การศึกษาค่าการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน

THE STUDY OF PERMEABILITY OF PERMEABLE CONCRETE

นายจักรพงษ์ ยุพการณ์

นายวทัญญู แก้วเกษมชาญชัย

นายวรวัฒน์ หอมชื่นใจ

โครงงานวิศวกรรมนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาค่าการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน
ปีการศึกษา 2559

โดย

นายจักรพงษ์ ยุพการณ์

นายวทัญญู แก้วเกษมชาญชัย

นายวรวัฒน์ หอมชื่นใจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.อัฐสิทธิ์ ศิริวชิราภรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย สินถาวร

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพบปัญหาน้ำท่วมขังพื้นคอนกรีตเนื่องจากการระบายน้ำไม่ทันเป็นปัญหามักเกิดขึ้นบ่อยและส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้สัญจรไปมา นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรคต่างๆ และยังไม่สะดวกต่อการเดินทางหรือการคมนาคมได้อีกด้วย ปัจจุบันการออกแบบระบบระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วมขังเริ่มเข้ามามีบทบาทในการจัดการปัญหาต่างๆที่จะตามมา ซึ่งคอนกรีตพรุน เป็นคอนกรีตพิเศษที่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

โครงงานวิศวกรรมนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบและศึกษาหาค่าความแปรผันของกำลังรับแรงและค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่มีขนาดของมวลรวมหยาบที่ต่างกันเพื่อความเหมาะสมในการใช้งานด้านต่างๆ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

จากการทดสอบพบว่า อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบนั้นมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดยิ่งปริมาตรของซีเมนต์เพสต์มากจะให้กำลังอัดที่มากขึ้นตามและกำลังรับแรงจะมีค่าแปรผกผันกับค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมหยาบ ในการศึกษานี้อัตราส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเบอร์ 4 และปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.2 ลูกบาศก์เมตร จะมีค่ากำลังรับแรงอัด 90.853 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ 2.383 เซนติเมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: คอนกรีตพรุน ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำ

THE STUDY OF PERMEABILITY OF PERMEABLE CONCRETE

Academic Year 2016

By

Mr. Jakkrapong Yuppakan

Mr. Watanyoo Geawgasemchanchai

Mr. Worawat Homcheunjai

Advisor

Dr. Attasit Sirivachiraporn

Asst. Prof. Dr. Suppachai Sinthaworn

Abstract

Nowadays, there is flooding problem of concrete floor that caused by drainage. It has been the frequent problem that affects to people's daily life, also has been harm to the predestrian. Moreover, the problem causes inconvenient transportation and environment. Currently, the drainage system design for flooding prevention has become a role of managing any effects from the problems. Porous concrete is a special concrete that can solve these problems.

This engineering project aims to study the ratio of cement paste with total aggregate and study to find the variability of compressive strength and water permeability of concrete which have different total aggregate to suitability in use and to solve the above problem.

The results showed that the ratio of cement paste with the total aggregate affects the compressive strength, the increasing of cement paste volume show the higher of compressive strength while the permeability was decreased. In this study, the using of aggregate which passed sieve NO.4 with the volume of cement paste about 0.2 m^3 made the compressive strength 90.85 ksc and coefficient of the water permeability 2.38 cm/s

Keywords: Porous concrete. Compressive strength and Coefficient of the water permeability

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.อัฐสิทธิ์ ศิริวชิราภรณ์ และ ดร.ศุภชัย สินถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางการศึกษา ทั้งทางด้านการหาข้อมูล การทดสอบ การวิเคราะห์ ตลอดจนคำชี้แนะและแนวคิดในการเขียน การจัดทำ การตรวจสอบเพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ทำการทดสอบ ตลอดระยะเวลาในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยสำนึกในคุณค่าของตำราของคณาจารย์และท่านผู้รู้ทุกท่านที่ได้นำมากล่าวอ้างในการเขียนวิจัยฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้กล่าวถึงในครั้งนี้ ผู้วิจัยจะยังคงน้อมรำลึกตลอดไป

คณะผู้จัดทำโครงงาน

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
	1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
	1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1.1 คอนกรีตพรุน	3
	2.1.2 มวลรวม	4
	2.1.3 ปูนซีเมนต์	10
	2.1.4 น้ำ	15
	2.1.5 การทดสอบ Flexural Strength	15
	2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการ	18
	3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	18
	3.1.1 ปูนซีเมนต์	18
	3.1.2 หิน	18
	3.1.3 น้ำประปา	18
	3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	18
	3.2.1 ความถ่วงจำเพาะของหิน	18
	3.2.2 การหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม	19
	3.3 การออกแบบส่วนผสม	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบค่าการยุบตัวและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	26
3.4.1 การทดสอบค่าการยุบตัว	26
3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	26
3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	26
3.4.4 การทดสอบค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ	27
3.4.5 การทดสอบการไหลแผ่	28
บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปลายผล	29
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	29
4.1.1 ความถ่วงจำเพาะหิน	29
4.1.2 การหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม	29
4.1.3 การทดสอบการไหลแผ่	31
4.1.4 การออกแบบส่วนผสม	31
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	35
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพรุน	45
4.4 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน	52
บทที่ 5 สรุปผล	63
5.1 สรุปผลการทดสอบ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	69
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าการยุบตัว	74
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบกำลังรับแรงและการไหลซึมผ่านของน้ำ	78
ประวัติย่อผู้จัดทำโครงงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 น้ำหนักต่ำสุดของมวลรวมหยาบในการทดสอบขนาดคละตาม ASTM D75 7

2.2 ขนาดตะแกรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของมวมรวม 8

2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ 9

3.1 ตัวอย่างการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม 19

3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุน 21

4.1 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 29

4.2 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{8}$ " 30

4.3 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{1}{2}$ " 30

4.4 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{4}$ " 31

4.5 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.30 32

4.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.35 32

4.7 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.40 33

4.8 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.30 33

4.9 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.35 33

4.10 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.40 34

4.11 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.30 34

4.12 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.35 34

4.13 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.40 35

4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของ
คอนกรีตพรุนของปริมาตาเพสต์ 0.10 36

4.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของ
คอนกรีตพรุนของปริมาตาเพสต์ 0.15 36

4.16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของ
คอนกรีตพรุนของปริมาตาเพสต์ 0.20 37

ก-1 ผลการทดสอบหาโมดูลัสความละเอียดของหิน 70

ก-2 ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของหิน 71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-3 ข้อมูลทั่วไปการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวม	71
ก-4 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินเบอร์ #4	71
ก-5 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{8}$"	72
ก-6 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{1}{2}$"	72
ก-7 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{4}$"	73
ข-1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด #4	75
ข-2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{8}$"	75
ข-3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{1}{2}$"	76
ข-4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{4}$"	76
ค-1 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด #4	79
ค-2 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{3}{8}$"	81
ค-3 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{1}{2}$"	83
ค-4 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{3}{4}$"	85
ค-5 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด #4	87
ค-6 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{3}{8}$"	88
ค-7 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{1}{2}$"	90
ค-8 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{3}{4}$"	91

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) 12

2.2 การผลิตปูนซีเมน์แบบแห้ง (Dry Process) 14

2.3 เครื่องมือทดสอบ Flexural Strength 15

3.1 เครื่องมือทดสอบการหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม 19

3.2 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน #4 22

3.3 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{3}{8}$" 23

3.4 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{1}{2}$" 24

3.5 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{3}{4}$" 25

3.6 เครื่องมือทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ 27

4.1 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต 35

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.10 39

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.15 39

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.20 40

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์
ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากลับ 0.30 41

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์
ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากลับ 0.35 42

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์
ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากลับ 0.40 42

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์
ของมวลรวมหยาบขนาด #4 43

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์
ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$" 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$ "	44
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$ "	44
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10	46
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15	46
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20	47
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.30	48
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.35	49
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.40	49
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด #4	50
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$ "	50
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$ "	51
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$ "	51
4.22 เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10	53
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15	53
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20	54
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ประมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10	55
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ประมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15	55
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ประมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20	56
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10	57
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15	57
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20	58
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10	59
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15	59
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20	60
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด #4	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{8}$"	61
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{1}{2}$"	62
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{4}$"	62

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ปัญหาน้ำท่วมขังพื้นคอนกรีตเนื่องจากการระบายน้ำไม่ทันเป็นปัญหามักเกิดขึ้นบ่อยและส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้สัญจรไปมา นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรคต่าง ๆ และยังไม่สะดวกต่อการเดินทางหรือการคมนาคมได้อีกด้วย ปัจจุบันการออกแบบระบบระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วมขังเริ่มเข้ามามีบทบาทในการจัดการปัญหาต่าง ๆ ที่จะตามมา ซึ่งคอนกรีตพรุน เป็นคอนกรีตพิเศษที่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

คอนกรีตพรุน คือ เทคโนโลยีคอนกรีตที่มีรูพรุนต่อเนื่องกันไม่มีมวลละเอียดในส่วนผสม เพื่อต้องการให้เกิดโพรงที่ต่อเนื่องอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งน้ำหรือของเหลวซึมผ่านได้ ซึ่งยังคงมีความสามารถในการยึดเกาะกันของมวลรวมในคอนกรีตในทุก ๆ ผิวสัมผัส โดยสามารถที่จะออกแบบคุณสมบัติได้อย่างหลากหลายแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ทั้งในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ และความสามารถด้านอื่น ๆ คอนกรีตพรุน ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาในประเทศอังกฤษและอเมริกาเป็นเวลามากว่า 30 ปี เพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม กล่าวคือได้นำ คอนกรีตพรุน มาใช้สำหรับงานปูผิวถนน ใช้ในการดาดคลองและพื้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่น ๆ

จากที่ทราบแล้วว่าคอนกรีตที่มีความพรุนมากจะแลกมาซึ่งกำลังรับแรงที่น้อยลง งานวิจัยนี้จึงเป็นความต้องการคิดค้นและพัฒนาส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตมีความพรุนและกำลังรับแรงที่เหมาะสมในการใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบ และศึกษาหาค่าความแปรผันของกำลังรับแรงและค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่มีขนาดของมวลรวมหยาบที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.3.1.1 ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.80-2517

1.3.1.2 หินขนาดต่าง ๆ แยกขนาดตามตะแกรงมาตรฐาน ISO #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$"และ $\frac{3}{4}$"

1.3.1.3 น้ำใช้ผสมคอนกรีต เป็นน้ำประปา

1.3.2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสม (Water Binder Ratio) 3 ค่า คือ 0.30 0.35 และ 0.40

1.3.3 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยวิธี Slump Test ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143

1.3.4 ทดสอบกำลังรับแรงดัดโดยวิธี Flexural Strength ของคอนกรีตอายุ 7 วัน ทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C78

1.3.5 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C39

1.3.6 ทดสอบค่าการไหลซึมผ่านของน้ำตามมาตรฐาน ASTM D2434

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใช้ขนาดของมวลรวมหยาบที่ต่างกันจะทำให้กำลังรับแรงและค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตมีค่าความแปรผันต่อกันอย่างไร

1.4.2 สามารถที่จะเลือกใช้อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับมวลมวลหยาบได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน เป็นคอนกรีตที่ออกแบบมาให้มีช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ซึ่งได้จากการผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ สารผสมเพิ่ม มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดหรือทรายในปริมาณที่น้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย จึงทำให้คอนกรีตพรุนมีโพรงหรือช่องว่างขนาด 2-8 มิลลิเมตรที่ต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกันในเนื้อคอนกรีตพรุน และยอมให้น้ำหรือของเหลวสามารถไหลซึมผ่านไปได้ โดยทั่วไปคอนกรีตพรุนมีค่ากำลังอัดประมาณ 28-280 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่าความพรุนหรืออัตราส่วนโพรงร้อยละ 15-35 และมีความซึมผ่านน้ำประมาณ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที (ACI 522R-10, 2010) คอนกรีตพรุนมักถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เช่น งานด้านพื้นผิวถนน ช่วยลดหรือชะลอการไหลนองของน้ำฝนได้ ลดปัญหาการท่วมขังของน้ำ จึงทำให้ปัญหาของการเกิดตะไคร่น้ำลดลง และลดการลื่นไถลของพื้นผิวทางเดินในขณะที่ฝนตกได้อีกด้วย

มวลรวมหยาบที่ใช้ในงานคอนกรีตพรุนควรเป็นมวลรวมหยาบที่มีขนาดเดียว (Single-Size) อาจจะเป็นมวลรวมแบบก้อนกลมหรือมวลรวมที่ได้จากการบดก็สามารถใช้ได้เช่นกัน มวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตพรุนควรเป็นมวลรวมที่มีความแข็งแรงและสะอาดปราศจากการดูดซับหรือปนเปื้อนสารเคมี ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวของเพสต์และมวลรวมได้ ความชื้นของมวลรวมหยาบก็มีความสำคัญต่อสมบัติของคอนกรีตพรุนเช่นกัน เนื่องจากมวลรวมแห้งเกินไปจะดูดซับน้ำในส่วนผสม ทำให้คอนกรีตพรุนมีความสามารถการทำงานลดลงได้ ทำให้คอนกรีตพรุนมีการบดอัดที่ไม่ดี ถ้ามวลรวมที่ใช้เปียกเกินไป จะทำให้เพสต์เหลวมากขึ้นและเกินการไหลของเพสต์ไปอุดตันโพรงหรือช่องว่าง

มวลรวมละเอียดไม่ค่อยนำมาใช้ในงานคอนกรีตพรุน เนื่องจากมวลละเอียดจะทำให้ช่องว่างหรือความพรุนมีปริมาณลดลงได้ แต่การใส่มวลรวมละเอียดจะทำให้คอนกรีตพรุนมีกำลังแรงอัดและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น แต่การซึมผ่านน้ำจะมีค่าลดลง

วัสดุประสาน (Cementitious Materials) หลักที่ใช้ในงานคอนกรีตพรุนคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งควรมีสมบัติตามมาตรฐาน (มอก.80-2517) นอกจากนี้อาจมีวัสดุประสานเสริมซึ่งมีสมบัติเป็นปอซโซลาน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้ เช่น เถ้าลอยและซิลิกาฟูม เป็นต้น

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตพรุนมีสมบัติเหมือนคอนกรีตทั่วไป อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 0.26-0.40 โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีความสำคัญต่อค่าการไหลของเพสต์ ซึ่งหากเพสต์เหลวเกินไปจะทำให้เกิดการไหลลงไปอุดตันด้านล่าง และหาเพสต์มีค่าการไหลต่ำอาจทำให้มี

ความสามารถในการทำงานต่ำและเพสต์จะห่อหุ้มมวลรวมได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามการใส่สารลดน้ำอาจช่วยลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลงได้

2.1.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตอาจเกินขึ้นจากการผลิตขึ้นหรือเกินขึ้นเองตามธรรมชาติ มวลรวมตามธรรมชาติเป็นที่นิยมเนื่องจากราคาที่ถูกกว่า หาง่ายกว่า โดยมากจะเน้นวัสดุที่มีในพื้นที่ถึงรายละเอียดลงไปถึงประเภทของหินที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตแต่ละประเภท แต่จะระบุกว้าง ๆ ว่าใช้กับงานคอนกรีตได้ บางประเภทไม่เหมาะสมเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพ บางตัวไม่เหมาะสมเนื่องจากสมบัติทางเคมี มวลรวมแบ่งตามขนาดเป็น มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หิน หรือกรวดที่มีขนาดตั่งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือค้าง ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือต้องค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

สมบัติของมวลรวมที่ไม่ได้มีมาจากหินต้นกำเนิดได้แก่ รูปร่าง ลักษณะเนื้อ และปริมาณความชื้น ซึ่งสมบัติเหลือนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของคอนกรีตในการออกแบบส่วนผสมให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการ ดังนี้

(1) รูปร่างและลักษณะผิว รูปร่างของมวลรวมแบ่งตามความคมของเหลี่ยมของมวลรวมได้เป็น 5 ชนิดคือ

1.1) มนมาก (Well Rounded) ไม่มีผิวเคลือบเดิมเหลืออยู่

1.2) มน (Rounded) ผิวเดิมถูกลบเกือบหมด

1.3) เกือบมน (Sub-Rounded) มีการสึกกร่อนพอสมควรและผิวเดิมลดลง

1.4) เกือบเหลี่ยม (Angular) ไม่มีการสึกกร่อน

มวลรวมมนมากที่สมบูรณ์ที่สุดได้แก่มวลรวมก้อนกลม (Spherical Aggregate) และมวลรวมเหลี่ยมที่สมบูรณ์ที่สุดได้แก่มวลรวมก้อนลูกบาศก์ (Cubical Aggregate) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งมวลรวมได้อีกตามลักษณะของรูปร่างได้แก่ มวลรวมก้อนเบี้ยว (Irregular Aggregate) มวลรวมก้อนแบน (Flaky Aggregate) และมวลรวมก้อนยาว (Elongated Aggregate)

มวลรวมก้อนกลมและผิวเรียบต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น ๆ และมีการขัดกันระหว่างมวลรวมต่ำจึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานดีซึ่งได้แก่กรวดและทรายตามธรรมชาติเพราะมีลักษณะกลม ส่วนหินย่อยที่เกิดจากการย่อยนั้นมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและส่วนมากมีผิวหยาบ ทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและต้องการซีเมนต์เพสต์มาเคลือบผิวมาก และความเหลี่ยมยังทำให้เกิดการขัดกันระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตที่ได้มีความสามารถทำงานได้ต่ำ

(2) ความชื้นและการดูดน้ำ ในเนื้อของมวลรวมมีช่องว่างเล็ก ๆ ที่น้ำสามารถไหลเข้าออกได้และยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมได้ด้วย ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดน้ำได้ การเก็บมวลรวมที่

สถานที่ต่างกันไปจะทำให้ปริมาณน้ำต่างกัน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตกล่าวคือ มวลรวมในสภาพแห้งสามารถดูดน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเข้าไปในมวลรวมบางส่วน ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมน้อยกว่าที่ต้องการ ในทางกลับกันถ้าในมวลรวมมีน้ำมากเกินไปคืออยู่ในสภาพเปียกชื้น น้ำส่วนเกินจะทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าที่ต้องการ สภาพความชื้นของมวลรวมแบ่งได้เป็น 4 แบบ

2.1) แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) เป็นการขจัดความชื้นจากมวลรวมจนหมดด้วยความร้อนจากเตาอบ

2.2) แห้งในอากาศ (Air Dry) มวลรวมมีผิวแห้ง แต่เนื้อภายในที่ลึกจากผิวมีน้ำอยู่บ้าง

2.3) อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ผิวของมวลรวมแห้งแต่ภายใต้ผิวอยู่ในสภาพอิ่มตัวมีน้ำอยู่เต็ม

2.4) ผิวเปียก (Wet) มีน้ำคลุมผิวโดยรอบ และภายใต้ผิวมีน้ำอยู่เต็ม

ในการผสมคอนกรีตโดยใช้มวลรวมแห้ง มวลรวมแห้งจะดูดน้ำทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง และภายหลัง 15 นาทีแล้วความสามารถทำงานได้จะลดลงอีกไม่มากนัก เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เคลือบผิวมวลรวมทำให้การดูดน้ำเป็นไปได้ยาก ในเวลาที่คอนกรีตก่อตัวโดยปกติแล้วจะสมมติว่ามวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้จึงต้องปรับปริมาณน้ำของมวลรวมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งมวลรวมที่แห้งในอากาศสามารถดูดน้ำได้ไม่เกินร้อยละ 1 การคำนวณปริมาณที่ต้องการปรับในการผสมคอนกรีตสามารถวัดและคำนวณตามมาตรฐาน (ASTM C127-07, 2007) สำหรับสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมหยาบทำได้โดยการแช่มวลรวมหยาบในน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่มวลรวมจนเต็มที่ จากนั้นนำมวลรวมออกจากน้ำแล้วเช็ดให้แห้ง โดยการกลิ้งไปมาบนผ้าแห้งจนน้ำหมด โดยสังเกตว่าผิวของมวลรวมจะด้านขึ้นไม่สะท้อนแสง

(3) ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) โดยทั่วไปหมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักน้ำที่ปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น แต่เนื่องจากมวลรวมมีโพรงที่น้ำซึมผ่านได้และที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นทำให้ปริมาตรของมวลรวมมีหลายความหมายและความถ่วงจำเพาะจึงมีหลายค่าเช่นกัน ซึ่งมี 3 ค่าดั้งนี้

3.1) ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (Absolute Specific Gravity)

3.2) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

3.3) ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity)

โดยปกติแล้วงานคอนกรีตไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ เพราะความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ต้องบดมวลรวมให้ละเอียดเพื่อกำจัดโพรง แต่ถ้ารวมปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ในการคำนวณจะได้ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ และถ้าคิดปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงทั้งหมดจะได้ความถ่วงจำเพาะรวม

ความถ่วงจำเพาะรวมที่ใช้กันมีอยู่ 2 ค่า คือ เมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอบแห้งและเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ในการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตจะใช้น้ำหนักของมลรวมที่อิ่มตัวผิวแห้ง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะเมื่อมวลรวมอิ่มตัวผิวแห้งจึงเป็นที่นิยมกว่า การทกสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C127-07, 2007) สามารถคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะต่างๆได้ดังนี้

ความถ่วงจำเพาะรวมที่อบแห้ง =A/ (B-C)

ความถ่วงจำเพาะรวมที่อิ่มตัวแต่ผิวแห้ง =B/ (B-C)

ความถ่วงจำเพาะปรากฏ =A/ (A-C)

เมื่อ

A = น้ำหนักของมวลรวมแห้งชั่งในอากาศ

B = น้ำหนักของมวลรวมอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ

C = น้ำหนักของมวลรวมอิ่มตัวชั่งในน้ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีค่าระหว่าง 2.6 ถึง 2.7 มวลรวมที่ค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่านี้จะเป็นหินที่มีเนื้อแน่นได้แก่ หินบะซอลต์ หินแกรนิต และไอไรต์ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 ถึง 2.9

(4) หน่วยน้ำหนัก หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของมวลรวมคือน้ำหนักของมวลรวมที่บรรจุเต็มภาชนะหนึ่งหน่วยปริมาตร และเราใช้หน่วยน้ำหนักสำหรับเปลี่ยนน้ำหนักมวลรวมเป็นปริมาตรในการ คำนวณสัดส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต หน่วยน้ำหนักขึ้นอยู่กับการกระจายขนาด รูปร่างของมวลรวมและสภาพการอัดแน่น ในการทดสอบหน่วยน้ำหนักต้องระบุวิธีการบรรจุว่าอยู่ในสภาพหลวมหรือกระทุ้งแน่น โดยทั่วไปแล้วในคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมปกติมีค่าระหว่าง 1,450-1,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C29/C29M-97a, 2001) หน่วยน้ำหนักในสภาพหลวมมีค่าระหว่าง 0.87-0.96 ของหน่วยน้ำหนักในสภาพกระทุ้งแน่น มวลรวมที่มีขนาดเดียวจะมีช่องว่างมาก และมวลรวมที่มีขนาดคละดีจะมีช่องว่างน้อย การผสมมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกันจะทำให้ช่องว่างลดลงและมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น ช่องว่างต่ำสุดและหน่วยน้ำหนักสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลรวมละเอียดประมาณร้อยละ 35-40 ของมวลรวมคละทั้งหมด

(5) กำลังและความแข็ง มวลรวมส่วนมากมีกำลังและความแข็งสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มากจึงไม่ค่อยมีผลต่อกำลังของคอนกรีตมาก แต่จะมีผลต่อความมีเสถียรภาพของปริมาตรคอนกรีตมากกว่า ซึ่งได้แก่ การเสียรูปภายใต้แรงกระทำ การคืบ และการหดตัวแห้ง หินส่วนใหญ่สามารถรับแรงอัดระหว่าง 100-300

เมกะปาสคาล และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินส่วนมากมีค่าระหว่าง $50x10^3$-$80x10^3$ เมกะปาสคาล

(6) ขนาดคละของมวลรวม

ก.) การเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างมวลรวมควรจะเก็บมาจากหลายๆ ส่วนอย่างน้อยสุดไม่ควรต่ำกว่า 10 ที่ และมีน้ำหนักรวมกันไม่น้อยกว่าที่ระบุในตารางที่ 2.1 ตามมาตรฐาน (ASTM D75-95, 2001) เมื่อได้ตัวอย่างมาแล้วนำมาแบ่งให้เหลือปริมาณที่พอเหมาะกับการทดลอง การแบ่งตัวอย่างมวลรวมทำได้ 2 แบบคือ วิธีแบ่งสี่ส่วนและวิธีใช้เครื่องแบ่ง

การแบ่งสี่ส่วนเป็นวิธีลดตัวอย่างมวลรวมให้เหลือกึ่งหนึ่ง โดยสามารถทำได้ตามมาตรฐาน (ASTM C702-98, 2001) ส่วนการแบ่งครึ่งตัวอย่างสามารถทำได้โดยใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง ซึ่งวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบสามารถทำตามมาตรฐาน (ASTM C702-98, 2001) การทดสอบจะทำกับมวลรวมแห้ง ใส่มวลรวมในถาดให้สม่ำเสมอแล้วจึงเทลงในเครื่องแบ่งตัวอย่าง เครื่องจะแบ่งครึ่งมวลรวมออกสองข้างของเครื่องแบ่งตัวอย่าง

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักต่ำสุดของมวลรวมหยาบในการทดสอบขนาดคละตาม ASTM D75

ขนาดโตสุดของมวลรวม (นิ้ว)	ปริมาณต่ำสุดของตัวอย่าง (กิโลกรัม)
$^{3}/_{8}$ และต่ำกว่า	10
$^{3}/_{4}$	25
$1^{1}/_{2}$	75
3	150

ที่มา: วันชัย, 2556

ข.) การวิเคราะห์ขนาดคละ ในทางปฏิบัติได้แบ่งมวลรวมออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตาราง 2.2 แสดงให้เห็นขนาดตะแกรงมาตรฐานอเมริกานิยมสำหรับมวลรวมหยาบตามขนาดของช่องเปิด เช่น ขนาด $\frac{3}{8}$ $\frac{3}{4}$ $1\frac{1}{2}$ และ 3 นิ้ว เป็นต้น และสำหรับมวลรวมละเอียดตามจำนวนช่องต่อความยาวหนึ่งนิ้ว เช่น เบอร์ 4 8 16 30 50 100 และ 200 เป็นต้น การวิเคราะห์ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างมวลรวมมาปริมาณหนึ่งแล้วทำการแยกขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานที่วางเรียงซ้อนกันตามขนาดใหญ่สุดอยู่ด้านบนและขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง รายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมมีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C 136-06, 2006) ผลการวิเคราะห์ขนาดคละโดยมากแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักค้างสะสม (Cumulative Percentage Passing) ดังตารางในตาราง 2.3

ตารางที่ 2.2 ขนาดตะแกรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวม

มาตรฐานอังกฤษ			มาตรฐานอเมริกา		
มิลลิเมตร	นิ้ว	ตะแกรง	ตะแกรง	นิ้ว	มิลลิเมตร
75.00	3	3 นิ้ว	3 นิ้ว	3	75.00
37.50	1.5000	1		1.5000	37.50
20.00	0.7860			0.7500	19.00
10.00	0.3930			0.3750	9.50
5.00	0.1960		เบอร์ 4	0.1870	4.75
2.36	0.0937	เบอร์ 7	เบอร์ 8	0.0937	2.36
1.18	0.0469	เบอร์ 14	เบอร์ 16	0.0469	1.18
600 µm	0.0234	เบอร์ 25	เบอร์ 30	0.0234	600 µm
300 µm	0.0117	เบอร์ 52	เบอร์ 50	0.0117	300 µm
150 µm	0.0059	เบอร์ 100	เบอร์ 100	0.0059	150 µm
75 µm	0.0029	เบอร์ 200	เบอร์ 200	0.0029	75 µm

ที่มา: วันชัย, 2556

ค.) โมดูลัสความละเอียด

โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงขนาดโดยประมาณของมวลรวม มวลรวมที่ละเอียดจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำส่วนมวลรวมที่มีความหยาบจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดสูง โมดูลัสความละเอียดหาได้จากผลรวมของค่าร้อยละค้างสะสมบนตะแกรงมาตรฐานหารด้วย 100 ตะแกรงมาตรฐานประกอบด้วยตะแกรงเบอร์ 100 50 30 16 8 4 และตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ $\frac{3}{4}$ $1\frac{1}{2}$ 3 นิ้ว และขนาดใหญ่กว่าโดยมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นสองเท่าของขนาดก่อนหน้า ตามมาตรฐาน (ASTM C33/C33M-11, 2011) กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด ควรอยู่ระหว่าง 2.3 ถึง 3.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าโมดูความละเอียดของมวลรวมหยาบดังแสดงบนตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักค้าง(กรัม)	ร้อยละค้าง	ร้อยละค้างสะสม	ร้อยละผ่านสะสม
3 นิ้ว	0	0	0	100
11/2 นิ้ว	400	4	4	96
¾ นิ้ว	3,900	39	43	57
3/8 นิ้ว	3,500	35	78	22
เบอร์ 4	2,200	22	100	0
8	0	0	100	0
16	0	0	100	0
30	0	0	100	0
50	0	0	100	0
100	0	0	100	0
น้ำหนักมวลรวมหยาบ 10,000 กรัม			รวม = 725	
โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 725/100 = 7.25				

ที่มา: วันชัย, 2556

(7) ความคงทนของมวลรวม

ความคงทนของมวลรวมมีความสำคัญต่อสมบัติของคอนกรีตมากเพราะมวลรวมเป็นส่วนประกอบที่ใหญ่ที่สุดในคอนกรีต ความคงทนแบ่งออกได้เป็นความคงทนทางกายภาพและทางเคมี และมีรายละเอียดต่อไปนี้

7.1) ความคงทนทางกายภาพ

ก.) การคงตัว การไม่คงตัวของมวลรวมสามารถทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดจากการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันภายในมวลรวม ส่วนใหญ่เกิดที่คอนกรีตที่ทำเป็นห้องเย็น การทดลองความคงตัวของมวลรวมสามารถทำได้โดยวิธีการแช่ตัวอย่างลงในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อิ่มตัว

ข.) ความคงทนต่อการขัดสี การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีมีอยู่หลายวิธี ส่วนมากเป็นการขัดสีมวลรวมด้วยวัตถุอื่น วิธีที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่งคือ การทดสอบความคงทนต่อการสึกกร่อนด้วยเครื่องลอสแองเจอลิส (Los Angeles Abrasion Machine) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทั้งการตกกระทบและการขัดสี วิธีนี้จัดเป็นการวัดความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยทางอ้อมแต่สามารถให้ข้อมูลเพื่อการตัดสินใจได้ดี วิธีทดสอบมวลรวมหยาบขนาดเล็ก (เล็กกว่า $1\frac{1}{2}$ นิ้ว) มีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C131-96, 2001) และมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า $\frac{3}{4}$ นิ้ว) มีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C535-96, 2001)

7.2) ความคงทนทางเคมี

ก.) ปฏิกิริยาอัคคาไลกับซิลิกา ปฏิกิริยาระหว่างอัลคาลไลในปูนซีเมนต์กับซิลิกาในมวลรวมเป็นสาเหตุทีทำให้เกิดการแตกร้าวอย่างมากในคอนกรีตและนำไปสู่การวิบัติ ซิลิกาในมวลรวมที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้อัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali-Silica gel) ซึ่งสามารถดูดน้ำและขยายตัวได้มาก ถ้ามีมากจะทำให้ซีเมนต์เพสต์โดยรอบมวลรวมเกิดการแตกร้าว การควบคุมปฏิกิริยานี้ทำได้โดยการลดความเข้มข้นของอัลคาไลในส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้ปูนที่มีอัลคาไลต่ำกว่าร้อยละ 0.6 ของ Na_2O เทียบเท่า (โดยคิดจาก $Na_2O + 0.658\ K_2O$) นอกจากนี้ยังสามารถผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าหินในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อช่วยลดปฏิกิริยานี้ได้

ข.) ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali-Cabonate Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับคาร์บอเนต ในมวลรวมที่เป็นหินปูนบางชนิด เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการขยายตัวและทำให้คอนกรีตเกิดการเสียหายได้ ยังไม่สามรถบอกปฏิกิริยาที่แน่ชัดได้ แต่การควบคุมทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ และควรต่ำกว่าร้อยละ 0.4 ของ Na_2O เทียบเท่า

2.1.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ มีชื่อเต็มว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา ใช้เป็นส่วนสำคัญในการทำคอนกรีต เพราะมันจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานที่ช่วยยึดหิน ทราย และเหล็ก ให้ติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าไม่มีปูนซีเมนต์ยึดประสานไว้ หิน ทราย และ เหล็ก ก็อาจแตกแยกหลุดออกจากกันได้ง่าย ไม่สามารถคงรูปร่างของสิ่งก่อสร้างดังที่ต้องการ โดยคุณสมบัติพิเศษของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ การก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ ดังนั้น เมื่อผสมหิน ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำ คลุกเคล้าให้เข้ากันดี แล้วเทลงในแบบที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วแกะแบบออก ก็จะได้คอนกรีตที่มีรูปร่างเหมือนแบบ

(1) กำเนิดปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์มีการค้นพบว่ามีการใช้งานในสมัยมาซิโดเนียและโรมัน และได้หายไปจนกระทั่งในยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมได้มีการคิดค้นขึ้นมาจากหลายคน จนกระทั่งผลงานของแอสป์ดินได้มีการจดสิทธิบัตรของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากการค้นคว้า ของ โยเซฟ แอสป์ดิน ชาวอังกฤษ ช่วงเวลากว่า 13 ปี พ.ศ. 2354 ถึง พ.ศ. 2367 โดยทดลองเอาหินปูนผสมกับดินเหนียวแล้วไปเผาก่อนนำมาบด เมื่อจะใช้งานก็นำมาผสมทราย กรวดและน้ำ โดยเขาตั้งชื่อว่า ปอตแลนด์ซีเมนต์ เพราะว่าสีเหมือนกับหินที่เกาะปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ

(2) วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1) วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Line Component) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate. $CaCo_3$) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85 – 95 % ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) และดินขาว (Marl)

2) วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดำ (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) และดินดาน (Shale)

3) วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัวซึ่งมีไม่เพียงพอในดินดำ หรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ ทราย (ในกรณีที่ต้องการซิลิคอนไดออกไซด์) แร่เหล็กหรือดินลูกรัง (ในกรณีที่ต้องการเฟอร์ริกออกไซด์) และดินอะลูมินา (ในกรณีที่ต้องการอะลูมินัมออกไซด์) เป็นต้น

(3) กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเปียก (Wet Process) และแบบแห้ง (Dry Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการผลิตแต่ละแบบดังนี้

1) การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) สามารถแยกเป็นขั้นตอนเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่ง นั่นคือ ดินขาว (Marl) และดินเหนียว (Clay) ซึ่งหาได้จากแหล่งดินตามธรรมชาติมายังที่ผลิต

ขั้นตอนที่ 2 นำดินทั้งสองชนิดมาผสมกันน้ำในบ่อตีดิน (Wash Mill) แล้วกวนให้เข้ากัน

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากที่กวนเข้ากันแล้ว ก็ส่งไปบดให้ละเอียดในหม้อบดดิน (Slurry Mill) จนได้น้ำดิน (Slurry)

ขั้นตอนที่ 4 ส่งไปกรองเอาเศษหินและส่วนที่ไม่ละลายน้ำออก เหลือแต่น้ำดินที่ละลายเข้ากันดี ซึ่งจะผ่านเครื่องกรองสองเครื่องคือ เครื่องกรองหยาบ และเครื่องกรองละเอียด

ขั้นตอนที่ 5 สูบน้ำดินไปเก็บพักไว้ในยุ้งเก็บ (Silo) เพื่อตรวจสอบคุณภาพและปรับแต่งส่วนผสมให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 6 น้ำดินที่มีส่วนผสมที่ถูกต้องแล้ว จะถูกสูบไปรวมกันที่บ่อกวนดิน (Slurry Basin) เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอ และกวนให้ส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งหนึ่ง

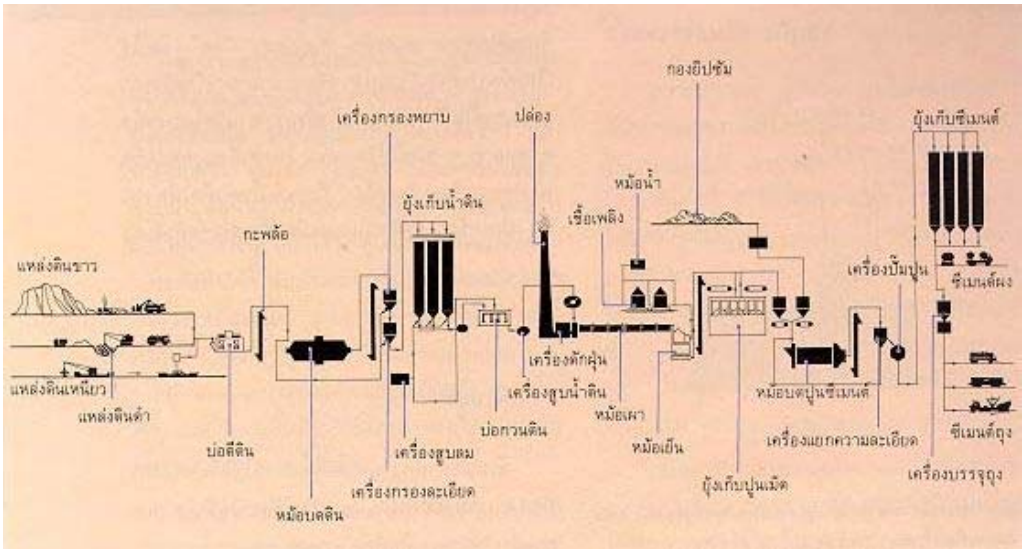
ขั้นตอนที่ 7 สูบน้ำดินจากบ่อกวนดินเข้าสู่เครื่องป้อนน้ำดิบ เพื่อป้อนน้ำดิบเข้าไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ความร้อนในหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่บรรยากาศ เหลือแต่เม็ดดินซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

ขั้นตอนที่ 8 ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกลำเลียงไปตามโซ่ลำเลียงปูนเม็ด เพื่อนำไปเก็บในยุ้งเก็บปูนเม็ดรอกระบวนการต่อไป

ขั้นตอนที่ 9 เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement

Mill) ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 10 จากนั้นปูนซีเมนต์จะผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.1 การผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process)

ที่มา: สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 2 เรื่องที่ 5 อุตสากรรม หัวข้อ ซีเมนต์และคอนกรีต

2) การผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process)

ขั้นตอนที่ 1 นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่งนั่นคือ หินปูน (Limestone) และ ดินดาน (Shale) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูนมายังที่ทำการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 นำดินทั้งสองชนิดมาลดขนาดลงเพื่อให้เหมาะกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป โดยการนำมาผ่านเครื่องย่อย (Crusher) ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard)นอกจากนี้วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่าน เครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 3 ลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิน (Raw Mill) ซึ่งในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) นี้จะบดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดรวมกันซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) โดยการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผาด้วย

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ววัตถุดิบสำเร็จจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องแยกวัตถุดิบผสมแล้ว (Cyclone) ไปยังยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal Homogenizing Silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน

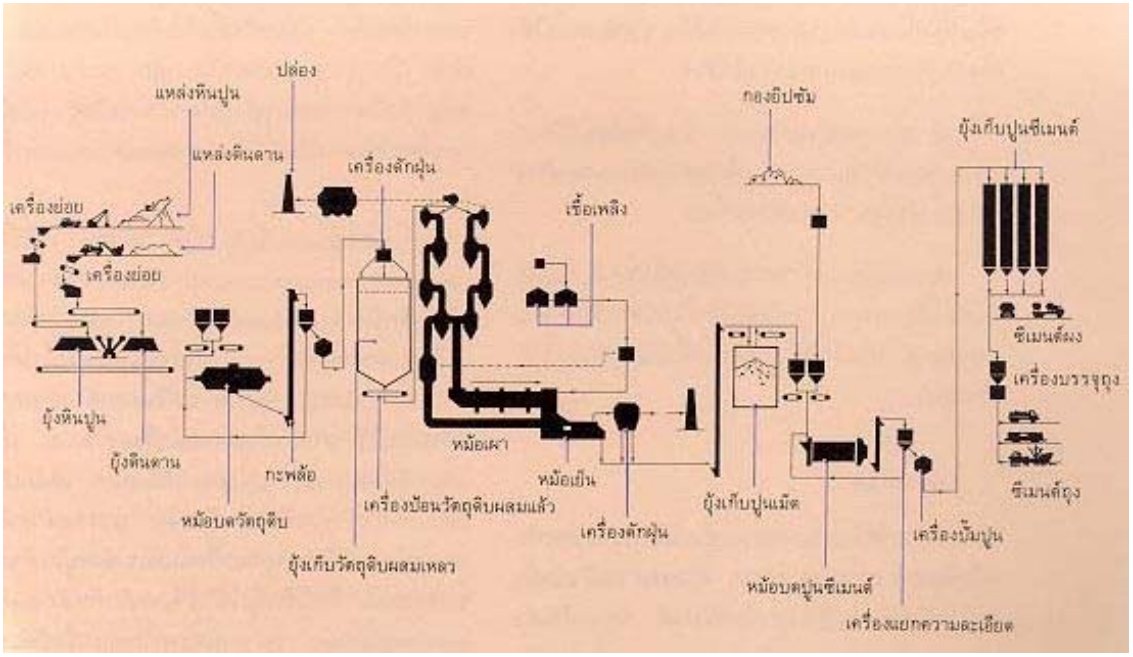
ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นกระบวนการเผา โดยวัตถุดิบสำเร็จจะถูกส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)โดยกระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงโดยการนำปูนเม็ด (Clinker) ไปผ่านหม้อเย็น (Clinker cooler)

ขั้นตอนที่ 7 ลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ยุ้งเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill) ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 9 จากนั้นปูนซีเมนต์จะผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.2 การผลิตปูนซีเมน์แบบแห้ง (Dry Process)

ที่มา: สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 2 เรื่องที่ 5 อุตสากรรม หัวข้อ ซีเมนต์และคอนกรีต

(4) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แบ่งเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีข้อเสียคือ ไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องสัมผัสกับด่างจากดินหรือน้ำ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเคมี

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เมื่อผสมกับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่าประเภทธรรมดา และ มีความต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้บ้าง เหมาะสำหรับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ อาทิเช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดินในบริเวณที่ถูกน้ำเค็มเป็นครั้งคราว

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้มีความละเอียดมากกว่า เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรง ได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง จึงนิยมนำไปใช้กับงานเร่งด่วนที่ต้องแข่งกับเวลา หรือในกรณี ที่ต้องการถอดหรือรื้อแบบเร็วกว่าปกติ

ประเภทที่ 4 เหมาะกับงานที่ต้องการควบคุมทั้งปริมาณ และอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงนิยมใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งถ้ามีความร้อนอย่างร้ายแรงต่อตัวเขื่อน เนื่องจากจะทำให้เกิดการแตกหรือร้าวได้

ประเภทที่ 5 มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้สูง จึงเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่ต้องสัมผัสกับด่าง เช่น ในบริเวณที่ดินมีความเป็นด่างสูง หรือน้ำทะเล ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะช้ากว่าประเภทอื่น ๆ

2.1.4 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องมีความสะอาดปราศจากสิ่งเจือปน ที่จะทำอันตรายต่อคอนกรีต ปริมาณน้ำที่ใช้ควรเป็นปริมาณที่เพียงพอในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ โดยเผื่อน้ำไว้สำหรับการระเหยเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

2.1.5 การทดสอบ Flexural Strength

การทดสอบ Flexural Strength เป็นการทดสอบหากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต กดกระทำในลักษณะของแรงดึงภายใต้การรับน้ำหนักคานดัด โดยสามารถทดสอบได้สองแบบคือ แบบใช้แรงกดคานที่จุดกึ่งกลางคานจุดเดียว(Center Point Loading) และแบบกดคานที่จุดสองจุด โดยตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็นสามส่วนเท่าๆกัน (Third Point Loading) การทดสอบทั้งสอบแบบจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่างกันเล็กน้อยโดยแบบใช้แรงกดคานที่จุดกึ่งกลางคานจุดเดียวจะได้ค่าสูงกว่า โดยในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแบบกดคานที่จุดสองจุด (Third Point Loading) ซึ่งเป็นการทดสอบที่ได้ค่าน้อยกว่าเป็นตัวควบคุมโดยใช้เครื่องกดทดสอบ ดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 เครื่องมือทดสอบ Flexural Strength

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ludirdja et al. (1989) ได้ศึกษาวิธีการและเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต โดยศึกษาผลของน้ำหนักกระทำ สภาพการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูม การหาการซึมผ่านน้ำจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าผลของน้ำหนักกระทำ การซึมผ่านน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากตัวอย่างรับน้ำหนักร้อยละ 75 ของกำลังประลัย ผลจากการบ่ม ในคอนกรีตธรรมดาอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มค่าการซึมผ่านน้ำ คัวอย่างขณะบ่มที่ถูกทำให้แห้งก่อนเวลาที่เหมาะสมจะเพิ่มค่าการซึมผ่านน้ำเนื่องจากเกิดการหดตัวเมื่อแห้ง และค่าความดันไดน้ำขณะบ่มที่ต่ำจะเพิ่มค่าการซึมผ่านน้ำเพียงเล็กน้อย และผลของการผสมซิลิกาฟูม การผสซิลิกาผูมจะลดค่าการซึมผ่านน้ำได้

Ranthia Mindess (1989) ได้ศึกษาหาค่าการซึมผ่านน้ำของซีเมนต์เพสต์ โดยการศึกษาใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 โดยจะมีการเปรียบเทียบการผสมซิลิกาฟูม การให้ความดันน้ำเป็นลักษณะแรงอัดสามแกน การหาการซึมผ่านน้ำจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากสมการของดาร์ซี่ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าค่าการซึมผ่านน้ำจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หรือระยะเวลาการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10-15 สามารถลดค่าการซึมผ่านน้ำได้

El-Dieb Hooton (1994) ได้ศึกษาและสร้างเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) ซึงมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำมาก (น้อยกว่า 10^{-15} m/s) ซึ่งให้ความดันเป็นลักษณะสามแกน

Soongswang et al. (1988) ได้ศึกษาวิธีการและเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ประเภทที่ 2 3 และ 4 ที่มีในรัฐฟลอริดาและมีการผสมสารลดน้ำพิเศษ เป็นสารผสมเพิ่ม สำหรับสภาพการบ่มมี 4 สภาพคือ สภาพแรก บ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 160 องศาฟาเรนไฮต์ 16 ชั่วโมง สภาพที่สอง บ่ม 28 วันในห้องบ่ม สภาพที่สาม บ่ม 3 วันในห้องบ่ม และบ่มในอากาศ 25 วัน และสภาพที่สี่ บ่ม 1 วันในแบบหล่อ และบ่มโดยใช้น้ำยาบ่ม 27 วัน การหาการซึมผ่านน้ำจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมากที่สุดคืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลงจะให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดลงด้วย และการบ่ม 28 วันในห้องบ่มจะให้ค่าการซึมผ่านน้ำต่ำที่สุด

วันชัย สะตะ (2011) ได้ศึกษาการนำเศษวัสดุมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพรุน โดยทำการศึกษาสมบัติของคอนกรีตพรุนที่ใช้เศษวัสดุจากเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญเป็นมวลรวมหยาบเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติจากหินปูนย่อย แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุแทนที่มวลธรรมชาติในอัตราร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ในการทำคอนกรีตพรุน ส่วนที่สองศึกษาสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุ

แทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 15 และ 20 โมลาร์ โดยสมบัติของคอนกรีตพรุนที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังดัด การซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง ความหนาแน่น และการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้า

ผลการศึกษาพบว่าการใช้คอนกรีตและเศษคอนกรีตบล็อกมาเป็นมวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมธรรมชาติในคอนกรีตพรุนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสานในปริมาณต่าง ๆ ได้คอนกรีตพรุนที่มีกำลังอัดสำหรับอายุการบ่ม 28 วันอยู่ระหว่าง 122-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังดึงแบบผ่าซีกอยู่ระหว่าง 13-24 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และกำลังดัดอยู่ระหว่าง 28-47 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยการแทนที่ 40-60% และการซึมผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.22-1.01 เซนติเมตร/วินาที

Li, Chau (2000) ได้ศึกษาและสร้างเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต โดยหาค่าการซึมผ่านน้ำในรูปของความลึกของการซึมผ่าน การให้ความดันแก่น้ำเพื่อให้ซึมผ่านตัวอย่างจะใช้เครื่อง Autoclaved โดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การเคลือบด้านข้างตัวอย่างจะใช้เครื่อง Vacoating ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งออกเป็น 4 อัตราส่วนผสมโดยต่างกันที่ปูนซีเมนต์ คือ ปูนซีเมนต์ล้วน ปูนซีเมนต์ผสม Slag ร้อยละ 50 ปูนซีเมนต์ผสม Slag ร้อยละ 25 และเถ้าลอยร้อยละ 25 และปูนซีเมนต์ผสม Slag ร้อยละ 40 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ส่วนผสมทั้งหมดจะผสมสารหน่วงการก่อตัว และสารลดปริมาณน้ำร้อยละ 0.25 และ 2 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จากการพิจารณาความลึกของการซึมผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านแล้วส่วนผสมที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ Slag ร้อยละ 40 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 นั้นมีค่าต่ำที่สุด โดยข้อมูลมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation) มีค่าระหว่างร้อยละ 1.7 ถึง 1.9 และเฉลี่ยประมาณร้อยละ 5.4

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับค่าการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน โดยคัดเลือกขนาดของหินให้มีขนาดเท่ากับ 4.76-19.1 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุน
2. การศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพรุน
3. การศึกษาคุณสมบัติการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน

ทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การต้านทานความสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ และการดูดซึมน้ำ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.80-2517 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ ไม่จับตัวเป็นก้อน บรรจุไว้ในถุงพลาสติก และชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ก่อนการผสมคอนกรีต

3.1.2 หิน

ใช้หินขนาด 4.76-19.1 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4)

3.1.3 น้ำประปา

ใช้น้ำประปาในการผสมคอนกรีตและทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำ

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ดังนี้

3.2.1 ความถ่วงจำเพาะของหิน

การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของหิน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127-88 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate โดยใช้หินตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) มาทดสอบ

3.2.2 การหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Void in Aggregate ตัวอย่างการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{1}{2}$ " แสดงในตางรางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม

ตัวอย่าง	ขนาดของหิน (นิ้ว)	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (Kg/m^3)	Percent Void (%)	Average (%)
1	$\frac{1}{2}$	3.72	13.19	9.47	0.00707	1,865.629	30.604	33.916
2	$\frac{1}{2}$	8.30	27.88	19.58	0.01605	1,737.072	35.386	
3	$\frac{1}{2}$	15.76	54.04	38.28	0.03129	1,727.069	35.758	

รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบการหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม

3.3 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพรุนยังคงไม่มีมาตรฐานที่ยอมรับและใช้งานทั่วไปอย่างคอนกรีตธรรมดา ACI522R-10 (ACI522r-10, 2010) แนะนำการออกแบบคอนกรีตพรุนไว้ว่า คอนกรีตพรุนที่มีปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่อยู่ชิดกันในสภาพที่หลวมกว่าสภาพอัดแน่นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณเพสต์เข้าไปเคลือบผิวมวลรวมและแทรกตัวอยู่ในช่องว่าง ทั้งนี้สภาพการอยู่ชิดกันของมวลรวมในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของเพสต์ ปริมาณเพสต์ และพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น เพสต์ที่มีค่าการไหลสูงจะเคลือบผิวมวลรวมได้บางกว่า ทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากกว่า แต่จะไม่สามารถใช้ในปริมาณมากได้เนื่องจากจะเกิดการไหลของเพสต์ไปอุดตันด้านล่าง ขณะที่เพสต์ที่มีค่าต่ำจะเคลือบผิวมวลรวมได้หนากว่า ส่งผลให้มวลรวมอยู่ห่างกันมากขึ้น ปริมาณเพสต์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้มวลรวมอยู่ห่างกันมากขึ้น และพลังงานในการอัดแน่นที่สูงขึ้นจะทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากขึ้น โดยทั่วไปปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของมวลรวม โดยที่มวลรวมขนาดเล็กหรือมีผิวหยาบจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่หรือผิวเรียบ ดังนั้น จึงต้องการปริมาณเพสต์ในการเคลือบผิวมากกว่า และปริมาณเพสต์ยังขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น หากพลังงานในการอัดแน่นสูง ปริมาณเพสต์ที่ใช้ไม่ควรมาก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการไหลลงด้านล่างของเพสต์

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนเบื้องต้นจึงต้องทำการทดลองหาปริมาณหินและปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมกับระดับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ (C) นั้น เมื่อกำหนดปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ (Vp) ในคอนกรีตพรุน 1 ลูกบาศต์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) แล้วสามารถคำนวณหาปริมาณได้พร้อมทั้งปริมาณน้ำ (W) ตามสมการที่ 1 และ 2 คือ

$$V_p = C/(3.15 \times 1000\ kg/m^3) + W/(1000\ kg/m^3) \quad (3.1)$$

$$W = (W/C) \times C \quad (3.2)$$

และสามารถคำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ได้จากสมการที่ 3.3 คือ

$$C = (V_p*1000)/(0.315+W/C)\ \ kg/m^3 \quad (3.3)$$

Vp คือ ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

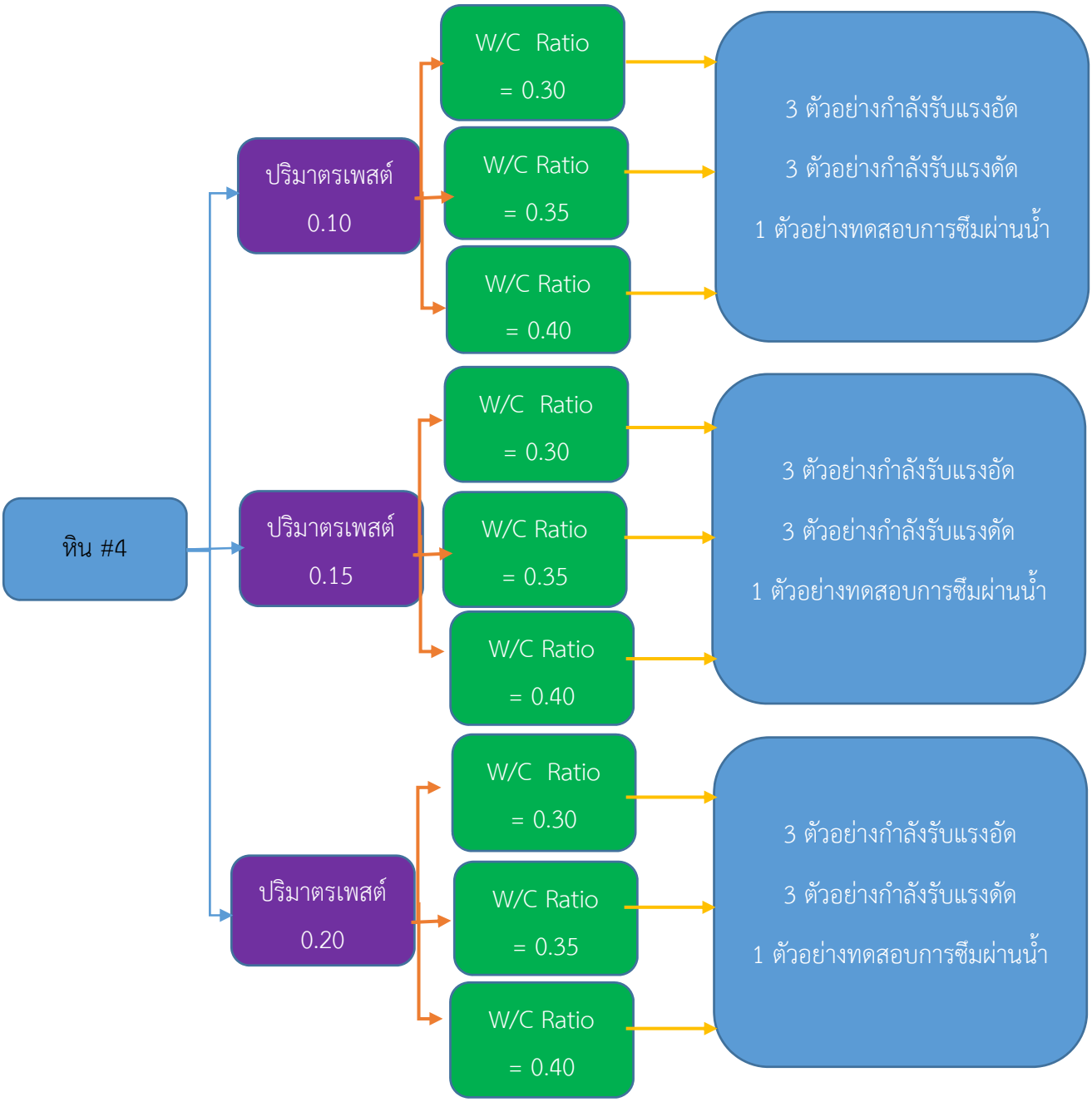
C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)

W คือ ปริมาณน้ำ (กิโลกรัม)

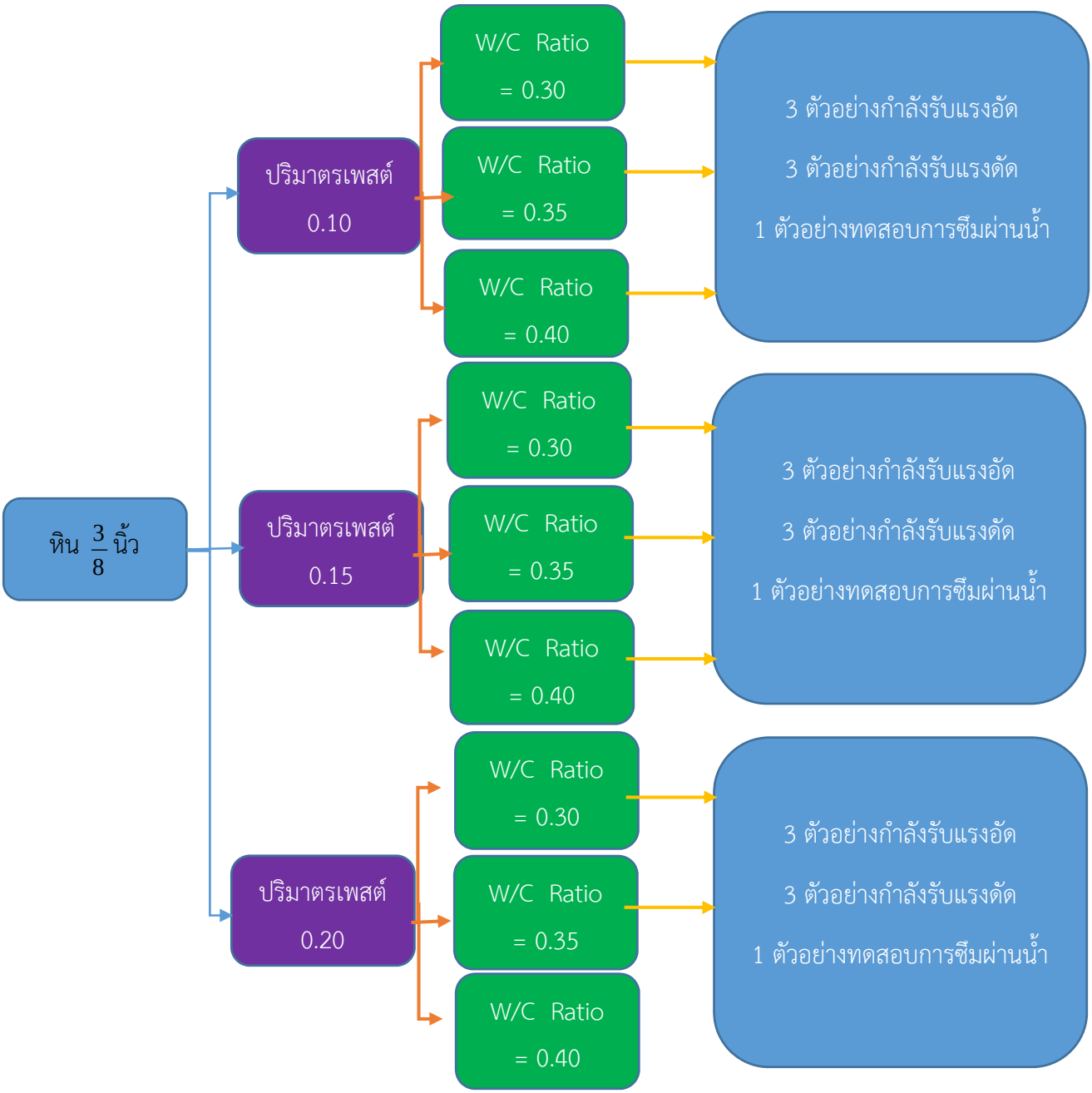
ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนโดยกำหนดเพลต์จากช่องว่างของหินแต่ละขนาดเท่ากับ 0.10 และ W/C Ratio 0.30 แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุน

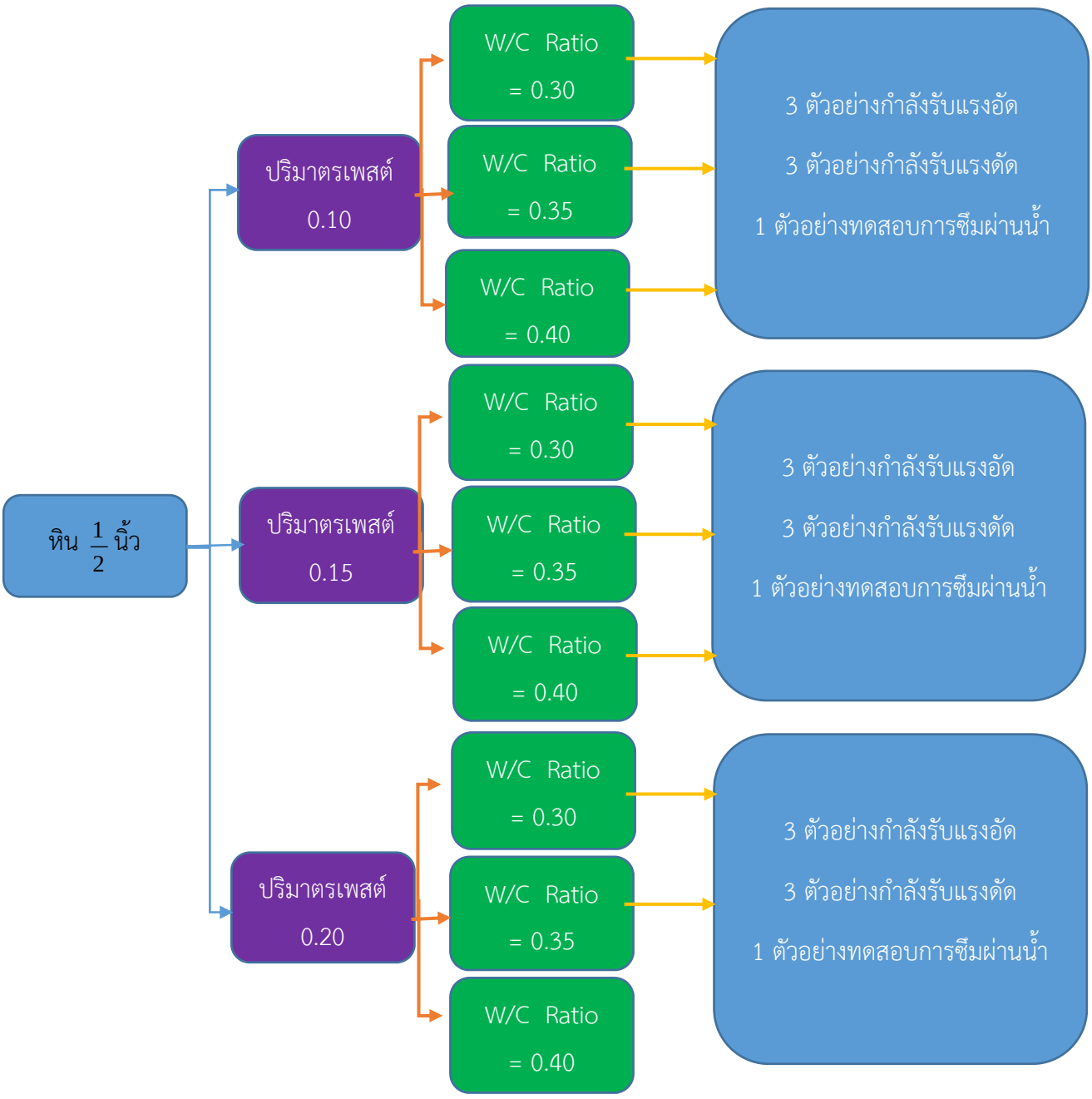
ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.10	0.30	161.954	48.586	1,822.471	2,033.011
$\frac{3}{8}$	0.10	0.30	161.954	48.586	1,829.158	2,039.698
$\frac{1}{2}$	0.10	0.30	161.954	48.586	1,784.262	1,994.802
$\frac{3}{4}$	0.10	0.30	161.954	48.586	1,842.208	2,052.748



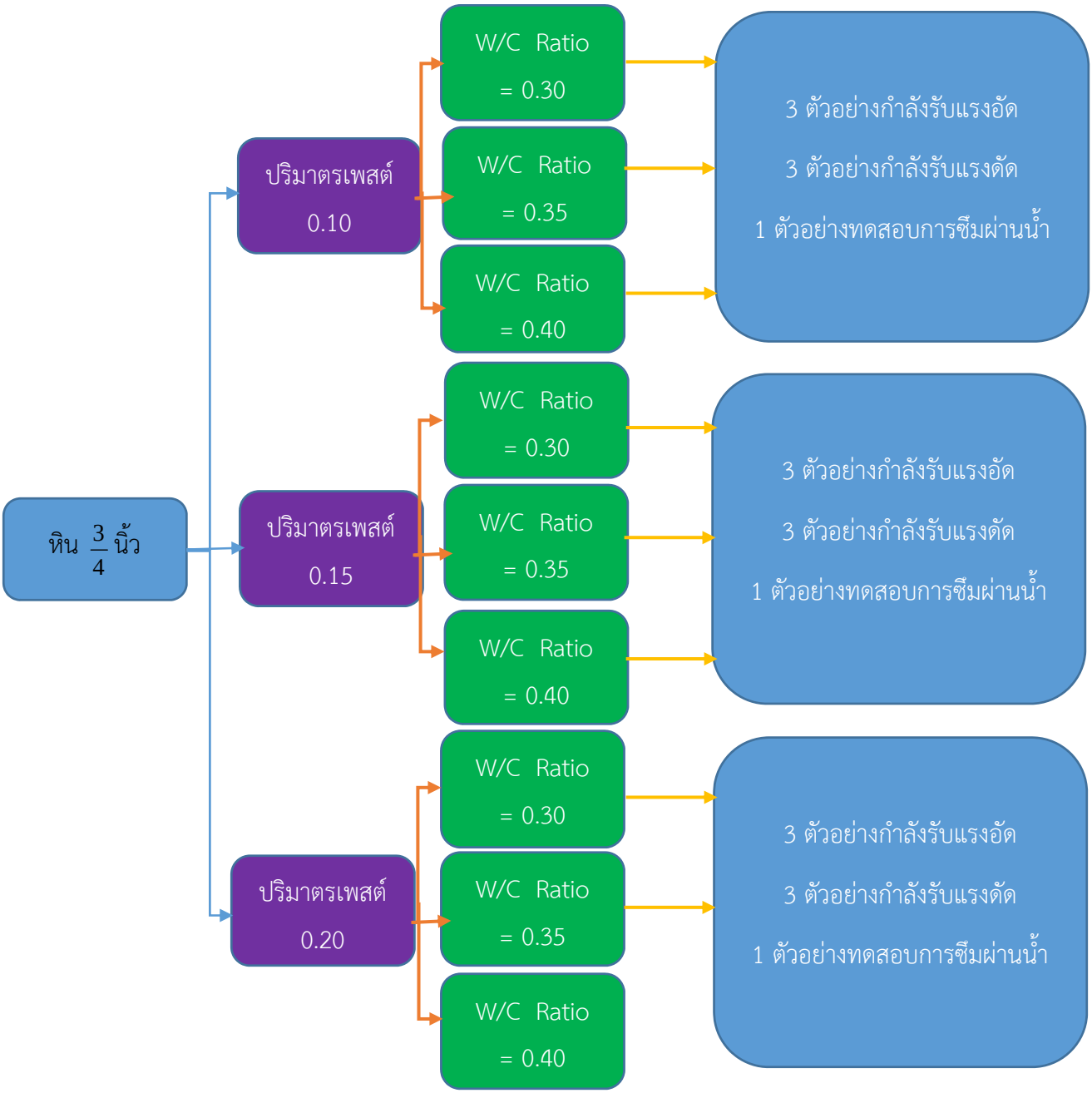
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน #4



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{3}{8}$ นิ้ว



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{1}{2}$ นิ้ว



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนของขนาดหิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว

สำหรับขั้นตอนการผสมและอัดแน่นตัวอย่างทำโดยผสมซีเมนต์เพสต์จนเนื้อซีเมนต์เพสต์เข้ากันได้ดีใช้เวลา 5 นาที ใส่หินที่เตรียมไว้ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งลงในส่วนผสมต่อไปเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นทำการกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ปาดหน้าให้เรียบทิ้งให้คอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบและบ่มชื้นจนครบอายุการทดสอบ ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด และใช้ตัวอย่างรูปคานหนา 15 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด และใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว เป็นแบบหล่อสำหรับการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน

3.4 การทดสอบค่าการยุบตัวและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

3.4.1 การทดสอบค่าการยุบตัว

การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143-89 Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete

3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C39 โดยจะทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทำการเคลือบหัวและท้ายตัวอย่างด้วยกำมะถัน

3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C78 โดยใช้ตัวอย่างรูปคานหนา 15 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน ใช้วิธีการทดสอบแบบกดสองจุดโดยที่ระยะระหว่างแรงกดเท่า ๆ กัน โดยใช้สมการที่ 3.4 และ 3.5 ในการคำนวณกำลังรับแรงดัด

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{(สำหรับรอบแตกขาดอยู่ในช่วงกลางคาน)} \qquad (3.4)$$

และ

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{(รอยแตกขาดอยู่นอกช่วงกลางคาน)} \qquad (3.5)$$

R คือ กำลังรับแรงดัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

P คือ แรงกดสูงสุด (กิโลกรัม)

L คือ ช่วงคานระหว่างจุดรองรับ (เซนติเมตร)

b คือ ความกว้างเฉลี่ยของคานบริเวณรอยแตก (เซนติเมตร)

d คือ ความลึกเฉลี่ยของคานบริเวณรอยแตก (เซนติเมตร)

a คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างรอยแตกถึงจุดรองรับที่ใกล้ที่สุด (เซนติเมตร)

3.4.4 การทดสอบค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2434 โดยใช้ ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วเป็นแบบหล่อ เป็นการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) ค่าการซึมผ่านของน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$k = \frac{QL}{HAt} \tag{3.6}$$

Q คือ ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่วัดในเวลา t (วินาที)

k คือ ค่าการซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)

A คือ ขนาดหน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

L คือ ความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร)

H คือ ระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองทาง (เซนติเมตร)

รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต

3.4.5 การทดสอบการไหลแผ่ (Flow Test)

ทดสอบเพื่อหาระดับความข้นเหลวของซีเมนต์เพสต์ว่ามีสภาพเหมาะในการนำไปใช้งานหรือไม่ค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะแก่การนำไปใช้งานอยู่ในช่วง 150-230 มิลลิเมตร (ที่มา: วารสารราชบัณฑิตยสถาน, 2553) ซึ่งทดสอบโดยใช้เครื่อง Flow Table ในการทดสอบ โดยใช้การหาค่าร้อยละของการไหลจากสมการ 3.7

$$\text{ค่าร้อยละการไหล} = (\frac{\varphi_s - \varphi_c}{\varphi_c})x100 \qquad (3.7)$$

φ_s คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของคอนกรีต (cm)

φ_c คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของขอบล่างของแบบหล่อ (cm)

บทที่ 4
ผลการทดสอบและอภิปลายผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของหิน

ค่าความถ่วงจำเพาะของหินที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 2.70 โมดูลัสความละเอียดของหินเท่ากับ 2.65

4.1.2 การหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวม

ค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้แสดงในตารางที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จากผลการทำสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบมีค่าระหว่าง 1,776.509 ถึง 1,834.286 กิโลกรับต่อลูกบาศก์เมตร และช่องว่างของมวลรวมหยาบมีค่าระหว่าง 31.770 ถึง 33.916 โดยมวลรวมหยาบปกติจะมีค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบมีค่าระหว่าง 1,500 ถึง 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids) เป็นค่าที่แสดงถึงว่ามีอากาศปนแทรกอยู่ระหว่างมวลรวมเท่าใด โดยทั้งนี้ไม่รวมช่องว่างภายในของมวลรวม ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวกำหนดปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่จะผสมลงในคอนกรีต โดยหน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวมหยาบจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและปริมาณความชื้นของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 4.1 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

ตัวอย่าง	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (Kg/m^3)	Percent Void (%)	Average (%)
1	#4	3.72	13.52	9.80	0.00707	1,912.305	28.868	32.501
2	#4	8.30	28.46	20.16	0.01605	1,773.208	34.041	
3	#4	15.76	55.02	39.26	0.03129	1,758.389	34.593	

ตารางที่ 4.2 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{8}$"

ตัวอย่าง	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (Kg/m^3)	Percent Void (%)	Average (%)
1	$\frac{3}{8}$"	3.72	13.36	9.64	0.00707	1,889.674	29.709	32.253
2	$\frac{3}{8}$"	8.30	28.2	19.9	0.01605	1,757.009	34.644	
3	$\frac{3}{8}$"	15.76	56.86	41.1	0.03129	1,817.193	32.405	

ตารางที่ 4.3 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{1}{2}$"

ตัวอย่าง	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (Kg/m^3)	Percent Void (%)	Average (%)
1	$\frac{1}{2}$"	3.72	13.19	9.47	0.00707	1,865.629	30.604	33.916
2	$\frac{1}{2}$"	8.30	27.88	19.58	0.01605	1,737.072	35.386	
3	$\frac{1}{2}$"	15.76	54.04	38.28	0.03129	1,727.069	35.758	

ตารางที่ 4.4 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{4}$"

ตัวอย่าง	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (Kg/m^3)	Percent Void (%)	Average (%)
1	$\frac{3}{4}$"	3.72	13.80	10.08	0.00707	1,951.909	27.394	31.770
2	$\frac{3}{4}$"	8.30	28.35	20.05	0.01605	1,766.355	34.296	
3	$\frac{3}{4}$"	15.76	55.84	40.08	0.03129	1,784.595	33.618	

4.1.3 การทดสอบการไหลแผ่ (Flow Test)

จากการทดสอบช่วง W/C Ratio ที่มีความสามารถในการทำงานได้อยู่ในช่วง 0.28 – 0.43 ซึ่งเมื่อ W/C Ratio น้อยกว่า 0.28 การไหลแผ่จะมีค่าน้อยมากกว่า 150 มิลลิเมตร มีความสามารถในการทำงานได้ไม่เพียงพอ เช่นเดียวกันเมื่อ W/C Ratio มากกว่า 0.43 การไหลแผ่จะมีค่ามากกว่า 230 มิลลิเมตร ซีเมนต์เพสต์ไหลออกจาก Flow Table ในขณะที่ทำการหมุนกระทุ้ง เมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ไม่เกาะตัวกับมวลรวม

4.1.4 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยมี W/C Ratio ในช่วง 0.30 - 0.40 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ถึง 4.12 โดยที่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนมีค่าอยู่ในช่วง 1,900 – 2,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อยู่ในช่วง 2,300 – 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพราะปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพรุนไม่ได้ถูกเติมเต็มด้วยมวลรวมละเอียด ปริมาณช่องว่างจึงมีมากกว่าคอนกรีตธรรมดาส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และขนาดหินกับปริมาตรเพสต์ส่งผลให้มีหน่วยน้ำหนักมากขึ้น เพราะว่า หินแต่ละขนาดมีปริมาณช่องว่างระหว่างหินไม่เท่ากันหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนจึงแปรผันตามกัน ปริมาตรเพสต์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายมวลรวมละเอียดซึ่งจะช่วยเข้าไปอุดช่องว่างของคอนกรีตถ้าปริมาตรเพสต์เพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนก็จะเพิ่มขึ้นตาม

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.30

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.10	0.30	161.954	48.586	1,822.471	2,033.011
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.30	161.954	48.586	1,829.158	2,039.698
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.30	161.954	48.586	1,784.262	1,994.802
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.30	161.954	48.586	1,842.208	2,052.748

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratio เท่ากับ 0.35

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.10	0.35	149.822	52.438	1,822.471	2,024.730
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.35	149.822	52.438	1,829.158	2,031.417
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.35	149.822	52.438	1,784.262	1,986.522
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.35	149.822	52.438	1,842.208	2,044.467

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.10 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.40

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.10	0.35	139.381	55.752	1,822.471	2,017.604
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.35	139.381	55.752	1,829.158	2,024.291
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.35	139.381	55.752	1,784.262	1,979.395
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.35	139.381	55.752	1,842.208	2,037.341

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.30

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.15	0.30	242.931	72.879	1,822.471	2,138.281
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.30	242.931	72.879	1,829.158	2,144.968
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.30	242.931	72.879	1,784.262	2,100.072
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.30	242.931	72.879	1,842.208	2,158.018

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.35

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.15	0.35	224.732	78.656	1,822.471	2,125.860
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.35	242.931	72.879	1,829.158	2,132.547
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.35	242.931	72.879	1,784.262	2,087.651
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.35	242.931	72.879	1,842.208	2,145.597

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.15 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.40

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.15	0.40	209.071	83.628	1,822.471	2,115.170
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.40	209.071	83.628	1,829.158	2,121.857
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.40	209.071	83.628	1,784.262	2,076.962
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.40	209.071	83.628	1,842.208	2,134.907

ตารางที่ 4.11 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.30

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.20	0.30	323.907	97.172	1,822.471	2,243.551
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.30	323.907	97.172	1,829.158	2,250.238
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.30	323.907	97.172	1,784.262	2,205.342
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.30	323.907	97.172	1,842.208	2,263.288

ตารางที่ 4.12 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.35

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.20	0.35	299.643	104.875	1,822.471	2,226.990
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.35	299.643	104.875	1,829.158	2,233.676
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.35	299.643	104.875	1,784.262	2,188.781
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.35	299.643	104.875	1,842.208	2,246.727

ตารางที่ 4.13 สัดส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่ปริมาตรเพสต์ 0.20 และ W/C Ratioเท่ากับ 0.40

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	น้ำหนักซีเมนต์ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)
#4	0.20	0.40	278.761	111.504	1,822.471	2,212.737
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.40	278.761	111.504	1,829.158	2,219.424
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.40	278.761	111.504	1,784.262	2,174.528
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.40	278.761	111.504	1,842.208	2,232.474

4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยมีค่าของปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.1,0.15 และ 0.2 ตามลำดับ และในแต่ล่ะซีเมนต์เพสต์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30, 0.35 และ 0.40 มีขนาดของมวลรวมที่ต่างกัน พบว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดเล็กให้ความสามารถในการเทเข้าแบบได้ง่ายกว่า คอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่และลักษณะของก้อนตัวอย่างมีความสม่ำเสมอหรือมีการกระจายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ดีกว่า ด้านบนของก้อนตัวอย่างมีการยึดเกาะกันดีไม่หลุดร่อนง่ายเหมือนคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่

รูปที่ 4.1 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนของปริมาตรเพสต์ 0.10

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
#4	0.10	0.30	28.121	5.756	3.914
#4	0.10	0.35	26.823	4.927	3.410
#4	0.10	0.40	25.957	2.548	2.918
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.30	34.178	4.587	4.907
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.35	28.121	4.526	4.494
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.40	18.171	4.247	4.363
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.30	23.362	4.077	5.586
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.35	21.631	2.039	5.422
$\frac{1}{2}$"	0.10	0.40	20.766	1.033	4.768
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.30	24.660	1.189	6.063
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.35	17.305	0.523	5.833
$\frac{3}{4}$"	0.10	0.40	12.979	0.510	5.517

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนของปริมาตรเพสต์ 0.15

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
#4	0.15	0.30	56.242	10.642	2.525
#4	0.15	0.35	41.100	10.459	3.839
#4	0.15	0.40	29.852	7.706	3.960
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.30	27.689	9.541	5.262

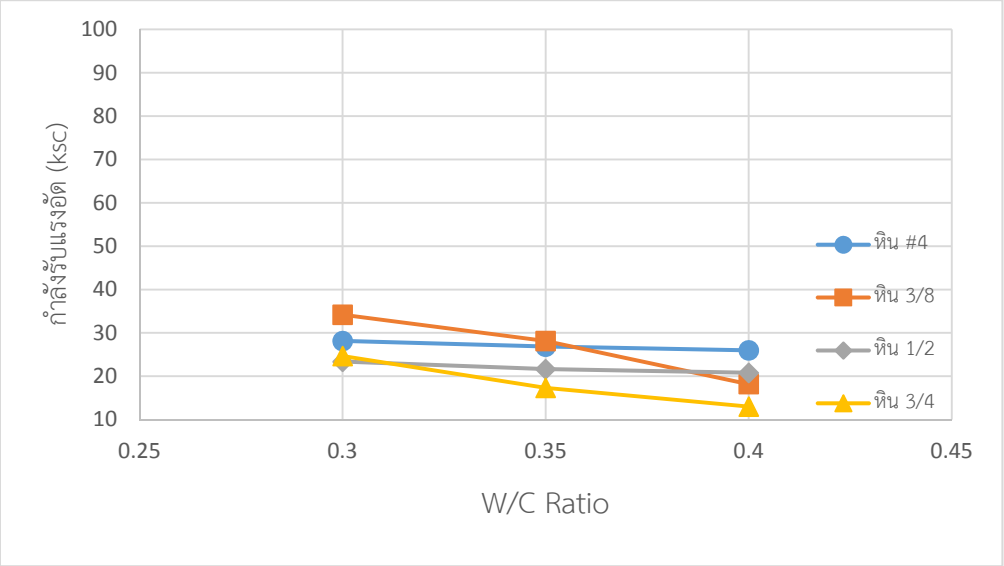
ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.35	25.958	5.505	4.761
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.40	21.632	4.771	3.931
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.30	23.794	8.991	5.054
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.35	22.064	6.055	5.183
$\frac{1}{2}$"	0.15	0.40	22.064	3.119	5.375
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.30	31.150	6.789	5.659
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.35	30.283	4.954	5.526
$\frac{3}{4}$"	0.15	0.40	22.930	4.771	5.427

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด, แรงดัดและการไหลซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนของปริมาตาเพสต์ 0.20

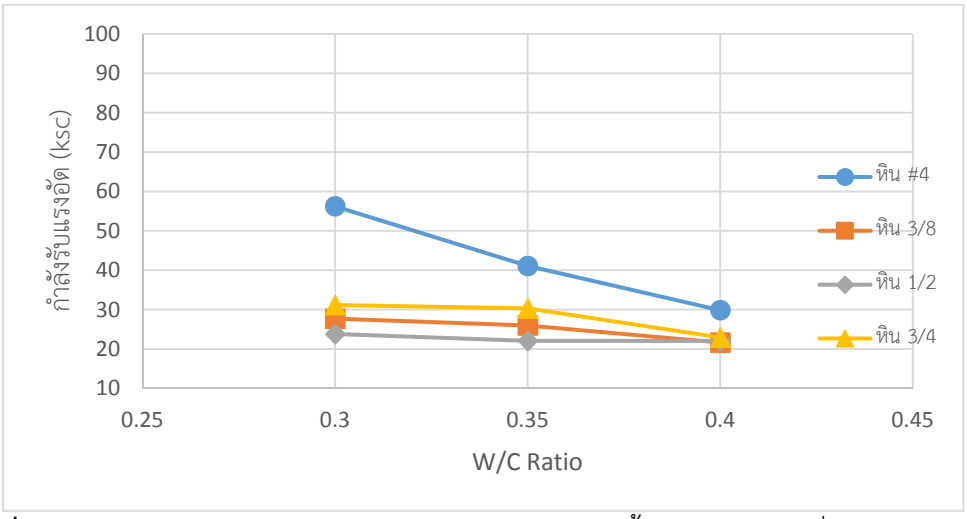
ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
#4	0.20	0.30	90.853	20.000	2.383
#4	0.20	0.35	73.548	17.431	2.339
#4	0.20	0.40	44.561	16.514	2.289
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.30	55.377	12.661	3.926
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.35	44.561	11.376	3.982
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.40	35.476	11.193	4.330
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.30	57.108	12.110	3.127
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.35	45.426	7.890	3.716
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.40	38.937	7.523	4.488

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.30	33.745	8.624	4.447
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.35	25.958	6.055	4.797
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.40	21.632	3.119	5.651

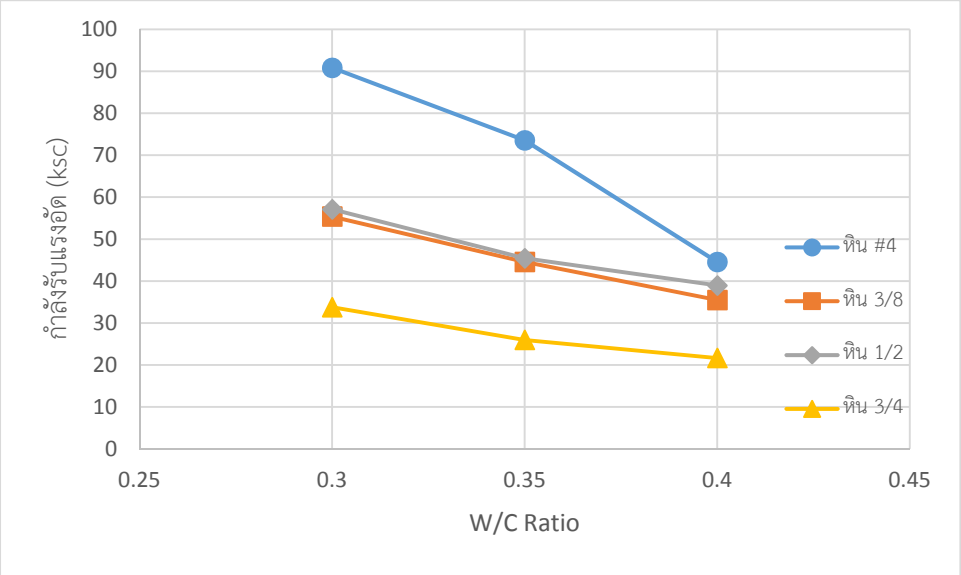
จากภาพที่ 4.2 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดเล็ก มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และมีปริมาณเพสต์มากจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด และคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มาก และมีปริมาณเพสต์น้อยจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด โดยกราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.1 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 12.979 กิโลกรมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 28.121 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 22.930 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 56.242 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.2 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 21.632 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 90.853 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.10



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.15

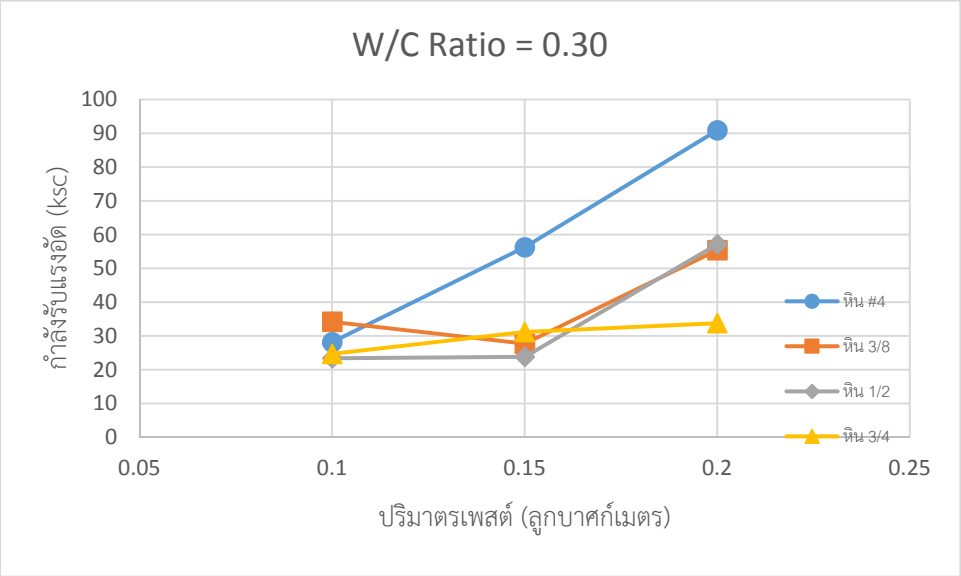


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณเพสต์เท่ากับ 0.20

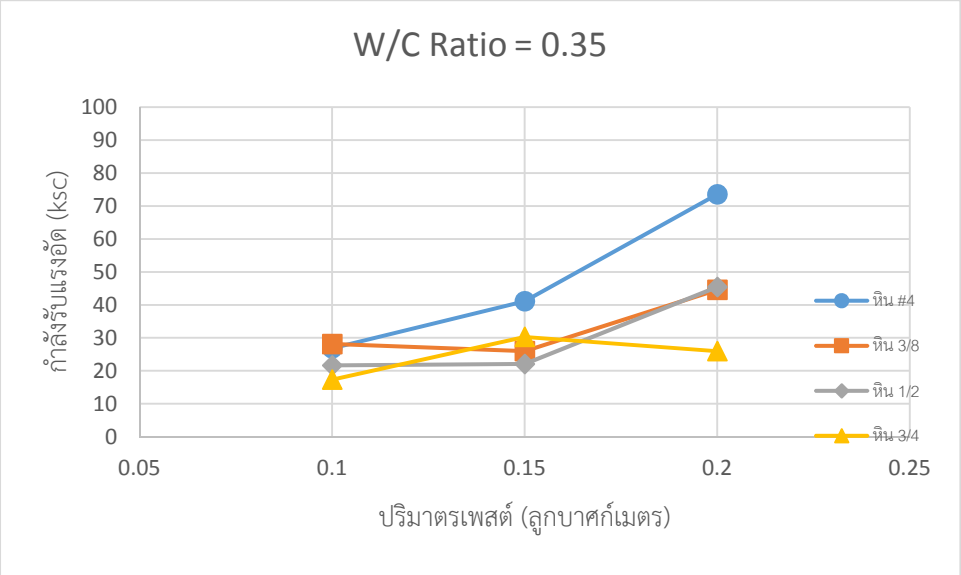
จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.30 แยกตามขนาดหินตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีสัดส่วนแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และปริมาณซีเมนต์เพสต์มีสัดส่วนแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนดังแสดงในรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมหยาบทั้ง 4 ขนาด มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อขนาดของมวลรวมหยาบมีขนาดที่โตขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรวมหยาบขนาดเล็กมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมหยาบมากกว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองก็มีการเหวี่ยงขึ้นลงของค่ากำลังรับแรงอัด บางค่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กเกิดจากลักษณะพื้นผิวของมวลรวม มวลรวมที่ผิวเรียบก็จะให้ค่ากำลังที่น้อยเพราะผิวสัมผัสน้อย ส่วนมวลรวมที่ผิวขุขระให้กำลังที่มากเพราะมีพื้นผิวที่มากกว่าเป็นต้น

จากภาพที่ 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนนั้นแปรผันตรงกับค่าปริมาตรซีเมนต์เพสต์ โดยกราฟที่ 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 24.660 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 90.853 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 17.303 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 73.548 กิโลกรัม

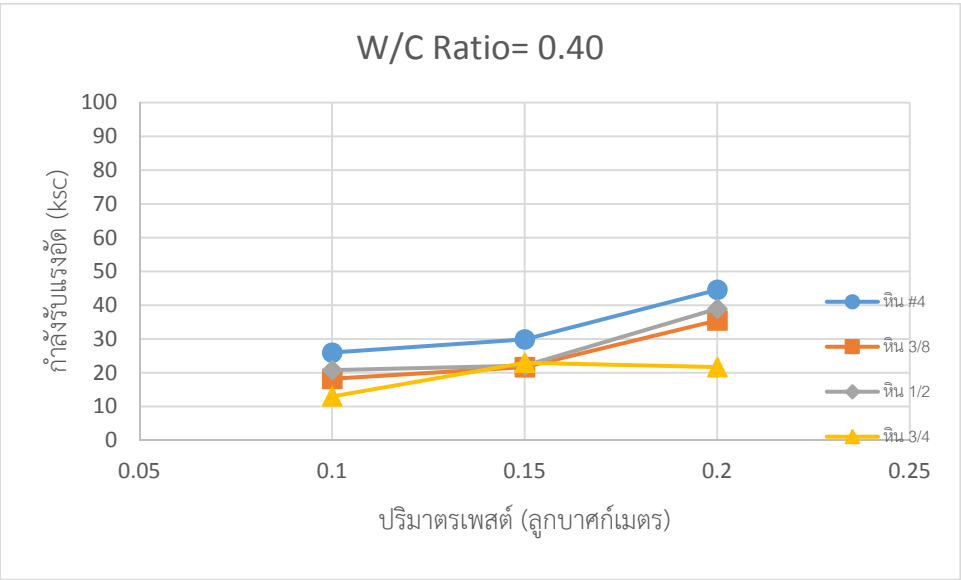
ต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 6 แสดงค่าความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 12.979 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 44.561 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด #4 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 25.957 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 90.853 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้กำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 18.171 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 55.377 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 9 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้กำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 20.766 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 57.108 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกราฟที่ 10 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้กำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 12.979 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 33.745 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



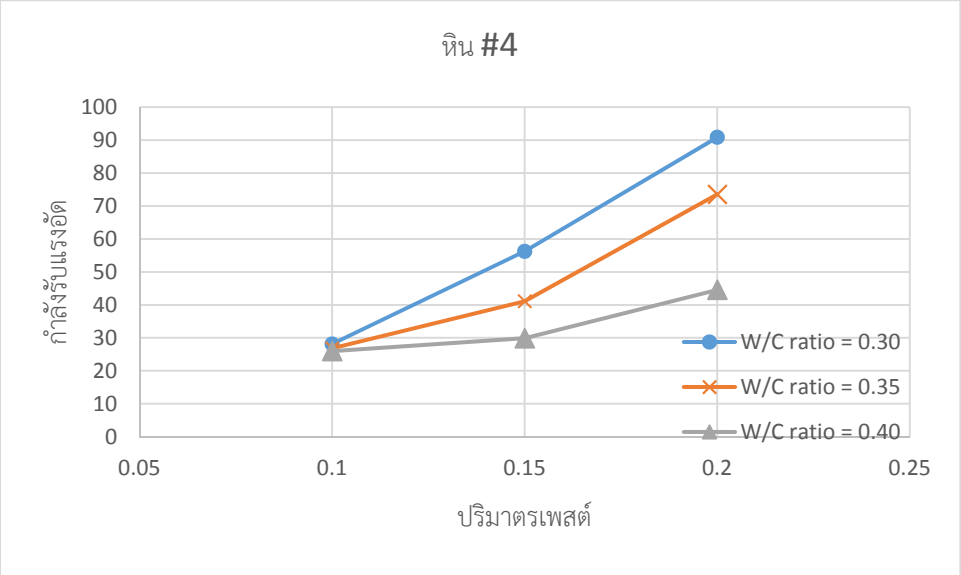
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30



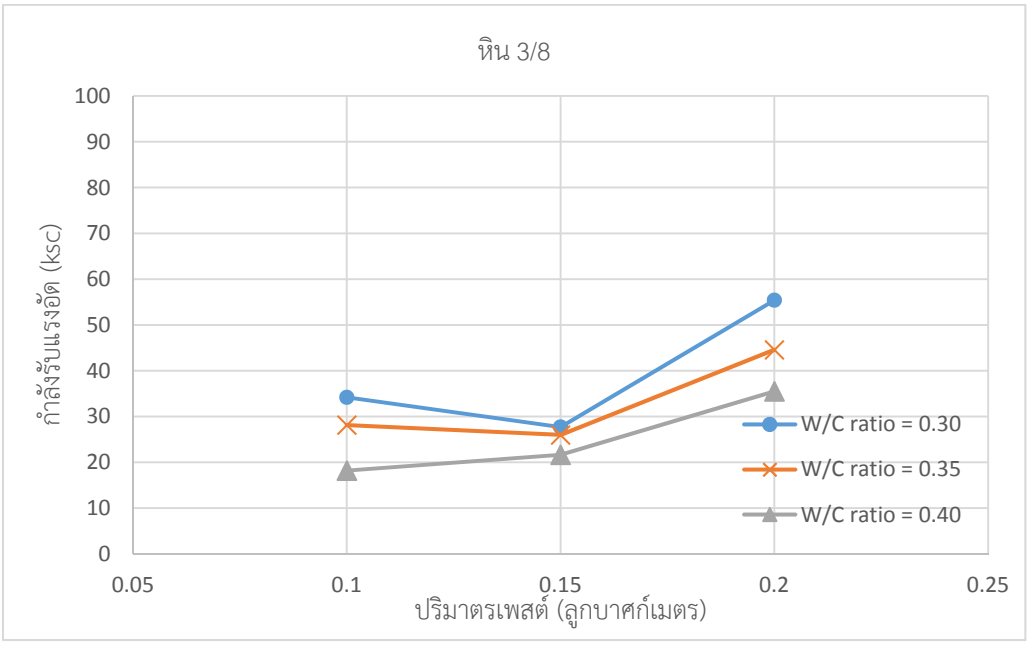
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35



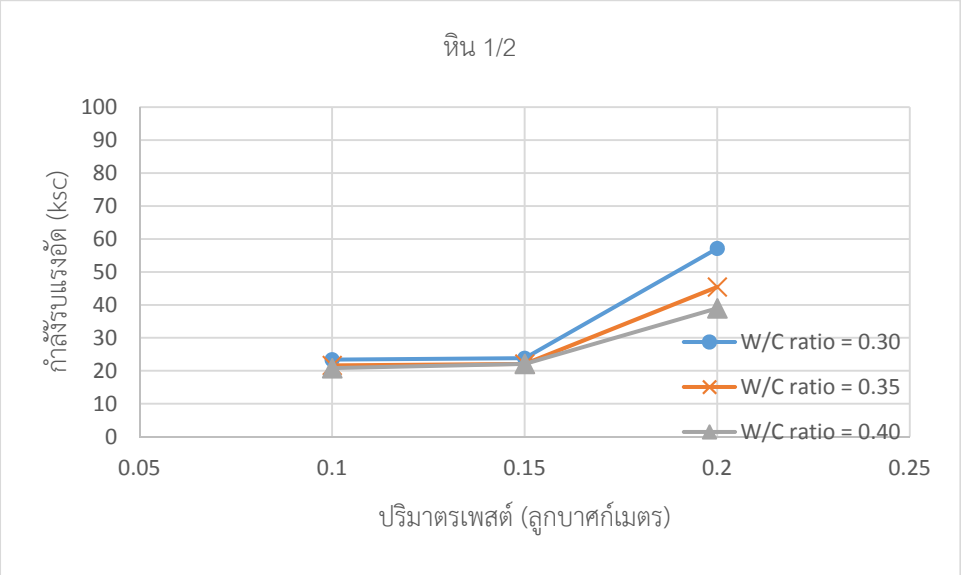
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40



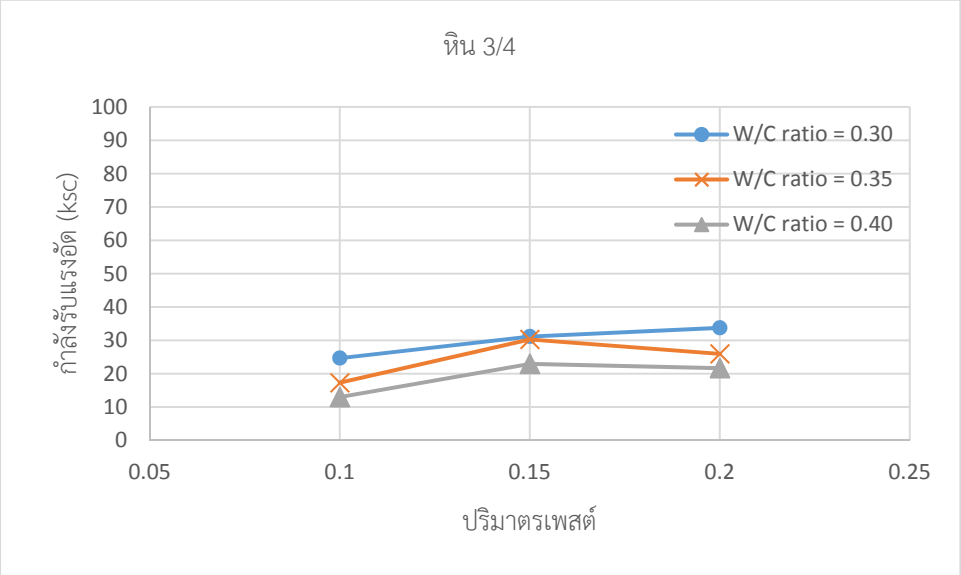
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด #4



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$ "



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$"



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$"

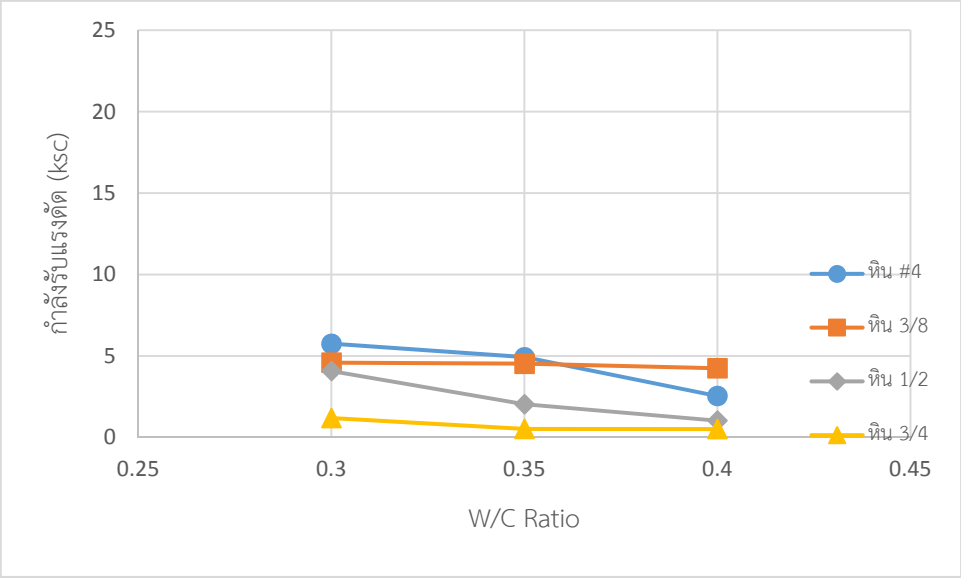
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.30 0.35 และ 0.40 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" พบว่าปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง

มวลรวมหยาบหนาขึ้นและทำให้ขนาดของโพรงหรือช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตพรุนลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนเพิ่มมากขึ้น

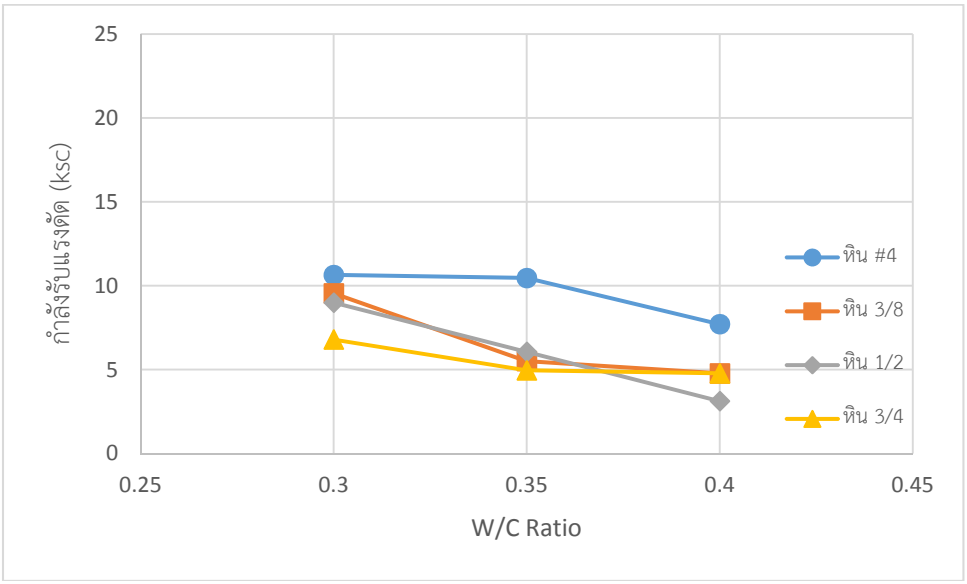
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพรุน

จากภาพที่ 4.12 4.13 และ 4.14 แสดงค่ากำลังดัดของคอนกรีตพรุน พบว่าค่ากำลังดัดมีลักษณะเช่นเดียวกับค่ากำลังอัด นั่นคือคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดเล็ก ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ และปริมาณซีเมนต์มากให้ค่ากำลังดัดที่มีค่าสูงกว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดโตกว่า ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงและปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อย โดยกราฟที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 0.510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5.756 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

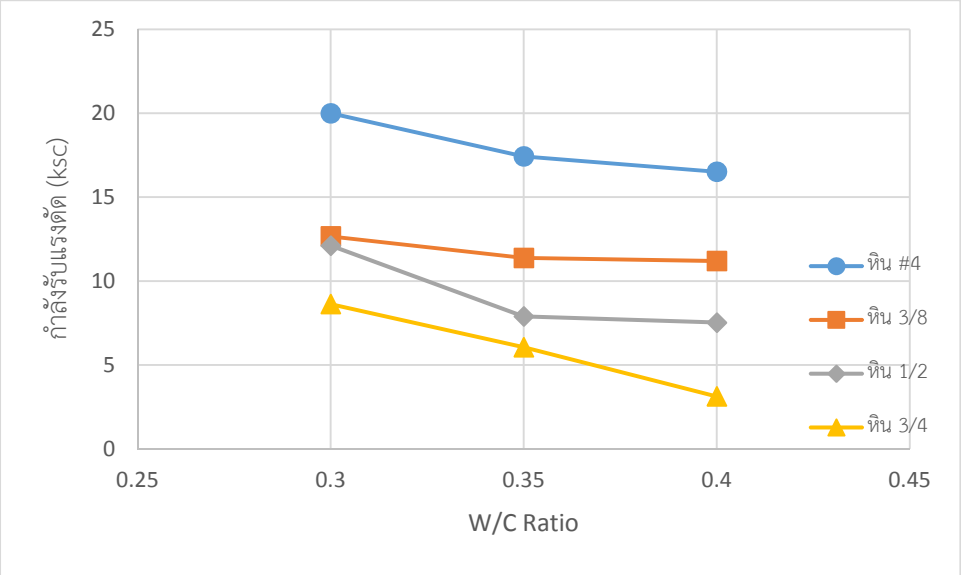
กราฟที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 3.119 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 10.642 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 3.119 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 20.000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15

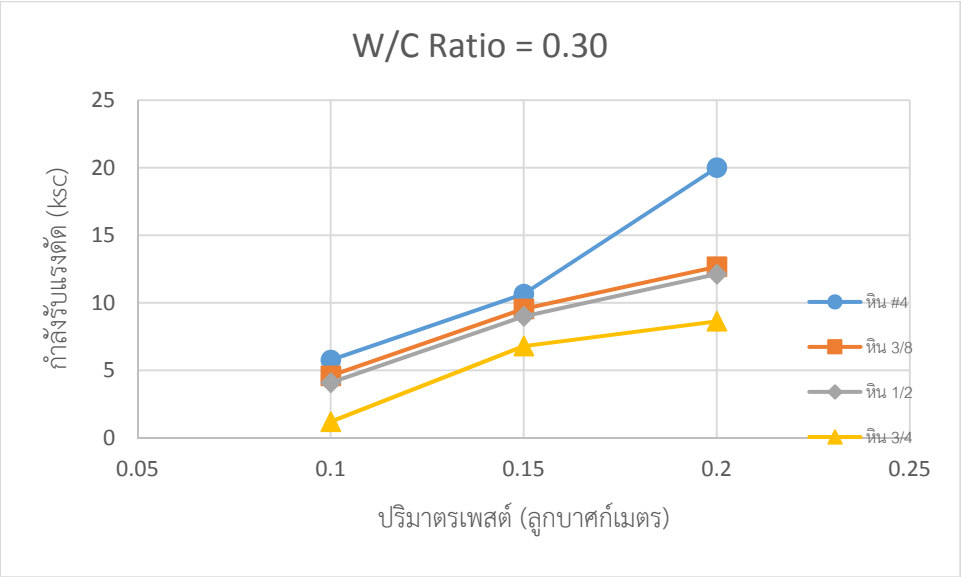


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20

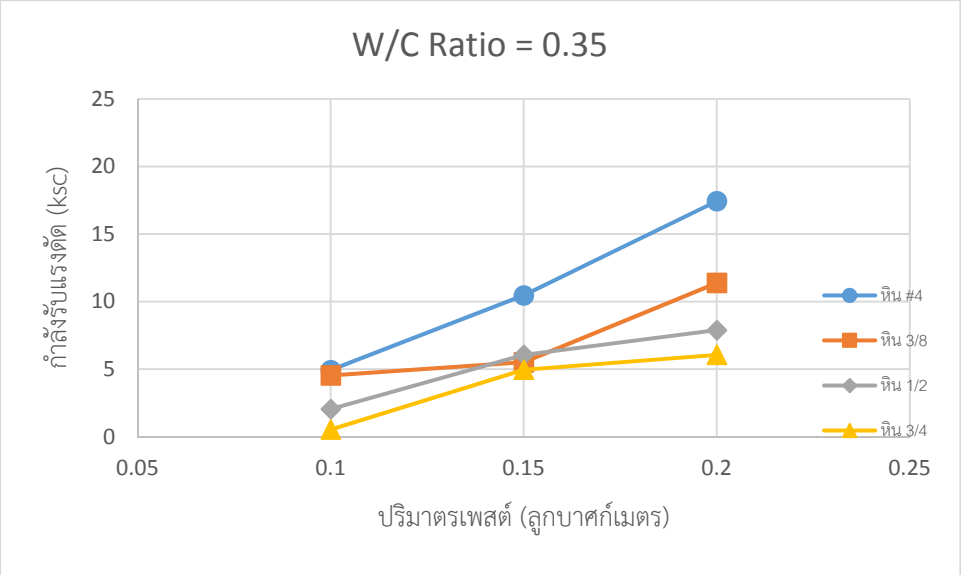
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรังแรงอัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 0.15 และ 0.20 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" พบว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นสัดส่วนแปรผกผันกับค่าของกำลังดัดและปริมาณซีเมนต์เพสต์แปรผันตรงต่อกำลังรับแรงดัด ดังแสดงในภาพที่ 4.14 4.15 และ 4.16 แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองมีการเหวี่ยงขึ้นลงของค่ากำลังดัด มีสาเหตุเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ลักษณะความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีต ลักษณะพื้นผิวของมวลรวม และกระบวนการในการผสมคอนกรีต เป็นต้น ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดจะให้กำลังที่น้อยกว่าคอนกรีตพรุนที่อายุ 7 วัน กำลังอัดจะอยู่ในช่วง 2 – 90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่คอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดที่อายุ 7 วันจะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 300-380 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในช่วง W/C Ratio ที่เท่า ๆ กัน (ที่มา: หนังสือคอนกรีตวิทยา รุ่นที่ 2 รศ.ดร.อมร พิมารมาศ, ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, 2557)

จากภาพที่ 4.15 4.16 4.17 4.18 4.19 4.20 และ 4.21 แสดงค่ากำลังรับแรงดัดมีลักษณะเช่นเดียวกับกำลังอัด นั่นคือกำลังดัดแปรผันตรงกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่ผสมในคอนกรีตพรุน โดยกราฟที่ 14 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 1.189 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 15 จะ

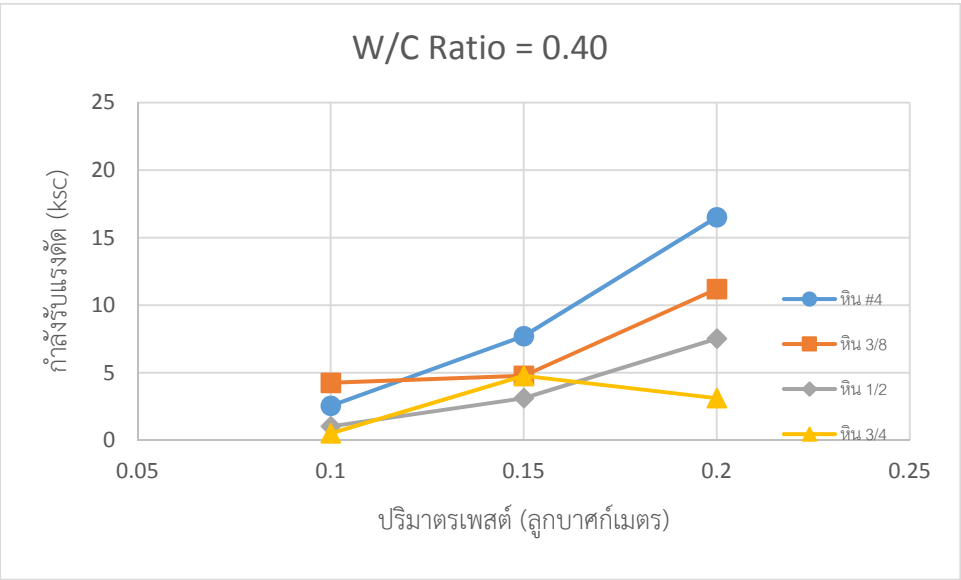
แสดงค่าความสัมพันธ์ระว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 0.523 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 17.431 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 16 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 0.510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 16.514 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 17 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด #4 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 2.548 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 20.000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 18 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 4.247 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 12.661 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 19 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 1.033 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 12.110 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กราฟที่ 20 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังรับแรงดัดตั้งแต่ 0.510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 8.624 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



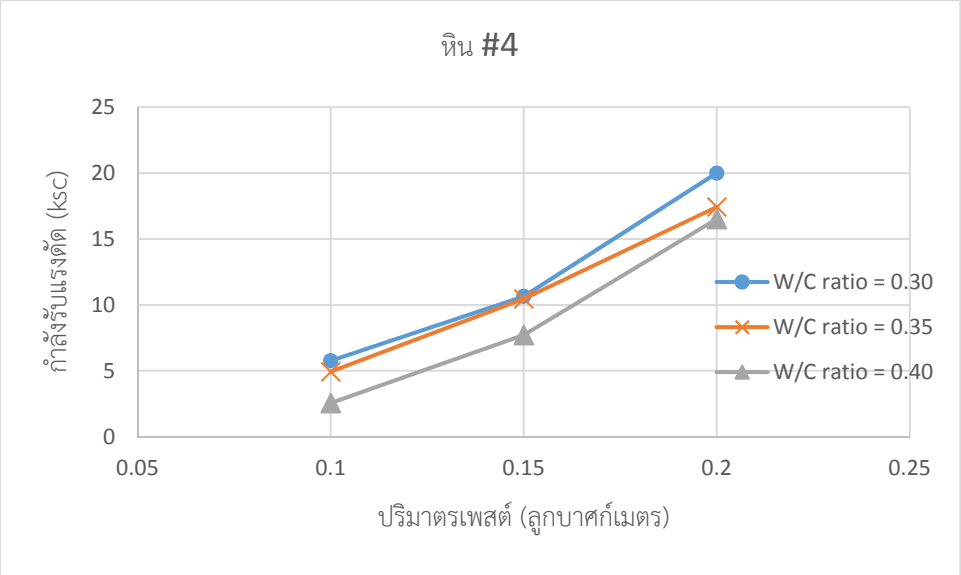
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30



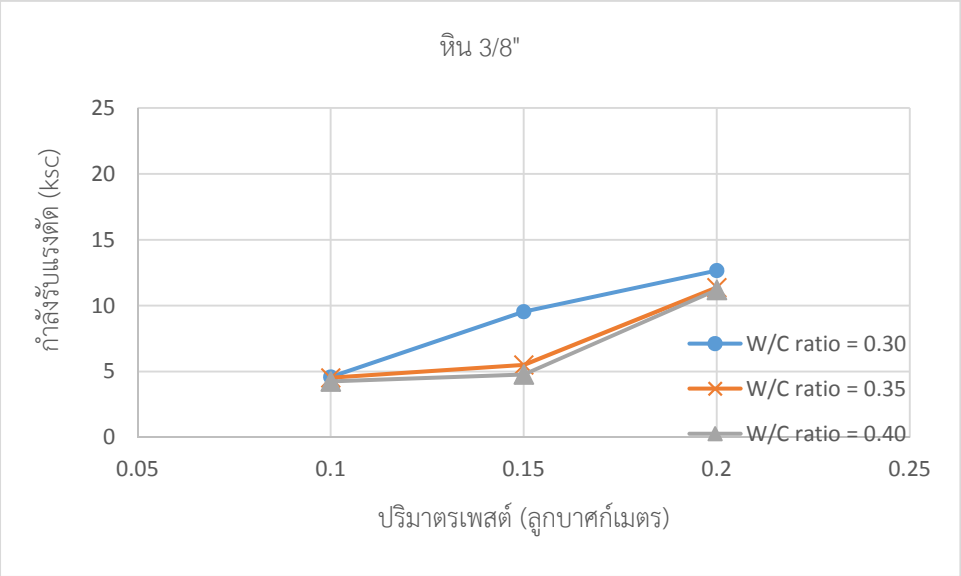
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35



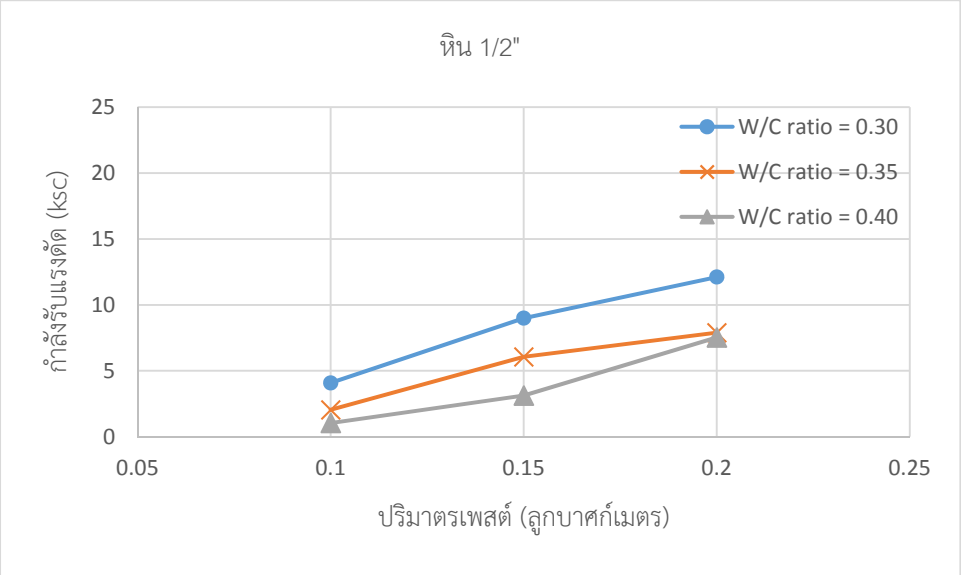
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40



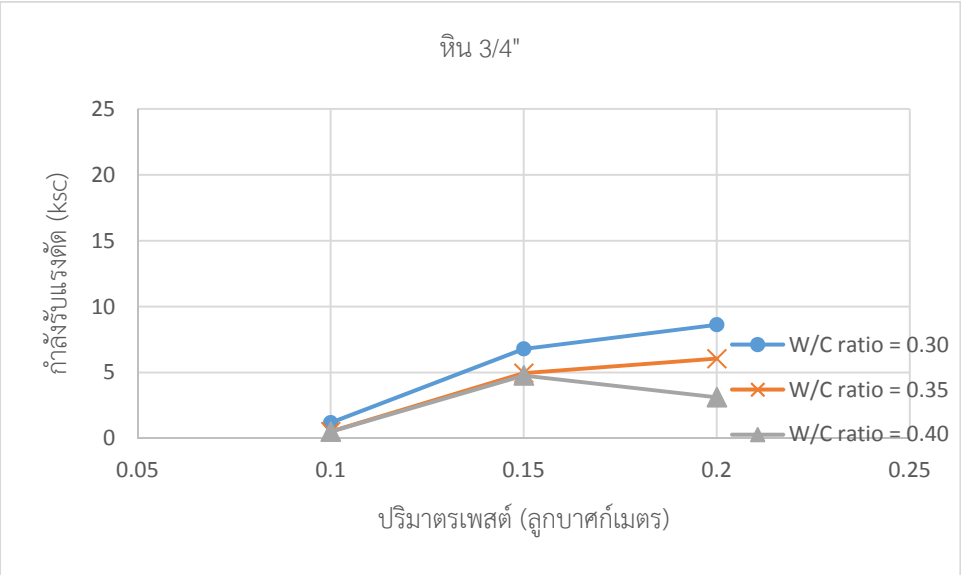
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด #4



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{8}$"



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{1}{2}$"



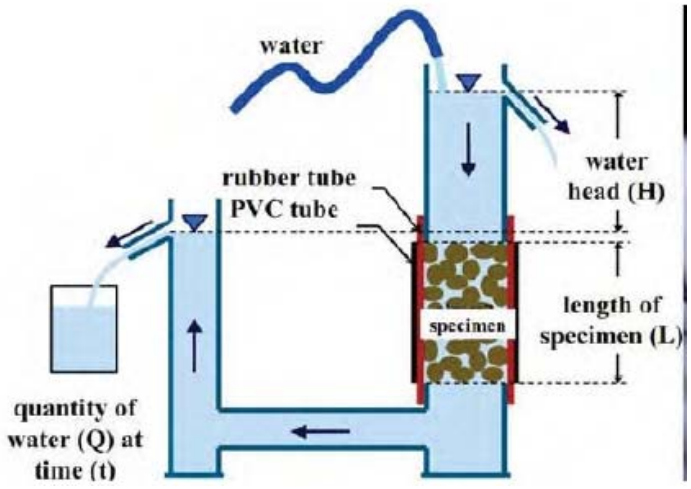
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับปริมาตรซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$"

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.2 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$"และ $\frac{3}{4}$" และกราฟแสดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ ของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมน พบว่าการเพิ่มปริมาตร

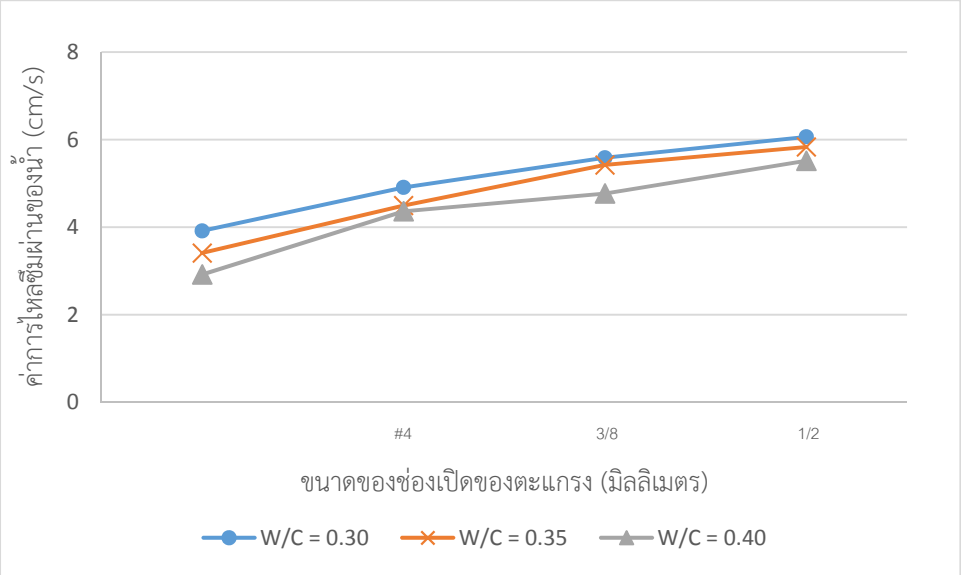
ซีเมนต์เพสต์จะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างมวลรวมหยาบหนาขึ้นและปริมาณโพรงหรือช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตพรุนมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ได้ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้น

4.4 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน

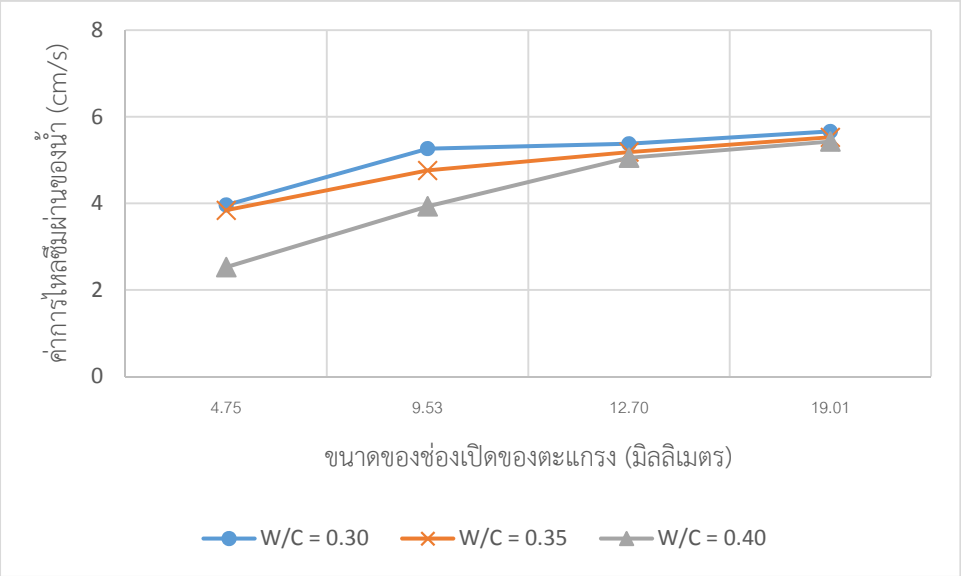
ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้วิธี Constant Head Method จากภาพที่ 4.23 4.24 และ 4.25 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดเล็กให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่มีค่าต่ำที่สุด และคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่มีค่ามากที่สุด โดยกราฟที่ 21 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 แยกค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่าง 1.918 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 6.063 เซนติเมตรต่อวินาที กราฟที่ 22 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15 แยกค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่าง 2.252 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 5.659 เซนติเมตรต่อวินาที กราฟที่ 23 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20 แยกค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่าง 2.289 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 5.651 เซนติเมตรต่อวินาที



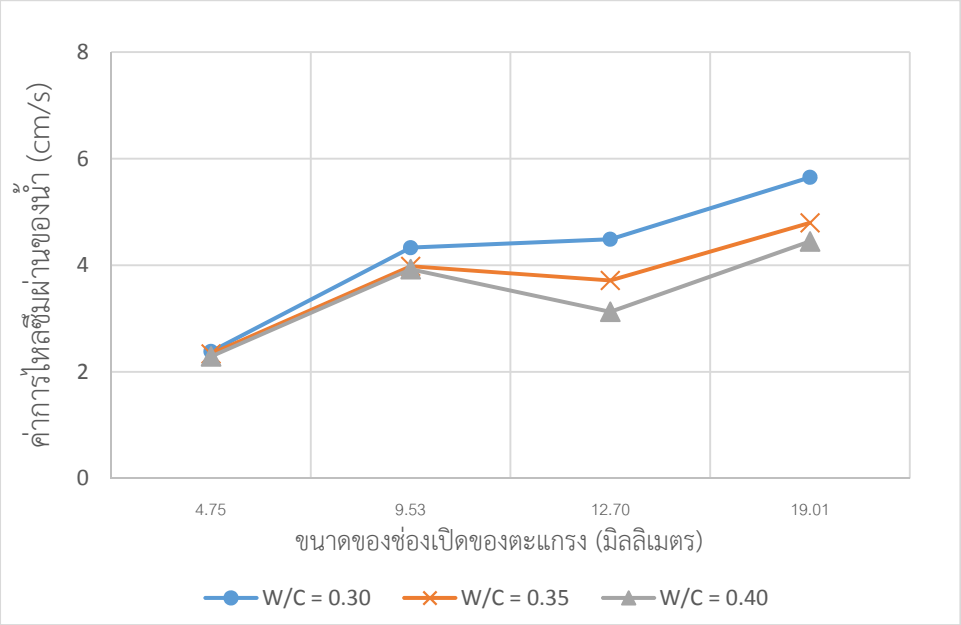
รูปที่ 4.22 เครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10



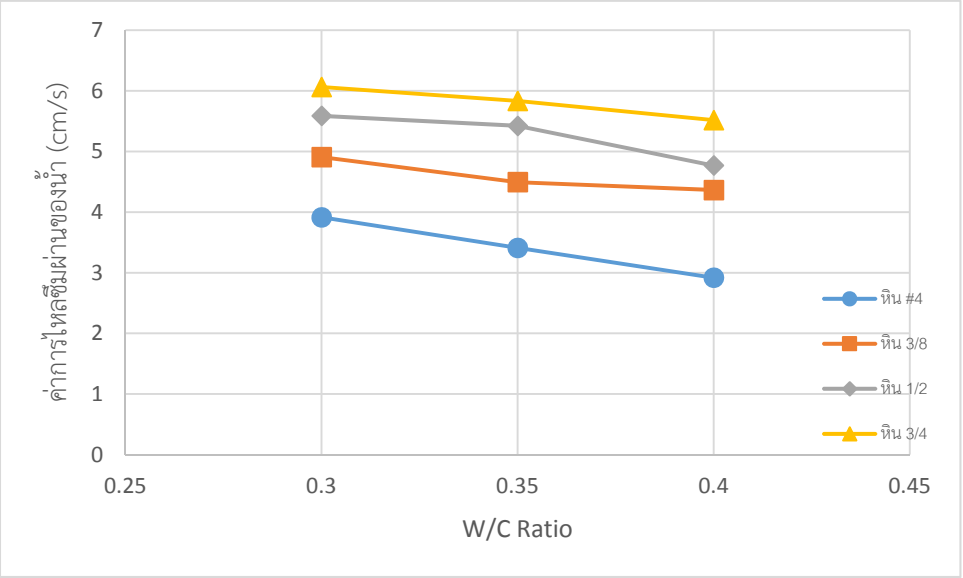
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15



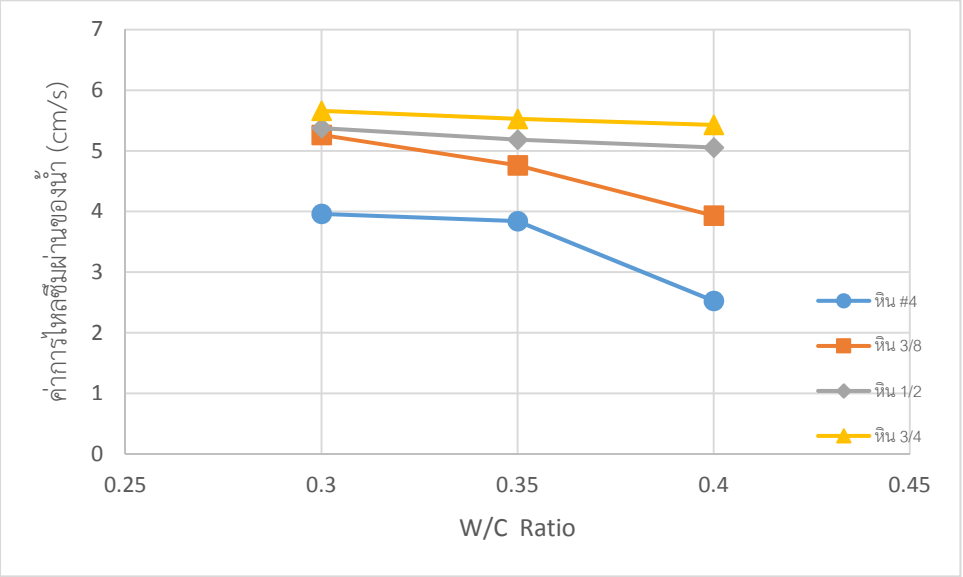
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20

จากความค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบ พบว่าขนาดของมวลรวมหยาบมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เนื่องจากมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กจะเรียงตัวในลักษณะอยู่ชิดการทำให้ช่องว่างหรือโพรงที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและไม่ต่อเนื่องกัน จึงส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำได้ช้า แต่มวลรวมขนาดใหญ่จะเรียงตัวในลักษณะห่างกันทำให้ช่องว่างหรือโพรงที่เกินขึ้นมีขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องกัน จึงส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำได้เร็วนั้นเอง

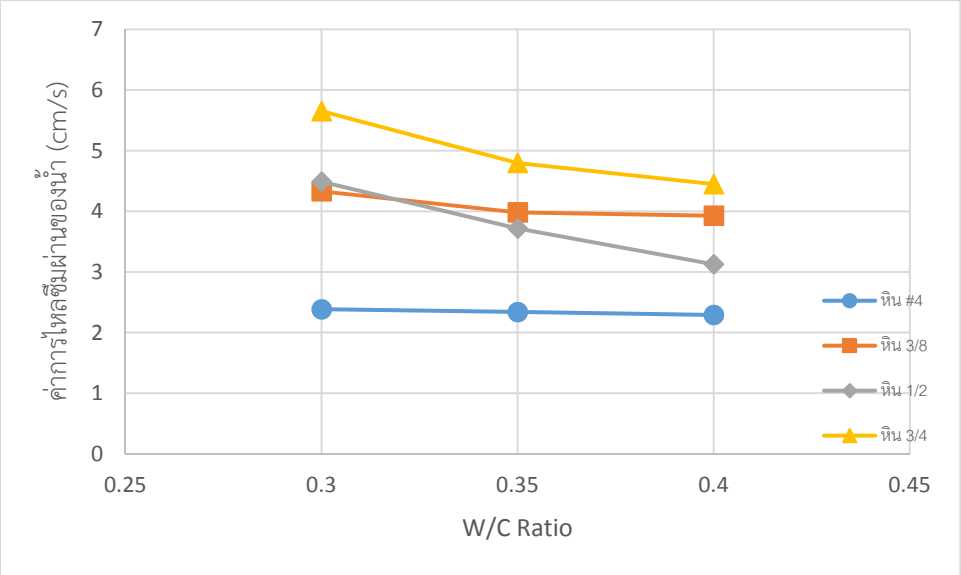
จากภาพที่ 4.26 4.27 และ 4.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีการลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยกราฟที่ 24 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.918 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 6.063 เซนติเมตรต่อวินาที กราฟที่ 25 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.525 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 5.659 เซนติเมตรต่อวินาที กราฟที่ 26 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20 แยกตามขนาดของมวลรวมหยาบตั้งแต่ขนาด #4 $\frac{3}{8}$" $\frac{1}{2}$" และ $\frac{3}{4}$" ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.289 เซนติเมตรต่อวินาที ถึง 5.651 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10



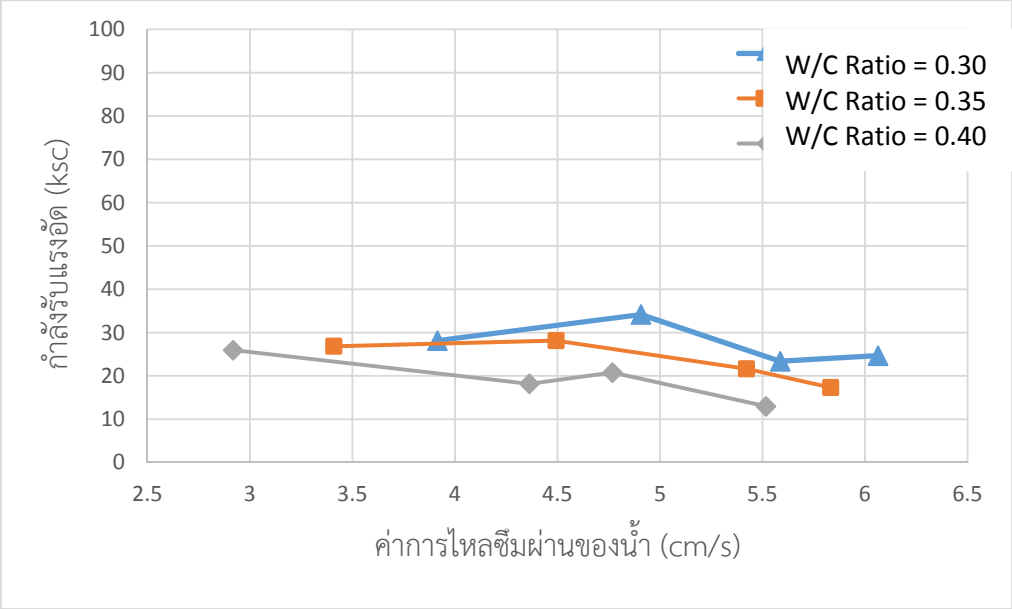
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15



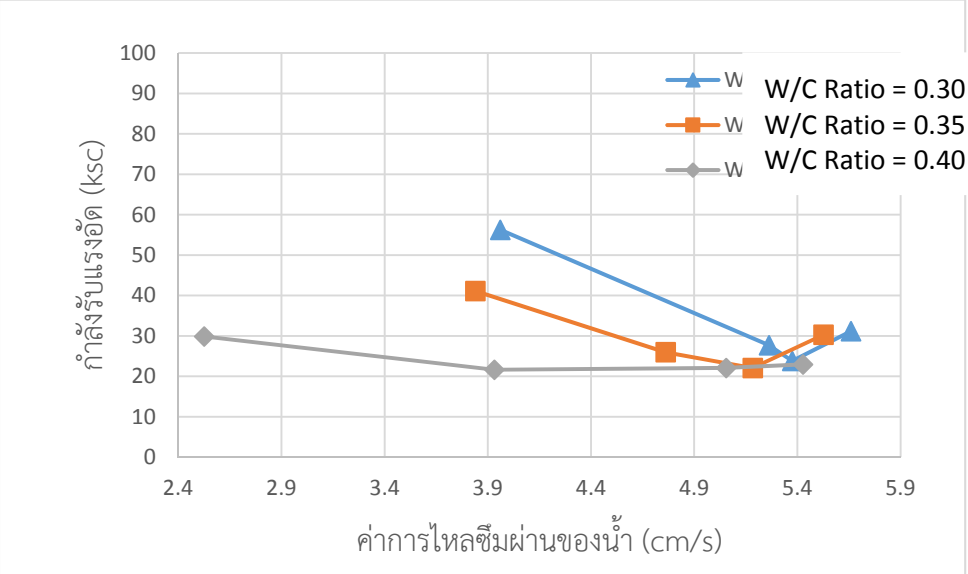
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์จะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมลงในคอนกรีตพรุนมีค่าความข้นเหลวที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ไปเคลือบผิวของมวลรวมหยาบมีการไหลของซีเมนต์เพสต์ไปอุดตันช่องว่างหรือโพลงภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำนั้นลดลง

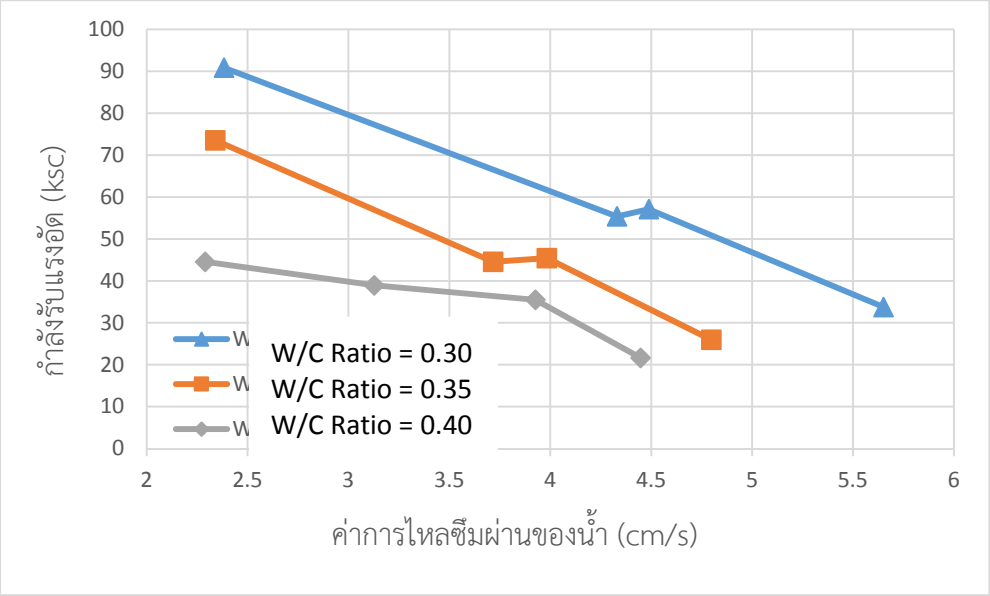
จากรูปภาพ 4.29 4.30 และ 4.31 .แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนจะลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น โดยกราฟที่ 27 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.10 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.918 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 25.957 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 6.063 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 24.660 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กราฟที่ 28 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.15 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.525 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 56.242 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5.659 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 31.150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กราฟที่ 29 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.20 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.289 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 44.561 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5.651 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 21.632 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15

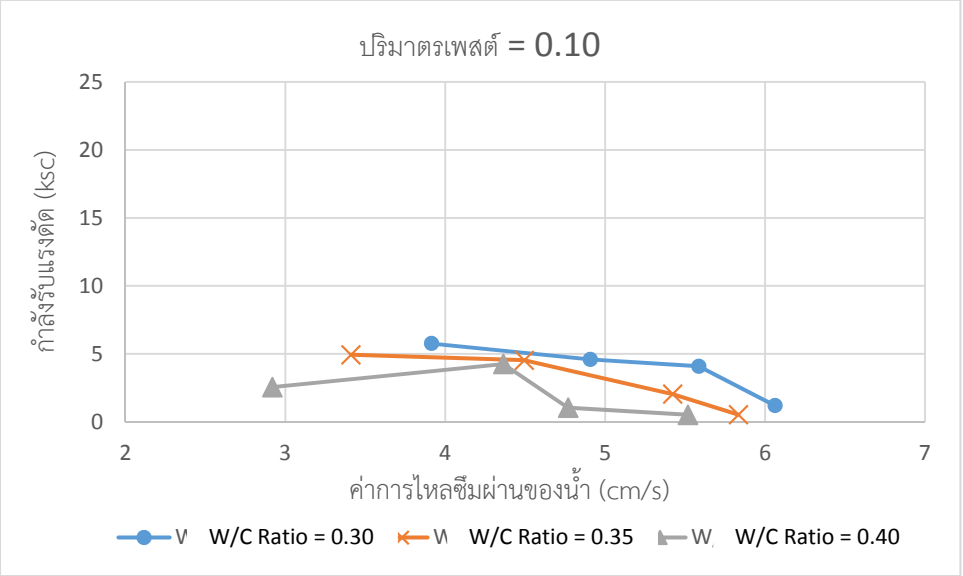


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20

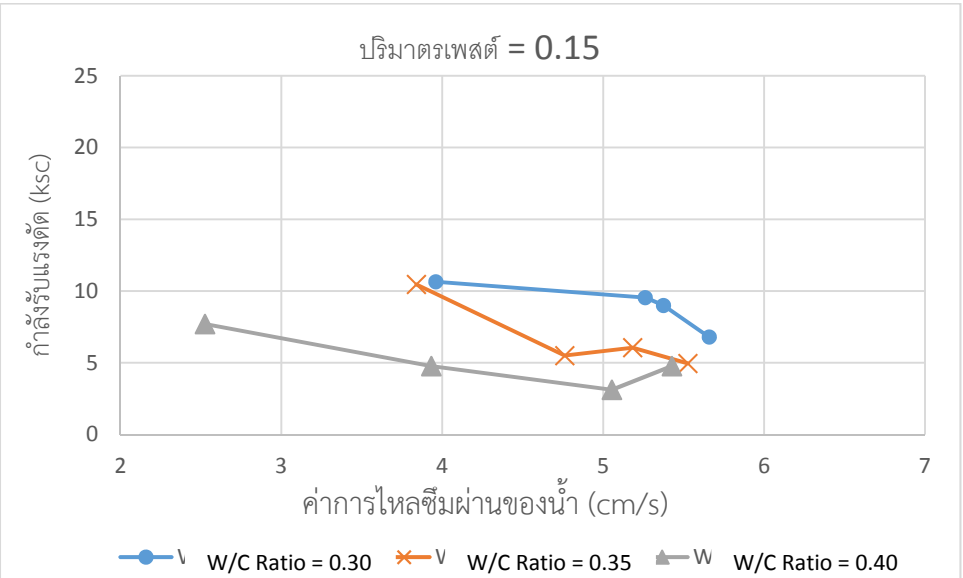
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 0.15 และ 0.20 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 0.35 และ 0.40 พบว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงและเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์เพสต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ทำให้โพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลง อาจจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงและมีความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องดังที่อธิบายมาก่อนหน้านี้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด และตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด เนื่องค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะของโพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตพรุน ลักษณะพื้นผิวของมวลรวม เป็นต้น

จากรูปภาพ 4.32 4.33 และ 4.34 .แสดงค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพรุนจะลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น โดยกราฟที่ 30 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.10 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.918 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงดัด 2.548 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 6.063 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 1.189 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กราฟที่ 31 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.15 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.525 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 10.642 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5.659 เซนติเมตร

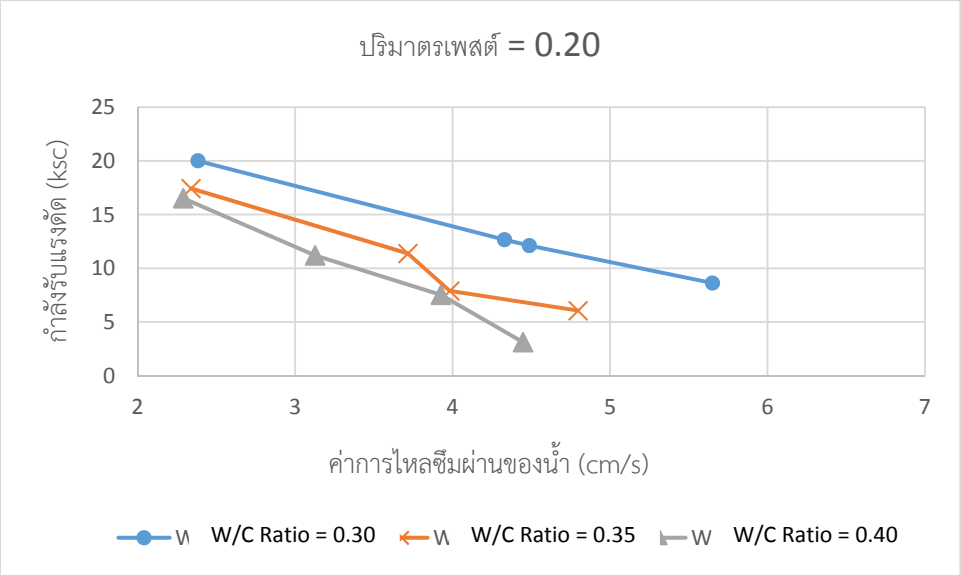
ต่อวินาที ที่กำลังรับแรงดัด 6.789 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กราฟที่ 32 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.20 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำตั้งแต่ 2.289 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 16.514 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 5.651 เซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลังรับแรงอัด 3.119 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10

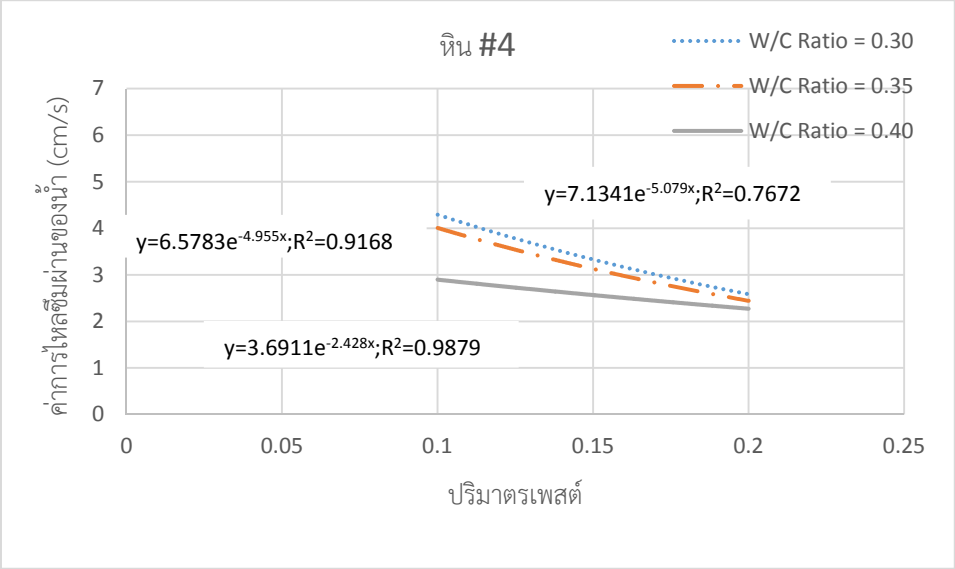


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.15

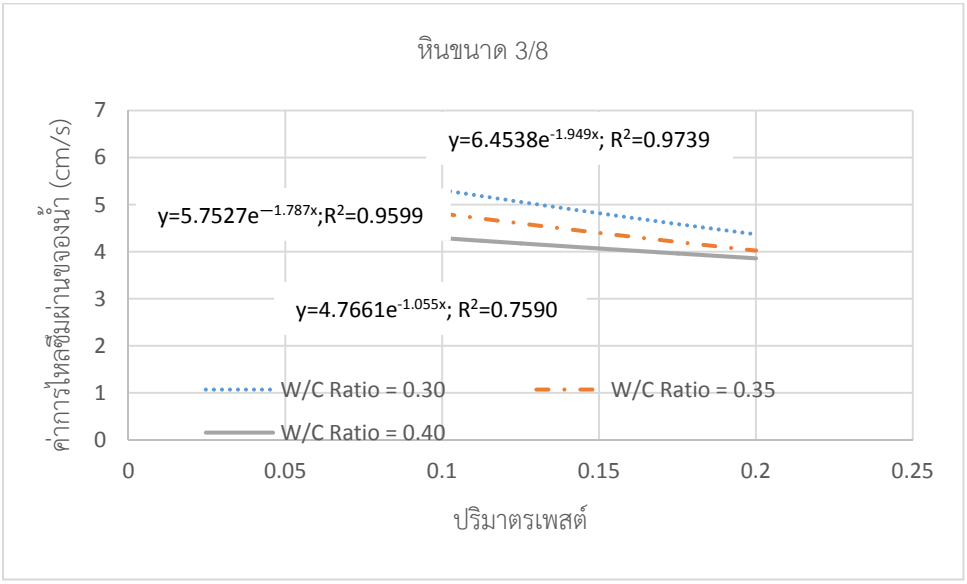


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.20

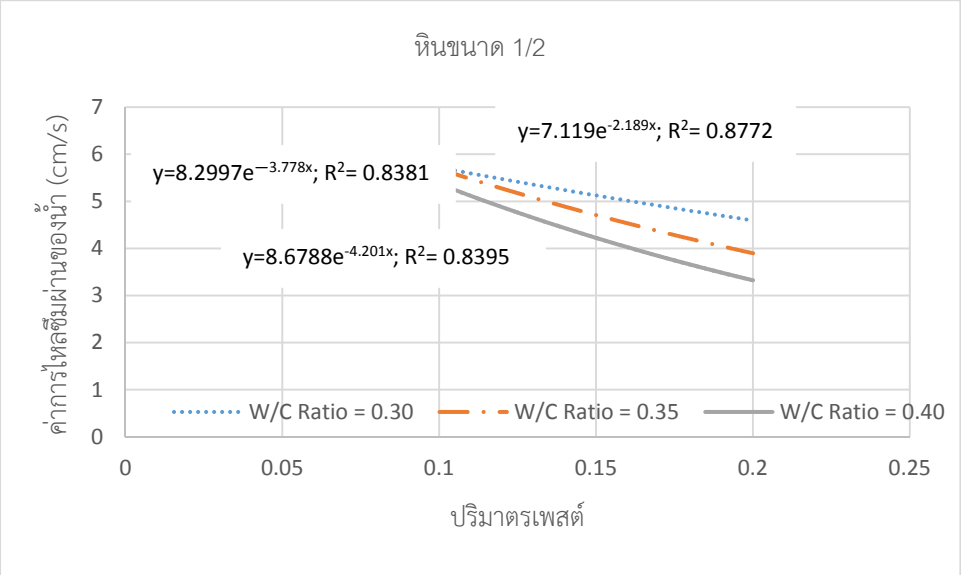
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใน ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10 0.15 และ 0.20 แยกตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 0.35 และ 0.40 พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ค่าการซึมผ่านของน้ำกับกำลังรับแรงดัดเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับกราฟความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังรับแรงอัด นั่นคือเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงดัดจะลดลงและเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงค่ากำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์เพสต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ทำให้โพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลง อาจจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงและมีความต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อคอนกรีต แต่ถึงอย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำที่สุด และตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุดด้วย เนื่องค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะของโพรงหรือช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตพรุน ลักษณะพื้นผิวของมวลรวม เป็นต้น



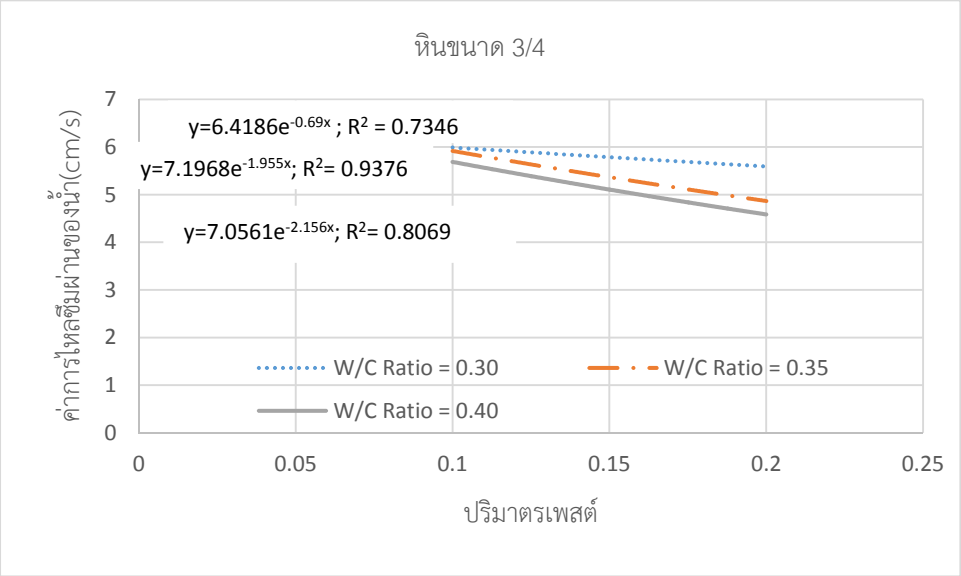
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด #4



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{8}$ "



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{1}{2}$ "



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลซึมผ่านของน้ำและปริมาตรซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{4}$ "

จากภาพ 4.35 4.36 4.37 และ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำกับปริมาณซีเมนต์เพสต์เป็นสมการเลขชี้กำลัง

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนขึ้นอยู่กับขนาดของหินและปริมาตรเพสต์ซึ่งเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติในปริมาณที่เท่ากัน คอนกรีตพรุนจะมีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตปกติซึ่งเป็นผลจากช่องว่างในคอนกรีตพรุน อีกทั้งค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนขึ้นอยู่กับขนาดของหินที่ใช้ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดที่เกิดจากขนาดของหินจะแปรผกผันกับค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนอย่างเช่นหินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีกำลังอัดสูงที่สุดแต่มีค่าการซึมผ่านของน้ำน้อยที่สุด เพราะถ้ายิ่งหินขนาดเล็กคอนกรีตพรุนจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าเนื่องจากหินขนาดเล็กนั้นสามารถเข้าไปแทรกแซงช่องว่างได้ดีกว่าหินขนาดใหญ่แต่การแทรกแซงเข้าไปนั้นทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง น้ำจะมีระยะทางในการไหลที่ไกลมากขึ้นความพรุนก็จะน้อยลงเช่นเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุน ค่ากำลังรับแรงอัดและดัดของคอนกรีตพรุนที่น้อยกว่าคอนกรีตปกตินอกจากเกิดจากขนาดหินและปริมาตรเพสต์ยังเกิดจากปัจจัยอีกหลายประการได้ เช่น ในการผสมเมื่อถึงขั้นตอนการกระทุ้งคอนกรีตนั้นผู้ทำการทดลองอาจจะใส่แรงกระทุ้งไม่เท่ากัน ความแน่นของคอนกรีตก็จะไม่เท่ากัน และคอนกรีตพรุนซึ่งไม่มีมวลรวมละเอียดปนอยู่ ทำให้การกระทุ้งให้แน่นนั้นเป็นไปได้ยากกว่าปกติ ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนอยู่ในช่วง 2.3 - 6.10 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $2x10^{-12}$ ถึง $5x10^{-12}$ cm/s ในช่วง W/C Ratio เท่า ๆ กัน (ที่มา: Concrete TechnologyCPAC & Tpipolene Sungkomonline) และดินจะมีค่าน้อยกว่ามากโดยดินเหนียวมีค่าในช่วง 10^{-6}-10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที ทรายละเอียดมีค่าในช่วง 10^{-3} - 10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ทรายหยาบมีค่าในช่วง 1 - 10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที กรวด มีค่าในชวง 1-10^{2} เซนติเมตรต่อวินาที (ที่มา: สำราญ ยอดอุปภัมถ์. ปฐพีกลศาสตร์เบื้องต้น. 2543. หน้า 122)

จากกราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรง จะได้ว่าขนาดของมวลรวมหยาบแปรผกผันกับกำลังรับแรงของคอนกรีตพรุน ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดเท่ากับ 90.893 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดเท่ากับ 20.000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ได้จากมวลรวมหยาบขนาดเล็กและกำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุดเท่ากับ 12.979 กิโลกรับต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงดัดมากที่สุดเท่ากับ 0.510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ได้จากมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับซีเมนต์เพสต์น้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก ทำให้ค่ากำลังรับแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อ

ขนาดของมวลรวมหยาบมีขนาดโตขึ้น ดังนั้นปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ผสมจะมีส่วนสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตพรุนโดยตรง เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมหยาบมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ไปเคลือบมวลรวมหยาบแต่ละขนาดหรือรูปร่างมีค่าไม่เท่ากัน จากกราฟความสัมพันธ์ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดมวลรวมหยาบเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ลักษณะพื้นผิวของมวลรวมหยาบ ความต่อเนื่องของโพรง และปริมาณซีเมนต์เพสต์ เป็นต้น จากผลการทดสอบยังบอกได้อีกว่าตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดหรือกำลังรับแรงดัดที่ต่ำที่สุด และตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำที่สุดก็ไม่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดหรือกำลังรับแรงดัดที่สูงที่สุดด้วย เนื่องค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คอนกรีตพรุนอาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นอิฐบล็อคหรือตัวหนอนทำทางเท้าเพื่อให้เกิดประโยชน์ในทางที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย เงาะปก. (2550). การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพรุนที่ผสมเถ้าลอย วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร; และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2556). คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และ คอนกรีต. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระ จอมเกล้าธนบุรี.

ปริญญา จินดาประเสริฐ; และ ยุวดี แซ่ตั้ง. (2553). เทคโนโลยีคอนกรีตพรุน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. ปีที่ 39, ฉบับที่ 2 (เม.ย.-มิ.ย. 2553), หน้า 59-82.

วันชัย สะตะ. (2556). การใช้วัสดุเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชัชวาล ศรีสุภร. (2547). การศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในปูนฉาบเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ACI 522R-10, (2010), Report on pervious concrete, American Concrete Institute.

ASTM C29/C29M-97a, (2001), Standard Test Method for Unit Weigth and Voids in Aggregate, American Society for Testing and Materials.

ASTM C33/C33M-11, (2011), Standard Specification for Concrete Aggregetes, American Society for Testing and Materials.

ASTM C39-10, (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials.

ASTM C78, (2010), Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete, American Society for Testing and Materials

ASTM C127-07, (2007), Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gracity) and Absorption of Coarse Aggregate, American Society for Testing and Materials.

ASTM C131-96, (2001), Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Ageles Machine, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM C131-06, (2006), Standard Test Method for Sievi Analysis of Fine and Coarse Aggregate,Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM 143, (2010), Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM C150/C150M, (2011), Standard Specification for Portland Cement, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM C535-96, (2001), Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Adrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM C702-98, (2001), Standard Practice for Reducing Samples of Aggregates to Testing Size, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM D075-95, (2001), Standard Practice for Sampling Aggegate, Ameriican Society for Testing and Materials.

ASTM D243-68, (2006), Standard Test Method for Permeability of Granular Soils, Ameriican Society for Testing and Materials.

Chindaprasirt, P., Hatanaka, s., Mishima, N., Yuasa, Y., and Chareerat, T.,(2009). Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and voi ratio of porous concrete. Matallurgy and Materials. 16(6), 714-719

Ludirdja D, Berger RL, Young JF. (1989). Simple method for measuring water permeability of concrete. ACI Materials Journal.

Benthia N, Mindess S. (1989). Water permeability of cement paste.

EI-Dieb AS, Hootoo RD. (1994). A high pressure triaxial cell with improved measurement sensitivity for saturated water permeability of high performance concrete.

Li Z, Chau CK. (2000). New water permeability test scheme for concrete. ACI Materials Journal.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
(ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ)

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหาโมดูลัสความละเอียดของหิน

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักตะแกรง (กก.)	น้ำหนักตะแกรง + น้ำหนักหิน (กก.)	น้ำหนักค้าง (กก.)	ร้อยละค้าง (%)	ร้อยละค้างสะสม (%)	ร้อยละผ่านสะสม (%)
1 นิ้ว	25.4	5.315	5.315	0.000	0.000	0.000	100.000
3/4 นิ้ว	19.1	5.585	5.780	0.195	10.900	10.900	89.100
1/2 นิ้ว	12.7	5.983	8.590	2.607	60.140	71.040	28.960
3/8 นิ้ว	9.53	5.780	6.295	0.515	13.300	84.340	15.660
เบอร์ 4	4.75	5.735	7.305	1.570	15.200	99.540	0.460
Pan	-	5.040	-	-	-	-	-
น้ำหนักมวลรวมหยาบ = 5 กก.						รวม = 265.820	
โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 265.82/100 = 2.6582							

โมดูลัสความละเอียด = ผลรวมของร้อยละค้างสะสม/100

= 265.82/100

= 2.65

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของหิน

A : น้ำหนักของหินหลังจากการอบแห้ง ชั่งในอากาศ (ก.)	=	2,978
B: น้ำหนักของหินในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ชั่งในอากาศ (ก.)	=	3,000
C: น้ำหนักของหินในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ชั่งในน้ำ (ก.)	=	1,875
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity) = A/(B-C)	=	2.65
ความถ่วงจำเพาะรวม - อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity, SSD) = B/(B-C) =		2.67
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) = A/(A-C)	=	2.70
ร้อยละการดูดน้ำของหิน (Absorption) =[(B-A)/A)] x100%	=	0.74

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลทั่วไปการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวม

ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง Mold (cm)	ความสูง Mold (cm)	น้ำหนักโมล (kg)	น้ำหนักโมล+น้ำ (kg)	น้ำหนักน้ำ (kg)
1	20	22.5	3.72	10.79	7.07
2	26	30.2	8.33	24.38	16.05
3	36	30.5	15.76	47.05	31.29

หมายเหตุ: อุณหภูมิของน้ำเป็น 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความหนาแน่น เป็น 995.7 kg/m^3

ตาราง ก-4 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินเบอร์ #4

ตัวอย่างที่	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	#4	3.72	13.52	9.80	0.00707	1,912.306	28.868
2	#4	8.30	28.46	20.16	0.01605	1,773.209	34.042
3	#4	15.76	55.02	39.26	0.03129	1,758.389	34.593

ตาราง ก-5 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{8}$"

ตัวอย่างที่	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	$\frac{3}{8}$	3.72	13.36	9.64	0.00707	1,889.675	29.710
2	$\frac{3}{8}$	8.30	28.2	19.9	0.01605	1,757.009	34.645
3	$\frac{3}{8}$	15.76	56.86	41.1	0.03129	1,817.194	32.406

ตาราง ก-6ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{1}{2}$"

ตัวอย่างที่	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	$\frac{1}{2}$	3.72	13.19	9.47	0.00707	1,865.629	30.604
2	$\frac{1}{2}$	8.30	27.88	19.58	0.01605	1,737.072	35.386
3	$\frac{1}{2}$	15.76	54.04	38.28	0.03129	1,727.069	35.758

ตาราง ก-7 ผลการทดสอบหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมของหินขนาด $\frac{3}{4}$ "

ตัวอย่างที่	ขนาดของหิน	น้ำหนัก Mold (kg)	น้ำหนักหิน+ Mold (kg)	น้ำหนักหิน (kg)	ปริมาตรของ Mold (m^3)	Unit Weight (kg/m^3)	Percent Void (%)
1	$\frac{3}{4}$	3.72	13.8	10.08	0.00707	1,951.909	27.395
2	$\frac{3}{4}$	8.30	28.35	20.05	0.01605	1,766.355	34.297
3	$\frac{3}{4}$	15.76	55.84	40.08	0.03129	1,784.596	33.618

ภาคผนวก ข
(ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต)

ตาราง ข-1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด #4

ขนาดหิน	ปริมาตรซีเมนต์เพสต์ (m^3)	W/C Ratio	ค่าการยุบตัว (cm)
#4	0.10	0.30	19
#4	0.10	0.35	20
#4	0.10	0.40	20.5
#4	0.15	0.30	17
#4	0.15	0.35	20
#4	0.15	0.40	20.5
#4	0.20	0.30	16
#4	0.20	0.35	19.5
#4	0.20	0.40	21

ตาราง ข-2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{8}$"

ขนาดหิน	ปริมาตรซีเมนต์เพสต์ (m^3)	W/C Ratio	ค่าการยุบตัว (cm)
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.30	19
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.35	19.5
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.40	20
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.30	18.5
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.35	19
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.40	19.5
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.30	18.5
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.35	19
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.40	20.5

ตาราง ข-3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{1}{2}$ "

ขนาดหิน	ปริมาตรซีเมนต์เพสต์ (m^3)	W/C Ratio	ค่าการยุบตัว (cm)
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.30	19.5
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.35	19.5
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.40	21.5
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.30	15.6
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.35	18
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.40	20
$\frac{1}{2}$ "	0.20	0.30	17
$\frac{1}{2}$ "	0.20	0.35	20
$\frac{1}{2}$ "	0.20	0.40	20

ตาราง ข-4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินขนาด $\frac{3}{4}$ "

ขนาดหิน	ปริมาตรซีเมนต์เพสต์ (m^3)	W/C ratio	ค่าการยุบตัว (cm)
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.30	12
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.35	15
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.40	18
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.30	15.5
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.35	19.5
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.40	20
$\frac{3}{4}$ "	0.20	0.30	15

ขนาดหิน	ปริมาตรซีเมนต์เพสต์ (m^3)	W/C ratio	ค่าการยุบตัว (cm)
$\frac{3}{4}$ "	0.20	0.35	18
$\frac{3}{4}$ "	0.20	0.40	20

ภาคผนวก ค

(ผลการทดสอบกำลังรับแรงและการไหลซึมผ่านของน้ำ)

ตัวอย่างการคำนวณค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (k)

จากสูตร $k = \frac{QL}{HAt}$

ตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่มีขนาดหิน #4 ปริมาตรเพสต์ = 0.10 และ W/c ratio = 0.30

ค่า L = 10 cm , A = $(\frac{\pi x 8^2}{4})$ = 50.265 cm , Q = 1000 cm^3 , H = 5.20 cm , t = 11.28 s

ดังนั้น k = $\frac{1000x10}{5.20*50.265*11.28}$ = 3.392 cm/s

ตาราง ค-1 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด #4

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
#4	0.10	0.30	5.20	1,000.00	11.28	3.392	
			5.20	1,000.00	11.11	3.444	3.410
			5.20	1,000.00	11.27	3.395	
#4	0.10	0.35	5.80	1,000.00	11.81	2.904	
			5.80	1,000.00	11.81	2.904	2.918
			5.80	1,000.00	11.65	2.944	
#4	0.10	0.40	4.60	1,000.00	11.01	3.928	
			4.60	1,000.00	11.06	3.910	3.914
			4.60	1,000.00	11.08	3.903	
#4	0.15	0.30	4.70	1,000.00	11.37	3.723	
			4.70	1,000.00	11.38	3.720	3.839
			4.70	1,000.00	10.39	4.074	
#4	0.15	0.35	4.70	1,000.00	10.75	3.938	
			4.70	1,000.00	10.65	3.975	3.960
			4.70	1,000.00	10.67	3.967	

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
#4	0.15	0.40	5.10	1,000.00	15.48	2.520	
			5.10	1,000.00	15.40	2.533	2.525
			5.10	1,000.00	15.47	2.522	
#4	0.20	0.30	5.20	1,000.00	16.64	2.299	
			5.20	1,000.00	16.80	2.277	2.289
			5.20	1,000.00	16.71	2.290	
#4	0.20	0.35	5.30	1,000.00	16.15	2.324	
			5.30	1,000.00	16.10	2.331	2.339
			5.30	1,000.00	15.90	2.361	
#4	0.20	0.40	5.40	1,000.00	15.45	2.385	
			5.40	1,000.00	15.60	2.362	2.383
			5.40	1,000.00	15.33	2.403	

ตาราง ค-2 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{3}{8}$"

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.30	5.50	1,000.00	8.13	4.449	
			5.50	1,000.00	8.02	4.510	4.494
			5.50	1,000.00	8.00	4.521	
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.35	5.80	1,000.00	7.74	4.432	
			5.80	1,000.00	7.88	4.353	4.363
			5.80	1,000.00	7.97	4.304	
$\frac{3}{8}$"	0.10	0.40	4.70	1,000.00	8.61	4.916	
			4.70	1,000.00	8.67	4.882	4.907
			4.70	1,000.00	8.60	4.922	
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.30	4.50	1,000.00	9.21	4.800	
			4.50	1,000.00	9.27	4.769	4.761
			4.50	1,000.00	9.38	4.713	
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.35	4.80	1,000.00	7.82	5.300	
			4.80	1,000.00	7.94	5.220	5.262
			4.80	1,000.00	7.87	5.266	
$\frac{3}{8}$"	0.15	0.40	5.80	1,000.00	8.65	3.965	
			5.80	1,000.00	8.75	3.920	3.931
			5.80	1,000.00	8.78	3.907	
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.30	4.80	1,000.00	10.65	3.892	
			4.80	1,000.00	10.61	3.906	3.926
			4.80	1,000.00	10.41	3.981	
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.35	4.70	1,000.00	10.53	4.020	
			4.70	1,000.00	10.65	3.975	3.982
			4.70	1,000.00	10.71	3.952	

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{3}{8}$"	0.20	0.40	4.70	1,000.00	13.55	3.124	
			4.70	1,000.00	13.55	3.124	3.127
			4.70	1,000.00	13.51	3.133	

ตาราง ค-3 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{1}{2}$ "

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.30	5.80	1,000.00	7.21	4.757	
			5.80	1,000.00	7.16	4.791	4.768
			5.80	1,000.00	7.21	4.757	
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.35	4.60	1,000.00	7.65	5.653	
			4.60	1,000.00	7.77	5.566	5.586
			4.60	1,000.00	7.81	5.538	
$\frac{1}{2}$ "	0.10	0.40	4.20	1,000.00	8.86	5.346	
			4.20	1,000.00	8.71	5.438	5.422
			4.20	1,000.00	8.64	5.482	
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.30	4.70	1,000.00	7.88	5.372	
			4.70	1,000.00	8.00	5.291	5.375
			4.70	1,000.00	7.75	5.462	
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.35	5.60	1,000.00	6.98	5.090	
			5.60	1,000.00	7.10	5.004	5.054
			5.60	1,000.00	7.01	5.068	
$\frac{1}{2}$ "	0.15	0.40	4.80	1,000.00	7.95	5.213	
			4.80	1,000.00	7.97	5.200	5.183
			4.80	1,000.00	8.07	5.136	
$\frac{1}{2}$ "	0.20	0.30	6.20	1,000.00	7.15	4.488	
			6.20	1,000.00	7.20	4.457	4.488
			6.20	1,000.00	7.10	4.519	
$\frac{1}{2}$ "	0.20	0.35	5.80	1,000.00	9.18	3.736	
			5.80	1,000.00	9.23	3.716	3.716
			5.80	1,000.00	9.28	3.696	

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{1}{2}$"	0.20	0.40	5.50	1,000.00	8.38	4.316	
			5.50	1,000.00	8.27	4.374	4.330
			5.50	1,000.00	8.41	4.301	

ตาราง ค-4 ผลการทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุนของหินขนาด $\frac{3}{4}$ "

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.30	5.50	1,000.00	6.50	5.565	
			5.50	1,000.00	6.57	5.506	5.517
			5.50	1,000.00	6.60	5.481	
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.35	5.40	1,000.00	6.31	5.839	
			5.40	1,000.00	6.37	5.784	5.833
			5.40	1,000.00	6.27	5.876	
$\frac{3}{4}$ "	0.10	0.40	5.40	1,000.00	6.10	6.040	
			5.40	1,000.00	6.08	6.059	6.063
			5.40	1,000.00	6.05	6.089	
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.30	5.30	1,000.00	6.68	5.619	
			5.30	1,000.00	6.61	5.679	5.659
			5.30	1,000.00	6.61	5.679	
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.35	5.20	1,000.00	7.08	5.404	
			5.20	1,000.00	7.00	5.465	5.427
			5.20	1,000.00	7.07	5.411	
$\frac{3}{4}$ "	0.15	0.40	4.40	1,000.00	8.15	5.548	
			4.40	1,000.00	8.27	5.467	5.526
			4.40	1,000.00	8.13	5.561	
$\frac{3}{4}$ "	0.20	0.30	5.30	1,000.00	7.68	4.888	
			5.30	1,000.00	7.91	4.745	4.797
			5.30	1,000.00	7.89	4.757	
$\frac{3}{4}$ "	0.20	0.35	5.30	1,000.00	6.71	5.594	
			5.30	1,000.00	6.65	5.645	5.651
			5.30	1,000.00	6.57	5.713	

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	H (cm)	Q (cm^3)	T (sec)	K (cm/s)	Average k (cm/s)
$\frac{3}{4}$"	0.20	0.40	6.50	1,000.00	6.84	4.475	
			6.50	1,000.00	6.90	4.436	4.447
			6.50	1,000.00	6.91	4.429	

ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของคอนกรีตพรุน

การคำนวณกำลังรับแรงอัด

จากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินขนาด #4 ปริมาตรเพสต์ = 0.10 w/c ratio =0.30

ค่าแรงกดที่อ่านได้จากเครื่อง = 20 KN พื้นที่หน้าตัดทรงกระบอก = $\frac{\pi x 10^2}{4}$ = 78.539 cm^2

ค่ากำลังรับแรงอัด = $((\frac{20x1000}{9.81}) / 78.539)$ = 25.958 kg/cm^2

การคำนวฯกำลังรับแรงดัด

จากตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้หินขนาด #4 ปริมาตรเพสต์ = 0.10 w/c ratio = 0.30

ค่าที่ได้จากการทดสอบ = 0.8 KN ความยาวคาน = 50 cm ความลึกคาน = 10 cm

ความกว้างคาน = 10 cm

เนื่องจากใช้การกดคานแบบสองจุดจึงใช้สูตร R = $\frac{PxL}{bd^2}$

b คือ ความกว้างเฉลี่ยนของคานบริเวณรอยแตก

d คือ ความลึกเฉลี่ยของคานบริเวณรอยแตก

L คือ ช่วงคานระหว่างจุดรองรับ

P คือ แรงกดสูงสุด

R คือ กำลังรับแรงดัด

ฉะนั้น R = $\frac{((\frac{0.8*1000}{9.81})x50)}{10x10^2}$ = 4.077 kg/cm^2

ตาราง ค-5 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด #4

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
#4	0.10	0.30	25.958	4.077	3.392
#4	0.10	0.30	32.447	2.548	3.444
#4	0.10	0.30	25.958	1.019	3.395
#4	0.10	0.35	27.256	6.116	2.904
#4	0.10	0.35	24.660	4.587	2.904
#4	0.10	0.35	28.554	4.077	2.944
#4	0.10	0.40	25.958	5.607	3.928
#4	0.10	0.40	28.554	5.607	3.910
#4	0.10	0.40	23.362	6.055	3.903
#4	0.15	0.30	64.895	10.459	3.723
#4	0.15	0.30	51.916	9.908	3.720
#4	0.15	0.30	51.916	11.560	4.074
#4	0.15	0.35	25.958	10.459	3.938
#4	0.15	0.35	28.554	11.009	3.975
#4	0.15	0.35	35.043	9.908	3.967
#4	0.15	0.40	45.426	7.156	2.520
#4	0.15	0.40	38.937	8.257	2.533
#4	0.15	0.40	38.937	7.706	2.522
#4	0.20	0.30	97.342	19.266	2.299
#4	0.20	0.30	97.342	13.761	2.277
#4	0.20	0.30	77.874	19.266	2.290
#4	0.20	0.35	36.341	13.761	2.324
#4	0.20	0.35	45.426	16.514	2.331

ขนาดหิน	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
#4	0.20	0.35	64.895	19.266	2.361
#4	0.20	0.40	77.874	21.468	2.385
#4	0.20	0.40	77.874	21.468	2.362
#4	0.20	0.40	64.895	19.266	2.403

ตาราง ค-6 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{3}{8}$"

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{8}$	0.10	0.30	12.979	2.752	4.449
$\frac{3}{8}$	0.10	0.30	22.064	5.505	4.510
$\frac{3}{8}$	0.10	0.30	19.468	4.404	4.521
$\frac{3}{8}$	0.10	0.35	37.639	5.505	4.432
$\frac{3}{8}$	0.10	0.35	38.937	4.404	4.353
$\frac{3}{8}$	0.10	0.35	38.937	4.404	4.304
$\frac{3}{8}$	0.10	0.40	25.958	5.505	4.916
$\frac{3}{8}$	0.10	0.40	32.447	4.404	4.882
$\frac{3}{8}$	0.10	0.40	25.958	4.404	4.922
$\frac{3}{8}$	0.15	0.30	25.958	7.706	4.800
$\frac{3}{8}$	0.15	0.30	25.958	9.358	4.769
$\frac{3}{8}$	0.15	0.30	25.958	11.560	4.713
$\frac{3}{8}$	0.15	0.35	12.979	4.954	5.300
$\frac{3}{8}$	0.15	0.35	25.958	5.505	5.220

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{8}$	0.15	0.35	25.958	6.055	5.266
$\frac{3}{8}$	0.15	0.40	25.958	5.505	3.965
$\frac{3}{8}$	0.15	0.40	28.554	4.954	3.920
$\frac{3}{8}$	0.15	0.40	28.554	3.853	3.907
$\frac{3}{8}$	0.20	0.30	49.320	14.312	3.892
$\frac{3}{8}$	0.20	0.30	38.937	12.110	3.906
$\frac{3}{8}$	0.20	0.30	45.426	13.211	3.981
$\frac{3}{8}$	0.20	0.35	38.937	11.560	4.020
$\frac{3}{8}$	0.20	0.35	32.447	9.908	3.975
$\frac{3}{8}$	0.20	0.35	35.043	10.459	3.952
$\frac{3}{8}$	0.20	0.40	51.916	12.661	3.124
$\frac{3}{8}$	0.20	0.40	55.810	9.908	3.124
$\frac{3}{8}$	0.20	0.40	58.405	11.009	3.133

ตาราง ค-7 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{1}{2}$ "

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{1}{2}$	0.10	0.30	19.468	2.752	4.757
$\frac{1}{2}$	0.10	0.30	23.362	3.303	4.791
$\frac{1}{2}$	0.10	0.30	19.468	0.550	4.757
$\frac{1}{2}$	0.10	0.35	23.362	1.651	5.653
$\frac{1}{2}$	0.10	0.35	23.362	5.505	5.566
$\frac{1}{2}$	0.10	0.35	23.362	6.055	5.538
$\frac{1}{2}$	0.10	0.40	19.468	1.651	5.346
$\frac{1}{2}$	0.10	0.40	19.468	1.101	5.438
$\frac{1}{2}$	0.10	0.40	25.958	0.550	5.482
$\frac{1}{2}$	0.15	0.30	23.362	5.505	5.372
$\frac{1}{2}$	0.15	0.30	19.468	11.009	5.291
$\frac{1}{2}$	0.15	0.30	23.362	10.459	5.462
$\frac{1}{2}$	0.15	0.35	19.468	1.651	5.090
$\frac{1}{2}$	0.15	0.35	23.362	3.853	5.004
$\frac{1}{2}$	0.15	0.35	23.362	3.853	5.068
$\frac{1}{2}$	0.15	0.40	24.660	5.505	5.213
$\frac{1}{2}$	0.15	0.40	23.362	6.055	5.200
$\frac{1}{2}$	0.15	0.40	23.362	6.606	5.136
$\frac{1}{2}$	0.20	0.30	38.937	11.394	4.488
$\frac{1}{2}$	0.20	0.30	64.895	13.761	4.457

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{1}{2}$	0.20	0.30	67.491	13.541	4.519
$\frac{1}{2}$	0.20	0.35	58.405	15.963	3.736
$\frac{1}{2}$	0.20	0.35	32.447	9.358	3.716
$\frac{1}{2}$	0.20	0.35	45.426	11.009	3.696
$\frac{1}{2}$	0.20	0.40	45.426	5.505	4.316
$\frac{1}{2}$	0.20	0.40	45.426	6.606	4.374
$\frac{1}{2}$	0.20	0.40	25.958	10.459	4.301

ตาราง ค-8 ผลการทดสอบของตัวอย่าง 3 ตัวอย่างของหินขนาด $\frac{3}{4}$ "

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{4}$	0.10	0.30	19.468	0.550	5.565
$\frac{3}{4}$	0.10	0.30	19.468	0.550	5.506
$\frac{3}{4}$	0.10	0.30	12.979	0.550	5.481
$\frac{3}{4}$	0.10	0.35	24.660	2.752	5.839
$\frac{3}{4}$	0.10	0.35	24.660	0.550	5.784
$\frac{3}{4}$	0.10	0.35	24.660	0.550	5.876
$\frac{3}{4}$	0.10	0.40	1.168	0.550	6.040
$\frac{3}{4}$	0.10	0.40	12.979	0.550	6.059
$\frac{3}{4}$	0.10	0.40	14.277	0.550	6.089
$\frac{3}{4}$	0.15	0.30	28.554	5.505	5.619

ขนาดหิน (นิ้ว)	ปริมาตรเพสต์ (m^3)	W/C Ratio	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	กำลังรับแรงดัด (kg/cm^2)	ค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (cm/s)
$\frac{3}{4}$	0.15	0.30	38.937	9.358	5.679
$\frac{3}{4}$	0.15	0.30	25.958	5.505	5.679
$\frac{3}{4}$	0.15	0.35	38.937	5.505	5.404
$\frac{3}{4}$	0.15	0.35	25.958	5.505	5.465
$\frac{3}{4}$	0.15	0.35	25.958	3.303	5.411
$\frac{3}{4}$	0.15	0.40	25.958	4.404	5.548
$\frac{3}{4}$	0.15	0.40	23.362	4.954	5.467
$\frac{3}{4}$	0.15	0.40	19.468	5.505	5.561
$\frac{3}{4}$	0.20	0.30	24.660	8.257	4.888
$\frac{3}{4}$	0.20	0.30	24.660	4.404	4.745
$\frac{3}{4}$	0.20	0.30	28.554	5.505	4.757
$\frac{3}{4}$	0.20	0.35	23.362	2.752	5.594
$\frac{3}{4}$	0.20	0.35	22.064	2.752	5.645
$\frac{3}{4}$	0.20	0.35	19.468	3.853	5.713
$\frac{3}{4}$	0.20	0.40	32.447	6.606	4.475
$\frac{3}{4}$	0.20	0.40	38.937	9.358	4.436
$\frac{3}{4}$	0.20	0.40	36.341	9.908	4.429

ประวัติย่อผู้จัดทำโครงงาน

ประวัติย่อผู้จัดทำโครงงาน

ชื่อชื่อสกุล	นายจักรพงษ์ ยุพการณ์
วันเดือนปีเกิด	18 มิถุนายน 2537
สถานที่เกิด	สุรินทร์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	133 หมู่ที่ 1 ตำบลธาตุ อำเภอรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ 32130
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	0801602158

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนรัตนบุรี
พ.ศ. 2556	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อผู้จัดทำโครงงาน

ชื่อชื่อสกุล	นายวทัญญู แก้วเกษมชาญชัย
วันเดือนปีเกิด	22 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	ราชบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	6 หมู่ที่ 7 ตำบลศรีสุราษฎร์ อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี 70130
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	0894150679

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี
พ.ศ. 2556	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประวัติย่อผู้จัดทำโครงงาน

ชื่อชื่อสกุล	นายวรวัฒน์ หอมชื่นใจ
วันเดือนปีเกิด	21 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	เขตพญาไท กรุงเทพฯ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	444/142 หมู่ที่ 12 ต.บางพลีใหญ่
	อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ
	10540
หมายเลขโทรศัพท์ติดต่อ	0806285554

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนปทุมคงคา
พ.ศ. 2556	กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ