.560
Area, A (cm <sup>2</sup> )	177.38	177.61	178.91	176.79	175.96	177.85	176.31	177.85	174.44
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	5330.13	5337.23	5362.04	5315.95	5280.61	5314.10	5292.96	5324.77	5261.00
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2393.75	2390.38	2369.99	2405.59	2308.24	2413.58	2369.56	2349.40	2387.38
Load Max (kN)	452.78	448	466.6	478.5	463.9	462.4	474.3	439.8	442.2
Load, P (kg)	46154.9	45667.69	47563.71	48776.76	47288.48	47135.58	48348.62	44831.80	45076.45
Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	260.21	257.12	265.85	275.91	268.74	265.03	274.22	252.08	258.41
Average Ultimate Compressive Strength (kg/cm <sup>3</sup> )	261.06			269.89			261.57		
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2384.71			2375.80			2368.78		



ภาคผนวก ญ

การคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต  
โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลา 120  
min.

ตารางที่ ญ-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำคอนกรีตที่ใช้เก้าทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลาการบ่ม 120 min.

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 0			หินฝุ่นร้อยละ 20			หินฝุ่นร้อยละ 40		
	เก้าปาล์มร้อยละ 0			เก้าปาล์มร้อยละ 30			เก้าปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Time of Microwave (min.)	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Energy (watt)	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Diameters, D (cm)	10.13	10.19	10.17	10.02	10.10	9.98	10.01	10.04	9.98
Height, H (cm)	4.09	4.10	3.95	4.05	4.06	4.12	3.97	4.06	4.09
Mass, M (kg)	0.79	0.80	0.77	0.76	0.78	0.77	0.75	0.77	0.76
Area, A (cm <sup>2</sup> )	80.63	81.59	81.27	78.89	80.15	78.26	78.73	79.20	78.26
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	329.7	334.5	321.0	319.4	325.4	322.4	312.5	321.5	320.0
Pressure, P (Mpa)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Density of water, ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Gravity, g (m <sup>2</sup> /s)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Net Flow Rate, Q (m <sup>3</sup> /s) x 10 <sup>-9</sup>	3.88	5.43	6.59	5.81	6.97	6.28	4.65	6.59	7.36
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2395.63	2391.63	2398.76	2378.80	2396.96	2388.18	2399.60	2394.60	2374.46
Coefficients of Permeability, K (m/s) x 10 <sup>-10</sup>	3.86	5.40	6.56	5.78	6.94	6.25	4.63	6.56	7.33
Average Density (kg/ cm <sup>3</sup> )	2395.34			2387.98			2389.55		
Average Coefficients of Permeability, K (m/s) x 10 <sup>-10</sup>	5.27			6.32			6.17		

ตารางที่ ๒-๒ แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ใช้แก้วทลายปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยใช้การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 720 Watt ระยะเวลาการบ่ม 120 min.

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 60			หินฝุ่นร้อยละ 80			หินฝุ่นร้อยละ 100		
	แก้วปาล์มร้อยละ 30			แก้วปาล์มร้อยละ 30			แก้วปาล์มร้อยละ 30		
Specimens	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Time of Microwave (min.)	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Energy (watt)	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Diameters, D (cm)	10.03	9.96	10.00	9.96	10.01	10.02	10.05	9.93	10.02
Height, H (cm)	3.96	4.02	4.01	4.03	3.97	3.99	4.01	3.98	3.96
Mass, M (kg)	0.74	0.74	0.75	0.74	0.73	0.75	0.74	0.74	0.73
Area, A (cm <sup>2</sup> )	79.04	77.94	78.57	77.94	78.73	78.89	79.36	77.48	78.89
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	313.0	313.3	315.0	314.1	312.5	314.7	318.2	308.3	312.3
Pressure, P (Mpa)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Density of water, ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Gravity, g (m <sup>2</sup> /s)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Net Flow Rate, Q (m <sup>3</sup> /s) x 10 <sup>-9</sup>	6.37	7.75	8.91	7.36	8.52	9.68	10.4	11.2	9.68
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2364.12	2361.69	2380.41	2355.83	2335.61	2382.80	2325.36	2399.71	2336.83
Coefficients of Permeability, K (m/s) x 10 <sup>-10</sup>	6.34	7.71	8.87	7.33	8.48	9.63	10.4	11.1	9.63
Average Density (kg/ cm <sup>3</sup> )	2368.74			2358.08			2353.97		
Average Coefficients of Permeability, K (m/s) x 10 <sup>-10</sup>	7.64			8.48			10.4		



ภาคผนวก ก  
การคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตปกติ  
ที่ป่มด้วยอุณหภูมิปกติระยะเวลา 28 วัน



ตารางที่ ๑-1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตปกติที่บ่มด้วย  
อุณหภูมิปกติระยะเวลา 28 วัน

Mixed	หินฝุ่นร้อยละ 0		
	เถ้าปาล์มร้อยละ 0		
Specimens	1	2	3
Day	28	28	28
Diameters, D (cm)	10.14	10.10	10.14
Height, H (cm)	4.06	4.09	4.10
Mass, M (kg)	0.79	0.79	0.80
Area, A (cm <sup>2</sup> )	80.79	80.15	80.79
Volumes, V (cm <sup>3</sup> )	327.99	327.82	331.23
Pressure, P (Mpa)	0.5	0.5	0.5
Density of water, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000	1000	1000
Gravity, g (m <sup>2</sup> /s)	9.81	9.81	9.81
Net Flow Rate, Q (m <sup>3</sup> /s) $\times 10^{-11}$	7.52	8.21	8.68
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2408.58	2409.89	2415.27
Coefficients of Permeability, K (m/s) $\times 10^{-12}$	7.48	8.17	8.64
Average Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2411.24		
Average Coefficients of Permeability, K (m/s) $\times 10^{-12}$	8.10		



ภาคผนวก ก

ภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด



ภาพที่ ฎ-1 ภาพแสดงการการชั่งซีเมนต์ ทราย, หิน, หินฝุ่น, กล้วยปาล์มน้ำมัน และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



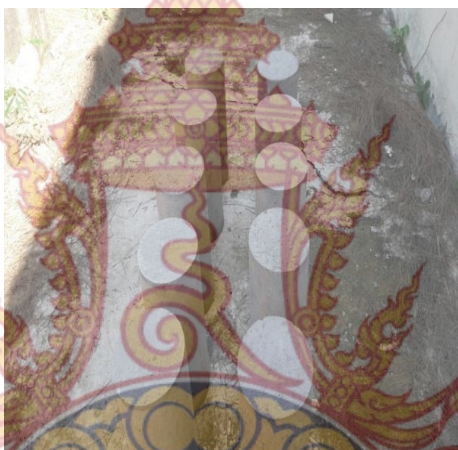
ภาพที่ ฎ-2 ภาพแสดงการเตรียมแบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปก้อนตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15x30 cm.



ภาพที่ ฎ-3 ภาพแสดงการผสมคอนกรีตโดยใช้โมผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



ภาพที่ ฎ-4 ภาพแสดงการนำคอนกรีตสดมาใส่แบบหล่อเพื่อขึ้นรูปก้อนตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15x30 cm.



ภาพที่ ฎ-5 ภาพแสดงก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว



ภาพที่ ฎ-6 ภาพแสดงการบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ ฎ-7 ภาพแสดงการ cap หัวก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ ฎ-8 ภาพแสดงการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ ฎ-9 ภาพแสดงค่าจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาคผนวก ฐ

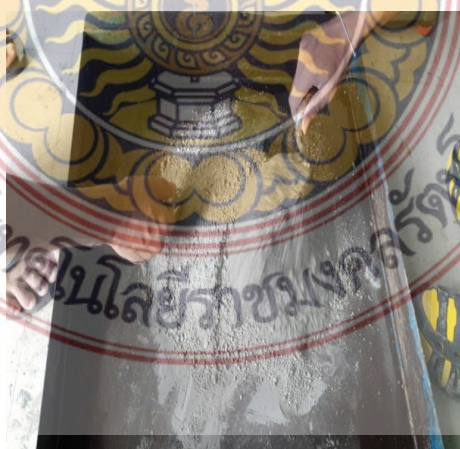
ภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต



ภาพที่ ฐ-1 ภาพแสดงการชั่งซีเมนต์ ทราย, หิน, หินฝุ่น, เถ้าถลายปาร์กมน้ำมัน และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



ภาพที่ ฐ-2 ภาพแสดงการเตรียมแบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปก้อนตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10x4 cm.



ภาพที่ ฐ-3 ภาพแสดงการผสมคอนกรีตโดยใช้ถาดผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด





ภาพที่ ฐ-4 ภาพแสดงการนำคอนกรีตสดมาใส่แบบหล่อเพื่อขึ้นรูปก้อนตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10x4 cm.



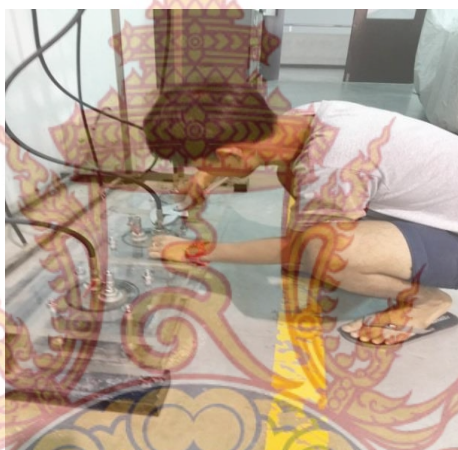
ภาพที่ ฐ-5 ภาพแสดงก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว



ภาพที่ ฐ-6 ภาพแสดงการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ที่ 720 Watt เวลา 120 min.



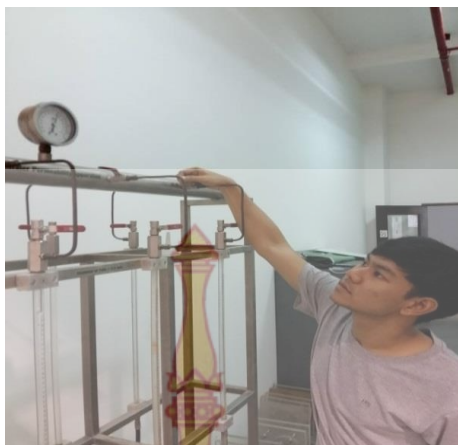
ภาพที่ ฐ-7 ภาพก่อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการหล่ออีพ็อกซีรอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งมีความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ ฐ-8 ภาพแสดงการนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาใส่ในเซลล์หลังจากนั้นทำการขันน็อตทั้ง 4 ด้านให้แน่น ต่อสายทนแรงดันสูงกับเซลล์ ซึ่งจะทำการขันให้แน่น



ภาพที่ ฐ-9 ภาพแสดงการเติมน้ำจนกระทั่งน้ำอยู่ในหลอดวัด (Transparent Tube) ประมาณ 3 ใน 4 ของหลอดวัด แล้วจึงทำการปิดวาล์วตัวที่ 1



ภาพที่ ฐ-10 ภาพแสดงการเปิดวาล์วตัวที่ 3 และ 4 แล้วทำการต่อสายทนแรงดันสูง เข้ากับ ถังออกซิเจนที่มีชุดควบคุมแรงดันอยู่



ภาพที่ ฐ-11 ภาพแสดงการทำการปรับแรงดันโดยดูจากเกจวัดที่ติดอยู่ที่ชุดโครงสร้างทดสอบ โดยทั่วไปจะทำการทดสอบอยู่ที่ 5 bar



ภาพที่ ฐ-12 ภาพแสดงการทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลาแล้วทำการ คำนวณ ตามสูตรที่แสดงไว้