

การพัฒนาฝาที่ระบายน้ำชนิดคอนกรีตพรุน

DEVELOPMENT OF POROUS CONCRETE FOR DRAINAGE COVER

ชรินทร์ ทิมแก้ว

ตะวัน อุกฤษต์

ปณิธาน ภูจันทร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF POROUS CONCRETE FOR DRAINAGE COVER

CHANIN TIMKAEW

TAWAN AUKIT

PANITHAN PUCHAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาฝาท่อระบายน้ำชนิดคอนกรีตพรุน
DEVELOPMENT OF POROUS CONCRETE FOR DRAINAGE COVER

นักศึกษา นายชินทร์ ทิมแก้ว รหัสนักศึกษา 63015035
นายตะวัน อุกฤษต์ รหัสนักศึกษา 63015053
นายปณิธาน ภูจันทร์ รหัสนักศึกษา 63015106

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

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

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รศ.ดร.ชลิตา อู่ตะเภา)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาฝาท่อระบายน้ำชนิดคอนกรีตพรุน

นายชินนทร์ ทิมแก้ว รหัสนักศึกษา 63015035

นายตะวัน อุกฤษต์ รหัสนักศึกษา 63015053

นายปณิธาน ภูจันทร์ รหัสนักศึกษา 63015106

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

คอนกรีตพรุน คือ คอนกรีตมวลเบาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป คือภายในเนื้อคอนกรีตมีรูพรุนและโพรงที่ต่อเนื่องในปริมาณมากซึ่งยอมให้อากาศหรือน้ำไหลผ่านได้ จากที่มีโพรงในเนื้อคอนกรีตมากทำให้คอนกรีตพรุนมีน้ำหนักที่เบาและกำลังต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ในต่างประเทศ เช่น อังกฤษ อเมริกา และญี่ปุ่น มีการนำคอนกรีตพรุนมาใช้ในงานก่อสร้างมากกว่า 40 ปี (ACI 522, 2010; Schaefer et al., 2006) ดังนั้นในงานวิจัยในโครงการนี้จะมุ่งเน้นไปในการพัฒนาส่วนผสมซึ่งมีการนำไมโครซิลิกา มาผสมร่วมด้วย เพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านการรับกำลังของคอนกรีตพรุน ทั้งแรงอัด และ แรงดัด อีกทั้งยังคงคุณสมบัติด้านการซึมผ่านน้ำที่ไว้ด้วย โดยคอนกรีตพรุนที่เราได้ทำการพัฒนานี้จะนำมาทำเป็นฝาท่อระบายน้ำเพื่อนำมาทดลองใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังก่อน โดยจุดหมายของคณะผู้จัดทำคือการแก้ไขปัญหาเรื่องการระบายน้ำลงท่อระบายน้ำไม่ทันในกรุงเทพมหานคร ซึ่งทางคณะผู้จัดทำคาดหวังว่าฝาท่อระบายน้ำจากคอนกรีตพรุนที่ถูกพัฒนาจะสามารถทำให้น้ำท่วมขังระบายลงท่อระบายน้ำได้เร็วมากยิ่งขึ้นอีกทั้งยังมีความแข็งแรงทนทานมากกว่าคอนกรีตพรุนทั่วๆอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF POROUS CONCRETE FOR DRAINAGE COVER

Mr.Chanin Timkaew Student ID 63015035

Mr.Tawan Aukit Student ID 63015053

Mr.Panithan Puchan Student ID 63015106

Advisor: Asst. Prof. Dr. Rattapoom Parichatprecha

Academic Year 2022

ABSTRACT

Porous Concrete is a type of aerated concrete that has a special feature that differs from ordinary concrete in that the concrete has a large number of continuous pores and cavities that allow air or water to pass through. from the hole in the flesh Therefore, porous concrete has a lighter weight and lower strength than general concrete. In foreign countries such as England, America and Japan, porous concrete has been used in construction for more than 40 years (ACI 522, 2010; Schaefer et al., 2006). Research in this project will focus on the development of mixtures in which microsilica is added to improve the strength properties of porous concrete, both compressive and flexural, as well as maintaining water permeability. good The porous concrete that we have developed will be used as a manhole cover. Water for testing within King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang first. by the point of The organizing team is to solve the problem of delayed drainage into the sewer in Bangkok, which the organizing team expects that the developed porous concrete manhole cover will be able to cause flooding to drain into the sewer. Water is much faster and is also more durable than normal porous concrete as well.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก

ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องคอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดีพวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่างๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่างๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาจนนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ได้กรุณาให้ข้อมูลโดยการตอบแบบสอบถามตามความเป็นจริงและครบถ้วน

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอดทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ชรินทร์ ทิมแก้ว

ตะวัน อุกฤษต์

ปณิธาน ภูจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	3
2.1 คอนกรีตพูน	3
2.2.1 ส่วนผสมของคอนกรีตพูน	4
2.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตพูน	9
2.1.3 ข้อดีและข้อด้อยของคอนกรีตพูน	22
2.1.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตพูน	23
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.3 ไมโครซิลิกา	28
2.3.1 ข้อดีของการใช้ไมโครซิลิกา	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	31
3.2 การสำรวจพื้นที่	32
3.3 แผนดำเนินงาน	33
3.4 ส่วนผสมของคอนกรีตพูน	34
3.5 การผสมและการอัดแน่นคอนกรีตพูน	35
3.6 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตพูน	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล	41
4.1 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนที่ผสม Micro Silica	41
4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	47
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก	50
ภาคผนวก ข	53
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	56

สารบัญรูป

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่า b/b_0	7
ตารางที่ 2 ช่วงสัดส่วนผสมทั่วไปของคอนกรีตพูน	9
ตารางที่ 3 สมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความพุกกับกำลังของวัสดุที่ใช้ซีเมนต์	16
ตารางที่ 4 สมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับความพูนของคอนกรีตพูน	19
ตารางที่ 5 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคอนกรีตพูน	23
ตารางที่ 6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย	33
ตารางที่ 7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่ใช้ศึกษา	34
ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบ	34
ตารางที่ 9 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ	34
ตารางที่ 10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Micro Silica	36
ตารางที่ 11 Infiltration Test	41
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน	43

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 1 คอนกรีตพูน	1
รูปภาพที่ 2 คอนกรีตพูน	3
รูปภาพที่ 3 การอัดแน่นด้วยเครื่องเขย่าของคอนกรีตพูน	6
รูปภาพที่ 4 ปริมาณช่องว่างที่เหมาะสมในคอนกรีตพูนที่อัตราการใช้ต่าง ๆ	7
รูปภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงและกำลังอัด	8
รูปภาพที่ 6 ปริมาณโพรงและปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมสำหรับมวลรวมหยาบ	8
รูปภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนและปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพูน	10
รูปภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างและความหนาแน่นของคอนกรีตพูน	15
รูปภาพที่ 9 แบบจำลองสำหรับกำลังรับแรงอัดและความพูนของคอนกรีต	17
รูปภาพที่ 10 การกระจายตัวของความพูนในแนวตั้งโดยทั่วไปสำหรับงานคอนกรีตที่มีการบดอัดพื้นผิว	18
รูปภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน	18
รูปภาพที่ 12 อิทธิพลของความคดเคี้ยวของช่องว่างต่อการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน	19
รูปภาพที่ 13 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของคอนกรีตพูนที่ใช้หินแม่น้ำเป็นมวลรวม	20
รูปภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความหนาแน่นของคอนกรีตพูน	21
รูปภาพที่ 15 การเปรียบเทียบขนาดไมโครซิลิกาเทียบกับขนาดของซีเมนต์	28
รูปภาพที่ 16 คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ผสม Micro Silica	29
รูปภาพที่ 17 การทดสอบ Compressive Strength ของคอนกรีต 6 ตัวอย่าง	29
รูปภาพที่ 18 แผนการดำเนินงานวิจัย	30
รูปภาพที่ 19 แสดงตำแหน่งที่ตั้งที่จะนำฝาท่อระบายน้ำมาทดลองใช้	31
รูปภาพที่ 20 การวัดขนาดของฝาท่อคอนกรีตที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ	32
รูปภาพที่ 21 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ	35
รูปภาพที่ 22 Micro Silica ที่นำมาใช้ในการทดสอบ	35
รูปภาพที่ 23 ผสมตัวอย่างทดสอบในไม่ผสม	37
รูปภาพที่ 24 นำคอนกรีตที่ผสมมาใส่แบบที่เตรียมไว้	37
รูปภาพที่ 25 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ	38
รูปภาพที่ 26 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM)	39
รูปภาพที่ 27 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 28 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนต่อ %Micro Silica	42
รูปภาพที่ 29 การทดสอบ Infiltration Test	42
รูปภาพที่ 30 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่ผสม Micro Silica ในการแทนที่ซีเมนต์	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

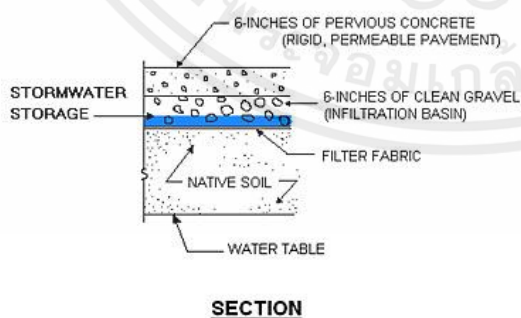
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยเผชิญกับวิกฤตปัญหาในเรื่องการบริหารจัดการน้ำเป็นอย่างมาก โดยมีสาเหตุอันเนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของสิ่งก่อสร้างในเขตเมือง ส่งผลต่อการไหลซึมผ่านของน้ำจากชั้นผิวดินไปยังชั้นใต้ดินทางอุทกวิทยาซึ่งทำให้ทิศทางและปริมาณการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะเมื่อเวลาเกิดพายุฝนตกหนัก ประสิทธิภาพในการรับน้ำและระบายน้ำได้ไม่ดี เกิดน้ำท่วมขังสูงเป็นบริเวณกว้าง สร้างความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งความไม่สะดวกในการดำรงชีวิต

คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) เป็นวัสดุที่ยังยืนมีลักษณะของโครงสร้างที่มีรูพรุนที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งช่วยให้น้ำไหลผ่านได้ดี รูพรุนในคอนกรีตสามารถทำได้โดยการลดหรือขจัดมวลละเอียดในคอนกรีต คงเหลือแต่ซีเมนต์เพสต์และมวลรวมหยาบ สามารถออกแบบคุณสมบัติได้อย่างหลากหลาย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน นอกจากนี้คอนกรีตพรุนยังถูกนำมาใช้งานในคอนกรีตสีเขียว (Green Concrete) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการพัฒนาส่วนผสมภายใต้การใช้ Micro Silica เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงกับคอนกรีตพรุน ทดสอบสมบัติกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C39 , ASTM C78 ทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน ตามมาตรฐาน ASTM C1701 หลังทำการทดสอบแล้วนำผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า เพื่อให้ได้ค่าคอนกรีตพรุนที่มีกำลังรับแรงได้ตามการใช้งานและการซึมผ่านน้ำที่ดีที่สุดตามการใช้งาน



ภาพที่ 1 คอนกรีตพรุน

ที่มา <https://dot.ca.gov/programs/design/lap-erosion-control-design/tool-1-lap-erosion-control-toolbox/tool-1nn-40-permeable-paving>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.) พัฒนาส่วนผสมภายใต้ Micro Silica
- 2.) พัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง (การรับแรงอัด)
- 3.) พัฒนาคุณสมบัติด้านการซึมผ่านน้ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.) การพัฒนาส่วนผสมภายใต้การใช้ Micro Silica
- 2.) ทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C39 ASTM C78 โดยใช้เครื่อง UTM
- 3.) ทดสอบการซึมผ่านน้ำตามมาตรฐาน ASTM 1701 โดยใช้วิธี Infiltration Test

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) ความแข็งแรงที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นของคอนกรีตพูนโดยเฉพาะแรงอัด โดยการใช้ Micro Silica
- 2.) อัตราการซึมผ่านน้ำยังคงไหลผ่านได้ดีถึงดีมากแต่ไม่ต่ำกว่าคอนกรีตพูนปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน คือ คอนกรีตชนิดพิเศษที่มีช่องว่างอย่างต่อเนื่อง คอนกรีตพรุนไม่ได้เป็นเทคโนโลยีใหม่เพราะถูกใช้มากกว่า 30 ปี ในอังกฤษ และสหรัฐอเมริกา และยังแพร่หลายในยุโรป และญี่ปุ่น (Swe et al., 2016) มีการใช้งานครั้งแรกเมื่อปี 1852 และได้รับการจดสิทธิบัตรเมื่อปี 1980 ถึงแม้ว่าคอนกรีตพรุนจะไม่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่แต่ก็ยังได้รับความสนใจในทุกวันนี้ (Grubeša et al., 2018) คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของวัสดุเหมือนกับคอนกรีตธรรมดาทั่วไปแต่มีการออกแบบให้มีความพรุนสูงเพื่อยอมให้น้ำไหลผ่านไปได้จึงทำให้คอนกรีตพรุนนั้นมีน้ำหนักเบาและกำลังต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยมีขนาดของรูพรุนประมาณ 0.08 - 0.32 นิ้ว หรือ 2 - 8 มิลลิเมตร (ACI522, 2010) มีปริมาณช่องว่างทั้งหมดประมาณ 15 - 35 % และมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 2.80 - 28 เมกะปาสคาล การซึมไหลผ่านของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมและความหนาแน่นของส่วนผสมแต่โดยทั่วไปแล้วมีอัตราการซึมไหลผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.14 - 1.22 เซนติเมตร/วินาที (ACI522, 2010) คอนกรีตพรุนประกอบไปด้วย ซีเมนต์ , น้ำ , มวลรวมหยาบ และ มวลรวมละเอียดที่จำกัดหรือไม่มีมวลรวมละเอียด (ACI522, 2010; Grubeša et al., 2018) แต่อาจมีส่วนผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษ สารผสมเพิ่ม หรือวัสดุเพิ่มเข้าไปเล็กน้อย (วันชัย และ ปริญญา, 2560) โดยทั่วไปแล้ว คอนกรีตพรุนจะใช้ขนาดมวลรวมหยาบเป็นมวลรวมหยาบขนาดเดียว (Single size) หรือมวลรวมหยาบที่เป็นมีลักษณะเป็นขนาดคละอยู่ในช่วง 9.50 - 19 มิลลิเมตร (ACI522, 2010) เพื่อให้ได้ปริมาณช่องว่างตามที่ออกแบบไว้ ควบคู่กับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (CRMCA, 2009) ส่วนมวลรวมละเอียดนั้นไม่มีก็ได้หรือมีในจำนวนที่จำกัด ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Kevern et al., 2009) คอนกรีตพรุนส่วนมากจะใช้ในงานลานจอดรถ , ทางเท้า , ทางจักรยาน และถนนที่มีการจราจรน้อย (Nassiri et al., 2017)



ภาพที่ 2 คอนกรีตพรุน

ที่มา วันชัย และปริญญา, (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ส่วนผสมของคอนกรีตพูน

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150/C150M , ASTM C595/C595M หรือ ASTM C1157/C1157M ที่ใช้เป็นตัวหลักในการเชื่อมประสาน เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะทำให้การทำงานของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นและการบดอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วย (Kevern et al., 2009) โดยสามารถใช้วัสดุเสริมซีเมนต์ เช่น ใ้ล้อย , ใ้ล้ตะกรัน และซิลิกาฟูม เสริมเข้าไปในซีเมนต์ได้ (ACI522, 2010) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้วัสดุเสริมซีเมนต์ในคอนกรีตพูนนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะไม่เหมือนกับคอนกรีตทั่วไปดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุเสริมซีเมนต์ที่เหมาะสมถึงจะเสริมคุณสมบัติทางกลต่างๆของคอนกรีตพูน (Fu et al.,2014) ความหนาของซีเมนต์ที่เคลือบผิวมวลรวมนั้นก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของคอนกรีตพูน พบว่ามวลรวมหยาบขนาดใหญ่มีซีเมนต์เคลือบที่ผิวหนาในขณะที่มวลรวมหยาบขนาดเล็กก็มีความหนาของซีเมนต์ที่บางซึ่งทำให้มวลรวมหยาบขนาดเล็กนั้นมีพื้นที่ผิวที่มาก(Chandrappa and Biligiri, 2016) คอนกรีตพูนที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยใ้ล้อยนั้นทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนลดลง โดยปัจจัยหลักนั้นอาจจะมาจากขนาดคละและคุณภาพของใ้ล้อย (Husain and Roshni, 2015)

2. น้ำ (Water) น้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตพูนมีคุณภาพเหมือนคอนกรีตทั่วไปโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนควรมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) อยู่ในช่วง 0.26 - 0.40 เพราะถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เพสต์ไหลไปสู่ด้านล่างและเกิดการอุดตันของระบบพูน (ACI522, 2010) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นมีความสำคัญ มากเนื่องจากคอนกรีตพูนมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปโดยอัตราส่วนที่ใช้นั้นต้องเพียงพอต่อซีเมนต์เพื่อการยึดเกาะกับมวลรวมที่ดี (Chandrappa and Biligiri, 2016)

3. มวลรวม (Aggregate) โดยทั่วไปแล้วมวลรวมหยาบที่ใช้นั้นเป็นมวลรวมหยาบขนาดเดี่ยว (Single size) หรือมวลรวมหยาบที่มีขนาดคละอยู่ในช่วง 9.50 -19 มิลลิเมตร มวลรวมหยาบที่ใช้นั้นต้องมีลักษณะโค้งมน , แข็งแรง และสะอาดตามมาตรฐาน ASTM D448 และ ASTM C33/C33M (ACI-522R-10) อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์นั้นอยู่ในช่วง 4 : 1 ถึง 6 : 1 โดยทั่วไปแล้วปริมาตรของมวลรวมในคอนกรีตพูนประมาณ 50 – 65% เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป (Chandrappa and Biligiri, 2016) คอนกรีตพูนที่มีขนาดคละที่ดีจะสามารถเพิ่มกำลังและลดการใช้ซีเมนต์ได้โดยมีอัตราส่วนสารเชื่อมประสานต่อมวลรวมอยู่ในช่วง 0.22 – 0.25 โดยปริมาตรของมวลรวม (Kevern et al., 2009) ความหนาแน่นของคอนกรีตพูนจะขึ้นอยู่กับความพรุนและชนิดของมวลรวม ส่วนผสมที่มีความพรุนสูงจะมีความหนาแน่นต่ำและส่วนผสมที่มีความหนาแน่นของมวลรวมสูงจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตสูงไปด้วย (Grubeša et al., 2018) ขนาดคละของมวลรวมมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน การลดขนาดของมวลรวมทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ ผิวสัมผัสให้กับซีเมนต์ในการยึดเกาะ (Agar-Ozbek et al., 2013) มวลรวมหยาบขนาดเล็กนั้นจะทำให้ช่องว่างที่เชื่อม

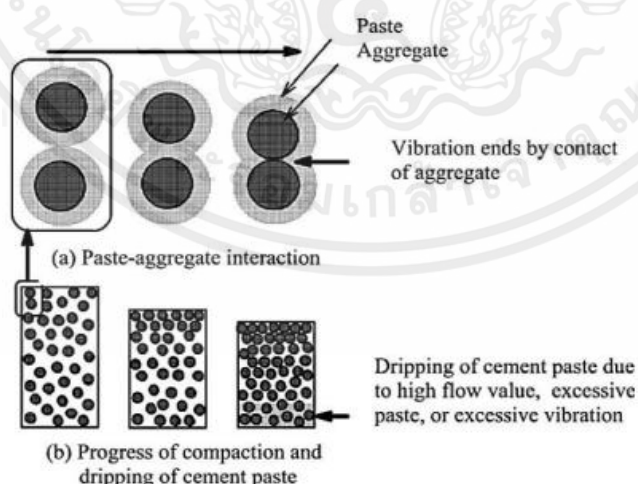
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันนั้นมีขนาดเล็กกลางและสร้างความคดเคี้ยวระหว่างช่องว่างในคอนกรีตพูน แต่ในคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่จะมีช่องว่างระหว่างมวลรวมที่ใหญ่และไม่มีการคดเคี้ยวมาก (Fu et al., 2014) การศึกษาส่วนใหญ่จะใช้มวลรวมหยาบขนาด 2.36 – 9.50 มิลลิเมตร ในการเพิ่มกำลังของคอนกรีตพูนในคอนกรีตพูน อาจจะมีมวลรวมละเอียดอยู่อย่างจำกัดหรืออาจไม่มีเลยก็ได้ซึ่งการเติมมวลรวมละเอียดลงไปในส่วนผสมนั้นทำให้คอนกรีตพูนมีรูพูนที่ลดลงแต่มีกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่สูงขึ้นนอกจากนั้นการเติมมวลรวมละเอียดยังช่วยลดการไหลของเพสต์ทำให้เพิ่มการยึดเกาะของเพสต์ลดการไหลของเพสต์ลงไปจมอยู่ด้านล่างโดยปริมาณที่ ACI 522 แนะนำให้ใช้ไม่มากเกินไป 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำ หักมวลรวมหยาบ (วันชัย และ ปริญญา , 2560)

ในการผสมคอนกรีตพูนนั้นความชื้นของมวลรวมตอนผสมก็เป็นส่วนที่สำคัญเช่นกันควรปรับความชื้นให้เหมาะสมโดยใช้มวลรวมที่มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพอ้อมตัวผิวแห้ง (SSD) ถ้าใช้มวลรวมที่มีสภาพแห้งอาจส่งผลต่อปริมาณน้ำทำให้มีน้ำไม่เพียงพอต่อการใช้งาน แต่ถ้าใช้มวลรวมที่มีสภาพเปียกมากเกินไปจะทำให้มีปริมาณน้ำมากเกินไปต่อการใช้งาน นำไปสู่การไหลของเพสต์ลงไปจมอยู่ด้านล่างทำให้มีความพูนที่ลดลง (ACI522, 2010)

4. สารผสมเพิ่ม (Admixture) สารผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตพูนเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494/494M การใช้สารลดน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยใช้เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นและ ควบคุมปฏิกิริยาการไฮเดรชันของคอนกรีตรวมทั้งสารหน่วงปฏิกิริยาที่เป็นอีกสารผสมเพิ่มอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในคอนกรีตพูนใช้สารหน่วงปฏิกิริยาเพื่อความสะดวกในการขนส่งคอนกรีตและหน่วงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮเดรชันในคอนกรีตในสภาพอากาศที่ร้อนนอกจากนี้ยังเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตเมื่อมีการก่อสร้างในสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็นส่วนสารกักกระจายฟองอากาศนั้นโดยทั่วไปมักไม่ใช้ในงานคอนกรีตพูน แต่สามารถใช้ในการก่อสร้างที่สภาพแวดล้อมที่ไวต่อการเยือกแข็งและหลอมละลาย (ACI522, 2010; วันชัย และ ปริญญา, 2560) การใส่สารผสมเพิ่มลงในคอนกรีตพูนนั้นทำให้การขนส่งคอนกรีตและกำลังอัดดีขึ้นแต่ทำให้อัตราส่วนช่องว่างและการไหลซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนลดลง (Bhutta et al., 2012) กำลังของคอนกรีตพูนนั้นขึ้นอยู่กับค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ใช้กำลังจะสูงขึ้นเล็กน้อยมีซีเมนต์เพสต์มีอัตราการไหลสูงขึ้นโดยกำลังรับแรงของคอนกรีตพูนที่ได้จากการใส่สารลดน้ำ (Water reducer) นั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่คอนกรีตพูนที่ได้จากการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นอย่างมากและยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้น (Chidaprasirt et al., 2007) เนื่องจากคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดหรือมีในปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นขั้นตอนการผสมคอนกรีตพูนควรเริ่มจากการผสมส่วนผสมของเพสต์ก่อนซึ่ง เพสต์ที่ใช้ในคอนกรีตพูนนั้นต้องมีค่าการไหลที่เหมาะสมคือไม่เหลวหรือหนืดเกินไป ค่าการไหลที่เหมาะสมจะทำให้เพสต์เคลือบผิวมวลรวมได้ดีโดยไม่เกิดการไหลเยิ้มลงด้านล่าง การผสม คอนกรีตพูนในห้องปฏิบัติการให้เริ่มจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมเพสต์ก่อน 30 วินาที ด้วยความเร็วรอบเครื่อง ผสม 50 รอบต่อนาที และผสมอย่างน้อย 240 วินาที ด้วยความเร็วเครื่องผสม 200 รอบ/นาที จะทำให้เพสต์มีความสามารถทำงานได้ดี (วันชัย และ ปริญญา, 2560) จากนั้นจึงผสมมวลรวมหยาบเข้าไปในส่วนผสม ลักษณะส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ได้จะมีเพสต์เคลือบผิวมวลรวมดีและคอนกรีตที่ได้จะมีความหนืดคล้ายคอนกรีตที่มีความข้นมากๆ ที่เรียกว่าคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว (Zero slump) สำหรับการวัดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตพูนนั้นได้จากการทดสอบวีบี (V. Bahner) มาใช้ซึ่งวิธีการทดสอบนี้จะเหมาะกับคอนกรีตที่มีความหนืดหรือมีความสามารถการทำงานได้ดี (วันชัย และ ปริญญา, 2560) จากการที่คอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่มีความสามารถในการทำงานได้ดีตั่งนั้นหลังการผสมและเทคอนกรีตแล้วควรได้รับการอัดแน่นที่เหมาะสมโดยการอัดแน่นคอนกรีตพูนหรือการให้พลังงานในการอัดแน่นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณโพรงที่แตกต่างกันทำให้คอนกรีตพูนที่ได้มีกำลังต่างกันตั่งนั้นการอัดแน่นต้องใช้พลังงานให้เหมาะสม นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการบดอัดที่เหมาะสมยังสัมพันธ์กับปริมาณและค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ด้วยโดยเพสต์ที่มีค่าการไหลมากเมื่อมีการใช้พลังงานในการอัดแน่นมากเกินไปทำให้มีผลต่อการไหลเยิ้มของเพสต์ลงสู่ด้านล่างทำให้คอนกรีตพูนเกิดการอุดตันได้ การอัดแน่นตัวอย่างคอนกรีตพูนในห้องทดลองโดยใช้เหล็กกระทุ้งอย่างเดียวอาจมีพลังงานไม่เพียงพอและไม่ควรเขย่าที่ผิวหน้าเพียงอย่างเดียว เพราะบริเวณผิวด้านบนในกล้อเครื่องเขย่าจะมีการอัดแน่นดีกว่าผิวด้านล่างควรเขย่าโดยการวางแบบหล่อบนโต๊ะเขย่าทำการอัดแน่นควบคู่กับการกระทุ้งไปด้วยกัน ส่วนการอัดแน่นในสนามต้องมีการอัดแน่นทั่วทั้งผิวคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ เช่น การอัดแน่นเครื่องเขย่าแบบลูกกลิ้งหรือทำการบดอัดด้วยพลังงานที่เหมาะสมด้วยเครื่องมือที่เหมือนกับการอัดแน่นในคอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete , RCC) เป็นต้น (วันชัย และ ปริญญา, 2560)



ภาพที่ 3 การอัดแน่นด้วยเครื่องเขย่าของคอนกรีตพูน

ที่มา: วันชัย และปริญญา, (2018); Chindaprasirt et al., (2008)

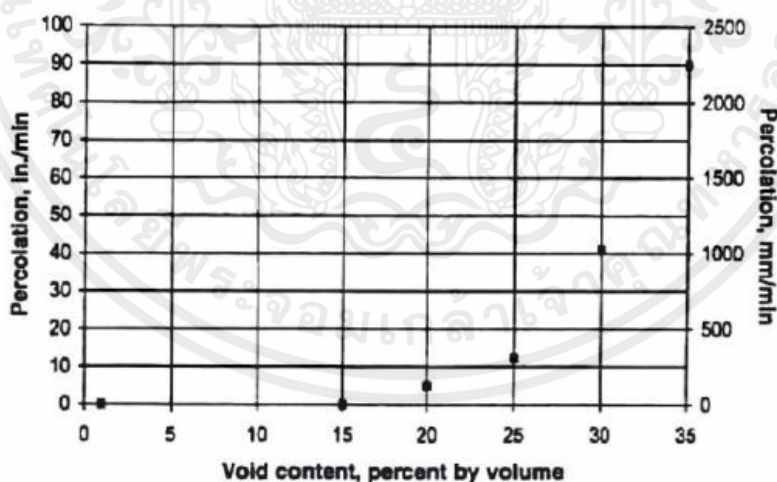
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพูนนั้นไม่ได้มีข้อกำหนดชัดเจนเหมือนคอนกรีตทั่วไปขั้นตอนการออกแบบนั้นเป็นการทดสอบจากห้องปฏิบัติการผ่านการทำซ้ำมาแล้วหลายครั้งจึงต้องมีการปรับแก้ก่อนนำไปใช้จริงเพื่อให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ทุกครั้ง ส่วนผสมที่ใช้นั้นประกอบด้วยวัสดุเชื่อมประสาน น้ำ และมวลรวม โดยมวลรวมที่ใช้นั้นควรมีความสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M เช่น ขนาด 7 (4.75 – 12.50 มิลลิเมตร) ขนาด 8 (2.36 – 9.50 มิลลิเมตร) และขนาด 67 (4.75 – 19 มิลลิเมตร) เป็นต้น โดยสามารถหาปริมาณมวลรวมหยาบได้จากค่า b/b_0 ดังตารางที่ 1 จากนั้นกำหนดปริมาณช่องว่างที่เหมาะสม โดยกำหนดจากคุณสมบัติที่ต้องการของคอนกรีตพุนดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5 เมื่อได้ปริมาณช่องว่างแล้วนำไปหาปริมาณเพสต์จากภาพที่ 6 แล้วนำค่าที่ได้จากกราฟไปหาปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ใช้จากสมการที่ 1 (ACI522, 2010)

เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียด	b/b_0	
	ASTM C33/C33M Size No.8	ASTM C33/C33M Size No.67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

ตารางที่ 1 ค่า b/b_0

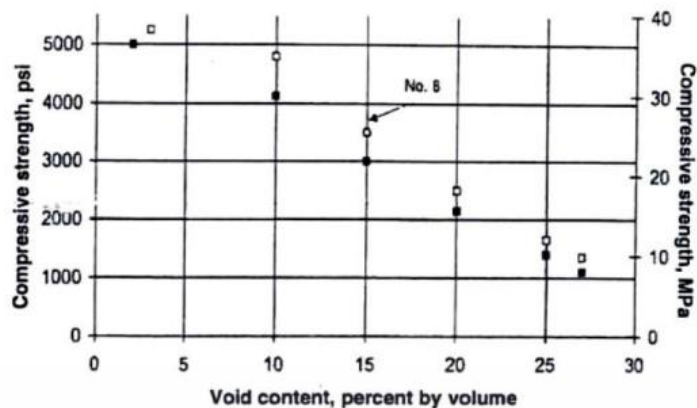
ที่มา: ACI 522, (2010)



ภาพที่ 4 ปริมาณช่องว่างที่เหมาะสมในคอนกรีตพูนที่อัตราการใช้ต่าง ๆ

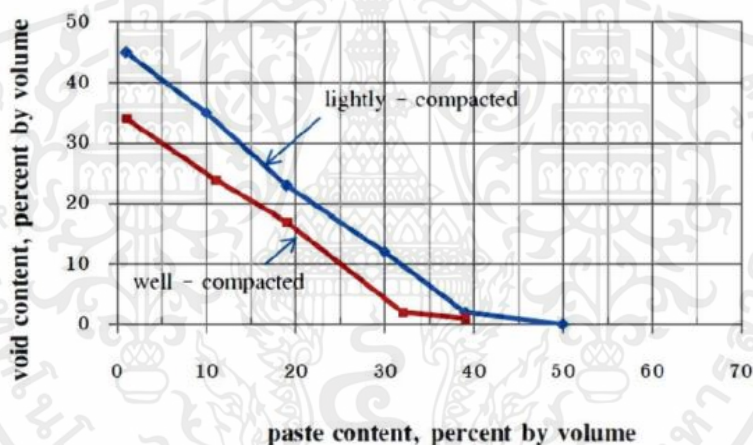
ที่มา: ACI 522, (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงและกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สำหรับมวลรวมหยาบขนาด 67 (4.75 - 19.00 มม.) และขนาด 8 (2.36 - 9.5 มม.)

ที่มา: ACI 522, (2010)



ภาพที่ 6 ปริมาณโพรงและปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมสำหรับมวลรวมหยาบขนาด 8 (2.36 - 9.50 มม.)

ที่มา: ACI 522, (2010)

การออกแบบที่มีการเติมมวลรวมละเอียดเข้าไปนั้นควรลดค่าเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนช่องว่างลงดังนี้ สำหรับคอนกรีตพรุนที่มีการบดอัดแบบอย่างสมบูรณ์ (well-compacted pervious concrete) ควรลดค่าอัตราส่วนช่องว่างลงร้อยละ 2 ต่อปริมาณมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้นทุกร้อยละ 10 ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด และสำหรับคอนกรีตพรุนที่มีการบดอัดแบบหลวม (lightly-compacted pervious concrete) ควรลดค่าอัตราส่วนช่องว่างลงร้อยละ 1 ต่อปริมาณมวลรวมละเอียด ที่เพิ่มขึ้นทุกร้อยละ 10 ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรเพสต์ (V_p) = ปริมาตรปูนซีเมนต์ + ปริมาตรน้ำ

$$V_p = c / (3.15 \times 1000 \text{ kg/m}^3) + (w/c)c / (1000 \text{ kg/m}^3)$$

ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์หาได้จาก

$$c = [V_p / (0.317 \times w/c)] \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

โดยทั่วไปแล้วมีช่วงสัดส่วนผสมของคอนกรีตพูน ดังตารางที่ 2

	สัดส่วนผสม, lb/yd ³ (kg/m ³)
ปูนซีเมนต์	450 – 700 (270 – 415)
มวลรวม	2000 – 2500 (1190 – 1480)
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	0.27 – 0.34
อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	4 – 4.5 : 1
อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อหยาบ โดยน้ำหนัก	0 – 1 : 1

ตารางที่ 2 ช่วงสัดส่วนผสมทั่วไปของคอนกรีตพูน

ที่มา: ACI 522, (2010)

2.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตพูน

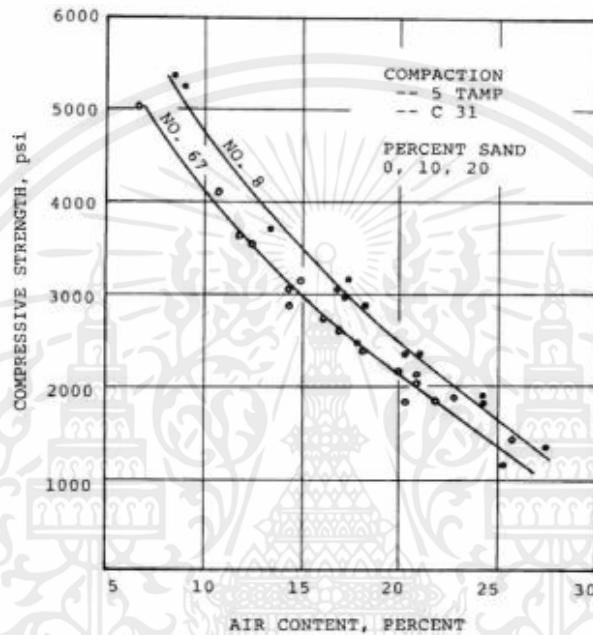
คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตพูนจะสัมพันธ์กับความพูนเป็นหลัก เนื่องจากคอนกรีตพูนมีความพูนมากกว่าคอนกรีตทั่วไป (ACI522, 2010; วันชัย และ ปริญญา, 2560) โดยความพูนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์, อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, การบดอัดของคอนกรีต รวมทั้งขนาดคละและคุณภาพของมวลรวม

1. กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) กำลังรับแรงของคอนกรีตพูนเป็นผลมาจากสัดส่วนผสมโดยอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์นั้นมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตพูนมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และการบดอัดของคอนกรีต การเพิ่มพอลิเมอร์และยางเข้าไปในส่วนผสมนั้นจะทำให้คอนกรีตพูนมีความสามารถในการต้านการแตกหัก (Fracture Toughness) มากขึ้น เนื่องจากเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีตพูน (Chandruppa and Biligiri, 2016) โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากมีปริมาณโพรงอยู่มากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนและปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพูนที่ใช่มวลรวมหยาบ 2 ขนาด และมีการบดอัดและขนาดคละที่แตกต่างกัน อธิบายได้ด้วยสมการเอ็กซีโปเนนเชียล (วันชัย และ ปริญญา, Meininger, 1998; 2560) ดังสมการที่ 2 โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \sigma_0 e^{-bv}$$

โดยที่ σ คือ กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล) , σ_0 คือ กำลังรับแรงอัดที่ปริมาณโพรง 0 เปอร์เซ็นต์ (เมกะปาสคาล) , v คือ ร้อยละปริมาณโพรง (เปอร์เซ็นต์) และ b คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนและปริมาณช่องว่างของคอนกรีตพูน (1 psi = 0.006895 เมกะปาสคาล)

ที่มา: วันชัย และปริญญา, (2560); Meininger, (1988)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตพูนทั่วไปจะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 2.80 – 28 เมกะปาสกาล การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนสามารถทำได้หลายแนวทางคือการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ , การบดอัดซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความพูนที่ลดลง , การเพิ่มกำลังของเพสต์หรือความหนาของเพสต์ , การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส โดยการลดขนาดของมวลรวมหรือขนาดคละของมวลรวม เป็นต้น การปรับปรุงกำลังของเพสต์ด้วยซิลิกาฟูมและสารลดน้ำพิเศษร่วมกับการใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 50 เมกะปาสกาล (วันชัย และ ปริญญา, 2560) ถึงแม้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นสำคัญต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดและโครงสร้างของรูพูนของคอนกรีตพูน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั่วไปไม่สามารถนำมาใช้กับคอนกรีตพูนได้เนื่องจากถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะทำให้เพสต์ไหลลงไปจมอยู่ด้านล่างและทำให้ปริมาณช่องว่างลดลง แต่ถ้าใช้อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ต่ำจะไปลดการยึดเกาะระหว่างเพสต์กับมวลรวม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แนะนำอยู่ในช่วง 0.26 – 0.45 (Meininger, 1998) ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตนั้นมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงของคอนกรีตพูน โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่บ่มคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน นั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่ 7 วัน มีค่าประมาณ 70 – 90% ของกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (Chandrappa and Biligiri, 2016) เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนเข้าใกล้กำลังประลัย มวลรวมหยาบจะค่อยๆ แยกออกจากตัวอย่างและเมื่อถึงค่ากำลังประลัยขึ้นส่วนของมวลรวมจะหลุดออกจากตัวอย่าง แต่ปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เมื่อคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ภายใต้แรงกระทำที่ค่ากำลังรับแรงประลัย ตัวอย่างจะพังลงมาทันทีและมวลรวมหยาบบางส่วนจะหลุดออกพร้อมเกิดเสียงดัง และรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตพูนนั้นส่วนมากจะเกิดบริเวณผิวหน้าระหว่าง ซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ดังนั้นการยึดเกาะกันระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมเป็นปัจจัยที่สำคัญของสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน (Yu et al., 2019)

เรื่อง	ผู้แต่ง	กำลังรับ แรงอัดสูงสุด (MPa)
Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Porous Concrete Materials	Sun, Y., and et al.	4.37
An Experimental Study on The Water-Purification Properties of Porous Concrete	Park, S.B., and Tia, M.	25
Strength, fracture and fatigue of pervious concrete	Chen, Y., and et al.	46.7
Control of Clogging in Conventional Permeable Concrete and Development of A New High Strength Clogging Resistant Permeable Concrete Pavement	Kia, A., Wong, H.S., and Cheeseman, C.R.	29
The Influence of Aggregate Size and Binder Material on The Properties of Pervious Concrete	Fu, T.C. and et al.	28.73
Enhancing The Performance of Porous Concrete by Utilizing The Pumice Aggregate	Hariyadi, and Tamai, H.	22.50
Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates	Keven, J., and et al.	22.75
Strength and Abrasion Characteristics of Pervious Concrete	Leon Raj, J., and Chockalingam, T.	19.20
การพัฒนาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตพรุนโดยใช้ จุลินทรีย์ประสิทธิภาพเป็นส่วนผสม	รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และคณะ	14.16
คอนกรีตพรุนโดยวิธีผสมผงอลูมิเนียม	ประชุม คำพุด	9.53
Evaluation of High-Performance Porous Concrete Properties	Bhutta, M., Tsuruta, K., and Mirza, J.	25
Influence of Cement Flow and Aggregate Type on The Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete	Kim, H.K., and Lee, H.K	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

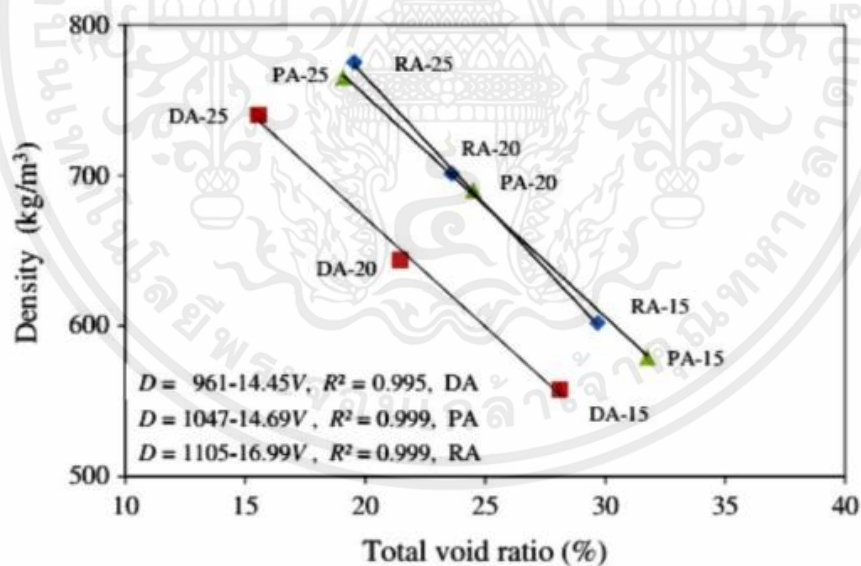
เรื่อง	ผู้แต่ง	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (MPa)
Investigating Porous Concrete with Improved Strength: Testing at Different Scales	Agar-Ozber, A.S. and et al.	61.10
Investigation on Polymer-Rubber Aggregate Modified Porous Concrete	Shen, W., and et al.	17.25
The Relationship between Porosity and Strength for Porous Concrete	Lian, C., Zhuge, Y., and Beecham, S.	46.20
การใช้เศษวัสดุเป็นส่วนผสมในคอนกรีตพรุน	อำพล วงศ์ษา และ วันชัย สะตะ	7.35
คอนกรีตพรุนที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมเบา	ยุวดี แซ่ตั้ง และคณะ	5.98
Draining Capability of Single-Sized Pervious Concrete	Grubeša, I. N., and et al.	25.04
Pervious Concrete Made of Alkali Activated Slag and Geopolymers	Sun, Z., Lin, X., and Vollpracht, A.	36.20
Pervious Concrete Block with Recycled Aggregate	Mubashir, V.P., and et al.	13.33
Properties of Pervious Concrete Containing Recycled Concrete Block Aggregate and Recycled Concrete Aggregate	Zaetang, Y., and et al.	17
Properties of Pervious Concrete Made with Electric Arc Furnace Slag and Alkali-Activated Slag Cement	Chang, J.J., Yeh, W., and Huang, C.R.	45
The Influence of Cement Type and Curing Condition on Properties Pervious Concrete Made with Electric Arc Furnace Slag as Aggregates	Yeh, W., and Chang, J.J.	26.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณช่องว่างและความหนาแน่น (Total void and Density)

คอนกรีตพูนทั่วไปจะมีปริมาณช่องว่างอยู่ระหว่าง 15 – 35 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดคละของมวลรวม , ปริมาณเพสต์ , อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และการบดอัดของคอนกรีต โดยความหนาแน่นของคอนกรีตพูนจะขึ้นอยู่กับความพูนและชนิดของมวลรวม เมื่อใช้มวลรวมที่มีความพูนสูงจะมีความหนาแน่นต่ำ และมวลรวมที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตสูงไปด้วย (Grubeša et al., 2018) โดยความพูนทั้งหมดของคอนกรีตพูนประกอบด้วย ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Interconnected pores) , โพรคาปิลารี (Capillary pores) และช่องว่างบริเวณปลาย (Dead-end pores) ซึ่งช่องว่างระหว่างมวลรวมนั้นเป็นช่องว่างที่ทำให้น้ำไหลผ่านได้โดยอ้างอิงจากความพูนประสิทธิผล ซึ่งความพูนประสิทธิผลนั้นนับเป็น 50 – 75 % ของความพูนทั้งหมด และปัจจัยที่มีผลต่อช่องว่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลมาจากชนิดของมวลรวมมากกว่าขนาดของมวลรวม (Chandrappa and Biligiri, 2016) โดยทั่วไปแล้วความพูนเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงยากที่จะทำการทดสอบอย่างแม่นยำถ้าเปรียบเทียบกับความพูนในซีเมนต์เพสต์ และช่องว่างระหว่างมวลรวมนั้นพบว่าช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดใหญ่กว่า ถึงแม้ว่าการทดสอบหาความพูนในคอนกรีตทั่วไปนั้นจะใช้วิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) แต่เมื่อหาความพูนในคอนกรีตพูนนั้นไม่สามารถที่จะใช้วิธีนี้ได้เนื่องจากปรอทจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างมวลรวมลงมาข้างล่างการห่อหุ้มตัวอย่างไว้นั้นจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการหาความพูนของคอนกรีตพูน (Lian et al., 2010) เมื่อเพิ่มขนาดมวลรวมหยาบจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตพูนลดลง ในขณะที่ความพูนและการซึมผ่านได้ของน้ำมีทิศทางตรงกันข้าม และการซึมผ่านน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพูนของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น (Lin et al., 2018) ปริมาณช่องว่างที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่แตกต่างกัน โดยปริมาณช่องว่างนั้นมีทั้งช่องว่างที่ต่อเนื่อง (Connected void) และช่องว่างที่ไม่ต่อเนื่อง (Unconnected void) ปริมาณช่องว่างที่มีผลต่อการซึมผ่านน้ำคือปริมาณช่องว่างต่อเนื่อง เมื่อมีการใช้มวลรวมที่มีขนาดเล็กและปริมาณเพสต์ที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณช่องว่างต่อเนื่องของคอนกรีตพูนลดลง (Neithalath et al., 2010; วันชัย และ ปริญญา, 2560) เมื่อความสูงของตัวอย่างเพิ่มขึ้นจึงมีผล ต่อปริมาตรและความพูน เพราะคอนกรีตพูนมีความหนืดต่ำและมีค่าการยุบตัวต่ำ (Slump) ทำให้ บริเวณผิวบนนั้น มีการบดอัดมากกว่าด้านล่าง ดังนั้น การกระจายตัวของความพูนในแนวตั้งจึงมีค่าน้อยบริเวณด้านบนและมีค่ามากบริเวณด้านล่าง (Rao et al., 2020) คอนกรีตพูนที่มีความพูนน้อย กว่า 15% มีแนวโน้มของการไหลซึมผ่านผ่านน้ำต่ำเนื่องจากการเชื่อมกันของช่องว่างไม่เพียงพอ ส่วนคอนกรีตพูนที่มีความพูนมากกว่า 35% มีการไหลซึมผ่านน้ำที่สูงแต่มีกำลังรับแรงที่น้อย (Kia et al., 2017) การบดอัดนั้นมีอิทธิพลต่อปริมาณช่องว่าง , ความพูน และความหนาแน่นโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนจะมีความ

หนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,680 – 1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Meininger, 1998) ปริมาณช่องว่างจะขึ้นอยู่กับการบดอัด, รูปร่างและผิวสัมผัสของมวลรวม และ สัมประสิทธิ์ ความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของมวลรวม (Crouch et al., 2006) สำหรับปริมาณเพสต์ ที่คงที่การใช้เส้นใยในคอนกรีตพูนจะลดปริมาณช่องว่างในคอนกรีตแต่จะเพิ่มความหนาแน่น, กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตในส่วนของกรซีเมนต์ผ่านน้ำของคอนกรีตพูนยังคงเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งสวนทางกับความพูนที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มเส้นใยเป็นการเพิ่มการเชื่อมต่อของช่องไฮดรอลิก (Kevern et al., 2009) เพื่อให้คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดตามที่ต้องการความหนาแน่นของคอนกรีตพูนควรจะอยู่ในช่วง 1,780 – 1,890 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร หรือมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณ 22% (Prahara and Meilani, 2014) ความหนาแน่นของซีเมนต์ที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยนั้นค่อนข้างต่ำกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์ทั่วไปเนื่องจากเถ้าลอยนั้นมีความถ่วงจำเพาะต่ำ (Husain and Roshni, 2015) Kearsley และ Wainwright ประสบความสำเร็จในการใช้สมการ Hoff ในการประมาณหาความพูนทั้งหมดของคอนกรีตโฟม ซึ่งคล้ายคลึงกับ Zheng ที่ใช้สมการที่มีความคล้ายคลึงกับสมการ Hoff แต่มีการรวมสัดส่วนของมวลรวมเข้าไปในการหาความพูนในคอนกรีตพูน ดังสมการที่ 3 โดยจากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถจำลองสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความพูนกับกำลังสำหรับวัสดุที่ทำจากซีเมนต์ ได้ดังตารางที่ 3 และดังภาพที่ 9 (Lian et al., 2010)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างและความหนาแน่นของคอนกรีตพูนจากมวลรวม น้ำหนักเบา

ที่มา: วันชัย และปริญญา, (2560); Zaetang et al., (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_t = \frac{100 + P_c + 0.25P_c}{\frac{100}{\rho} + \frac{P_c}{\rho_c} + (0.25P_c \times 0.75)}$$

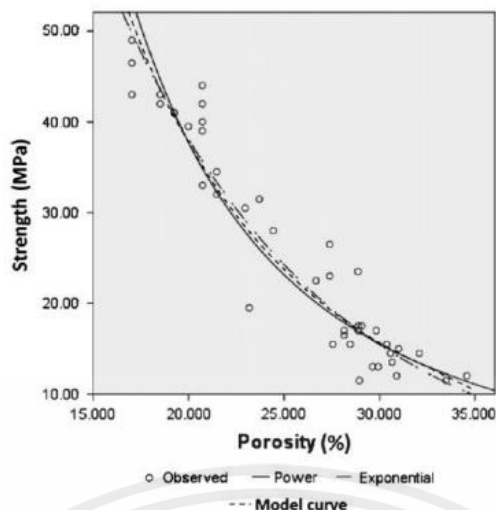
โดยที่ ρ_t คือ ความพรุนทางทฤษฎี, P_c คือ ซีเมนต์/มวลรวม โดยน้ำหนัก, ρ_w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ, ρ_c คือ ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ และ ρ คือ ความหนาแน่นที่ปรากฏของมวลรวม

	Equation	Mathematic law	Constant	Derivation
(a)	$\sigma = \sigma_0 \frac{1}{1 - bp}$	Linear	b	Derived by Hasselmann original for glass
(b)	$\sigma = \sigma_0 (1 - p)^n$	Power	n	Derived by Balshin for powder metals
(c)	$\sigma = \sigma_0 \exp(-cp)$	Exponential	c	Proposed by Ryshkevitch for ceramics and rocks
(d)	$\sigma = k \ln(p_0/p)$	Logarithmic	k	Proposed by Schiller for non – metallic brittle materials

ตารางที่ 3 สมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังของวัสดุที่ใช้ซีเมนต์

ที่มา: Lian et al., (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

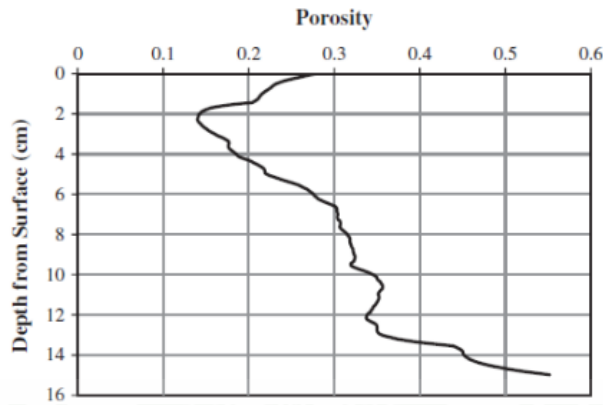


ภาพที่ 9 แบบจำลองสำหรับกำลังรับแรงอัดและความพรุนของคอนกรีต

ที่มา: Lian et al., (2010)

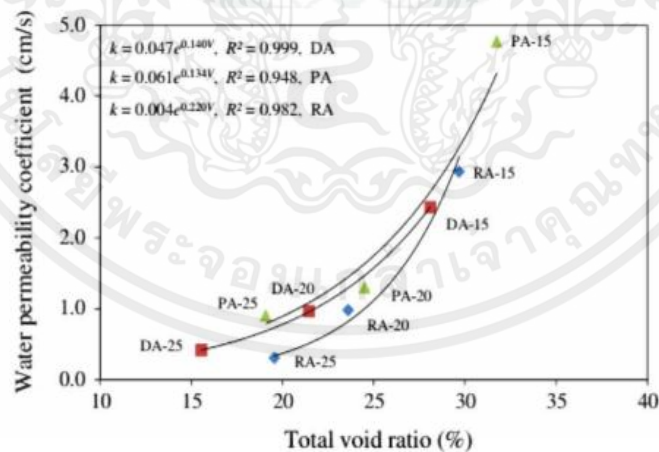
3. การไหลซึมผ่านน้ำ (Percolation)

การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความพรุนและขนาดของรูพรุน ความพรุนอย่างน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการซึมผ่านน้ำคือ 15 เปอร์เซ็นต์สำหรับความพรุนที่ 20 – 25 เปอร์เซ็นต์จะมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำประมาณ 0.01 เมตรต่อวินาที (Brite/Euram Report 1994) การไหลซึมผ่านน้ำจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณช่องว่างเพิ่มขึ้นแต่กำลังรับแรงอัดจะลดลงคอนกรีตพรุนนั้นควรออกแบบให้มีส่วนผสมที่สมดุลโดยให้ค่าการซึมผ่านน้ำและกำลังรับแรงอัดเป็นที่ยอมรับได้ (Meininger, 1998) การไหลซึมผ่านน้ำของมวลรวมที่มีช่องว่างในเนื้อมวลรวมสูงมีค่ามากกว่ามวลรวมที่มีช่องว่างในเนื้อมวลรวมต่ำซึ่งสอดคล้องกับปริมาณช่องว่างที่ต่อเนื่อง ดังนั้น เมื่อปริมาณพาสต์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีค่าลดลง (Chang et al., 2016) เมื่อมวลรวมมีขนาดคละเพิ่มขึ้น ขนาดของรูพรุนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะสามารถไปเชื่อมต่อกับรูพรุนอื่นที่อยู่ใกล้กันได้มากขึ้นทำให้มีความพรุนที่ต่อเนื่องกันมากขึ้น โดยการกระจายตัวของความพรุนนั้นมีผลต่อการซึมผ่านน้ำด้วย สามารถหาการกระจายตัวของความพรุนในแนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีตพรุนได้จากวิธี Image analysis โดยมี การกระจายตัวของความพรุนในแนวตั้งของตัวอย่างตามความลึกได้ดังภาพที่10 (Martin et al, 2014)



ภาพที่ 10 การกระจายตัวของความพรุนในแนวตั้งโดยทั่วไปสำหรับชิ้นงานคอนกรีตที่มีการบดอัดพื้นผิว
ที่มา: Martin et al., (2014)

การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนสามารถทดสอบได้หลายวิธี เช่น การซึมผ่านน้ำแบบระดับน้ำคงที่ (Constant head test) , การซึมผ่านน้ำแบบเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (Falling head test) และอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนเทในที่ (Infiltration rate of in place pervious concrete) เป็นต้นการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณช่องว่างเป็นสมการแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Neithalath et al., 2010; Zaetang et al., 2016; วันชัย และ ปริญญา, 2560) การทดสอบซึมผ่านน้ำแบบเปลี่ยนแปลงระดับน้ำนั้นมีความมากกว่าการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ (Chandruppa and Biligiri, 2016)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน
ที่มา: วันชัย และ ปริญญา, (2560); Zaetang et al., (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

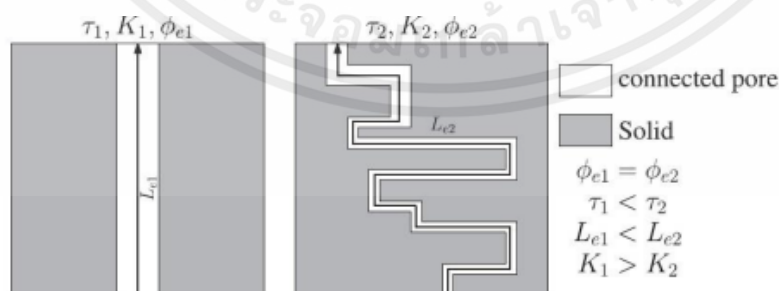
ลำดับ	Equation	model	Reference
1	$k = C \times [1 + 10(\phi - 1)] d^2$	Hazen	Vukovic et al. (1992)
2	$k = 240 \times \left[\frac{\phi}{(1 - \phi)^2} \right] d_e^2$	Kruger	Vukovic et al. (1992)
3	$k = m\phi + n$	Liner	Luck et al. (2006)
4	$k = m\phi^n$	Izbash	Ghafoori et al. (1995)
5	$k = me^{n\phi}$	Exponential	Deo et al. (2010)
6	$k = \left(\frac{1}{226} \right) \times \chi \phi l^2$	Katz - Thompson	Katz et al. (1986)
7	$k = A \times \left[\frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \right]$	Kozeny - Carman	Berryman et al. (1987)

ตารางที่ 4 สมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับความพรุนของคอนกรีตพรุน

ที่มา: Debnath et al., (2019)

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน, ϕ คือ ความพรุน, d คือ ขนาดของอนุภาค, d_e คือ ขนาดของอนุภาคประสิทธิภาพ, χ คือ pore connectivity factor, l คือ ความยาวของตัวอย่าง และ C , A , m และ n คือ ค่าคงที่

หากมีการไหลของซีเมนต์เพสต์ที่ดีซีเมนต์เพสต์จะไหลไปปิดกั้นช่องว่างระหว่างมวลรวมมากขึ้นทำให้ขนาดของช่องว่างมีขนาดเล็กลงและมีความคดเคี้ยวของช่องว่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ถ้าปริมาตรช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Connected void) หรือความพรุนประสิทธิภาพ (Effective porosity) คงที่การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนจะลดลงเมื่อมีความคดเคี้ยวของช่องว่างมากขึ้น (Pore tortuosity) การเพิ่มความคดเคี้ยวของช่องว่างจะทำให้เพิ่มเวลาของน้ำที่จะไหลออกจากคอนกรีตพรุนจึงทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลง (Zhong et al., 2016)



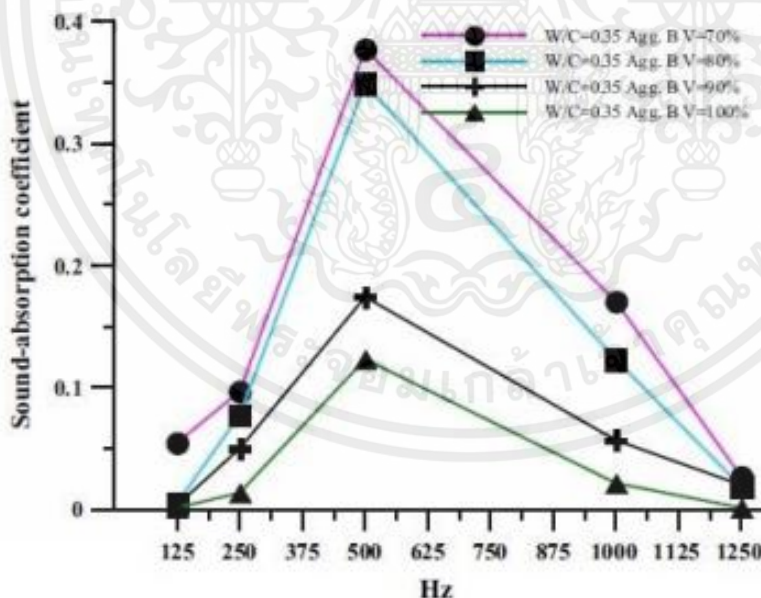
ภาพที่ 12 อิทธิพลของความคดเคี้ยวของช่องว่างต่อการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน

ที่มา: Zhong et al., (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การดูดซับเสียง (Sound absorption)

คอนกรีตพรุนเป็นประเภทของคอนกรีตที่สามารถดูดซับเสียงได้มากที่สุดเนื่องจากมีปริมาตรของช่องว่างที่ต่อเนื่องมากในเนื้อของวัสดุทำให้สามารถลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการสัมผัสกันของล้อยกับผิวถนนได้นอกจากนี้รูพรุนยังดูดซับเสียงผ่านแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนที่ภายในของอากาศและผนังของรูพรุน คอนกรีตพรุนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงอยู่ในช่วง 0.10 (สำหรับการออกแบบที่ไม่ดี) ถึงเข้าใกล้ 1 (สำหรับการออกแบบส่วนผสมที่มีปริมาตรและขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม) ในการเลือกความหนาที่เหมาะสมของคอนกรีตพรุนเพื่อลดความถี่ของเสียงที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของคลื่นเสียงที่กระทบกับพื้นถนน (ความถี่ 800–1200 Hz เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมกับหูของมนุษย์) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของคอนกรีตพรุนมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากช่องว่างในคอนกรีตนั้นมีส่วนช่วยในการดูดซับเสียง ดังนั้นคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมที่มีช่องว่างในเนื้อมวลรวมสูงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงมากกว่ามวลรวมที่มีช่องว่างในเนื้อมวลรวมต่ำซึ่งสอดคล้องกับปริมาณช่องว่างที่ต่อเนื่อง (Yeih and Chang, 2019) คอนกรีตพรุนดูดซับเสียงได้สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ลดลงและการใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กทำให้คอนกรีตพรุนสามารถดูดซับเสียงได้ดีกว่าการใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับเสียงของคอนกรีตพรุนจะเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาของตัวอย่าง (ชาญชัย และคณะ, 2561)



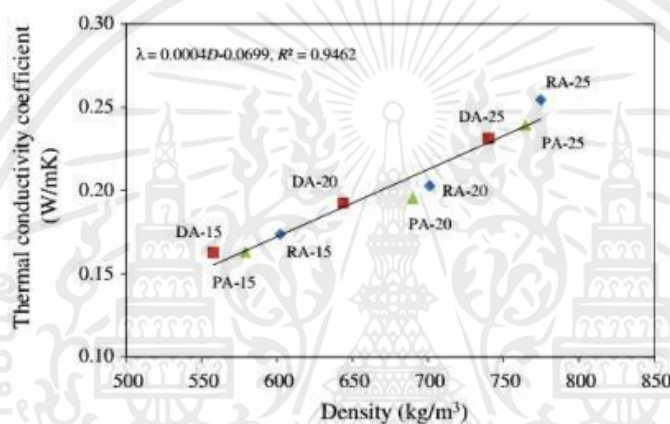
ภาพที่ 13 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของคอนกรีตพรุนที่ใช้หินแม่น้ำเป็นมวลรวม

ที่มา: Yeih et al., (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การนำความร้อน (Thermal conductivity)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านความร้อนภายในโมเลกุลของวัสดุจากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าไปยังระดับที่ต่ำกว่าโดยวัสดุก่อสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเมื่อคอนกรีตที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่านำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (วันชัย และ ปริญญา, 2560) โดยคอนกรีตมวลเบาที่มีปริมาณช่องว่างอากาศมากหรือความหนาแน่นน้อยจะมีค่าการนำความร้อนต่ำดังนั้นคอนกรีตพูนที่มีปริมาณช่องว่างช่องว่างอยู่มากและมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนน้อยกว่า คอนกรีตทั่วไป (Wong et al., 2007)



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความหนาแน่นของคอนกรีตพูน
ที่มา: วันชัย และปริญญา, (2560); Zaetang et al., (2013)

6. การกรองน้ำ (Water-purification)

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณน้ำแต่ยังสามารถเพิ่มคุณภาพของน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนได้อีกด้วย โดยความหนาของคอนกรีตพูนนั้นมีผลต่อการกรองน้ำด้วย เมื่อมีความหนาของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การกรองน้ำของคอนกรีตพูนก็เพิ่มขึ้น (Chandruppa and Biligiri, 2016) สามารถแบ่งกลไกการกรองน้ำได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ กลไกทางกายภาพโดยที่โครงสร้างภายในของคอนกรีตพูนจะดักจับสิ่งสกปรกไว้ซึ่งจะกำจัดพวกของแข็งที่อยู่ในน้ำ เมื่อน้ำไหลผ่านคอนกรีตพูน ทำให้สามารถลดสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้, กลไกทางเคมีซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนนั้นเป็นด่างในธรรมชาติระหว่างที่มีน้ำที่มีมลพิษค้างอยู่ คอนกรีตพูนจะปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออนและคาร์บอเนตไอออน ทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำมลพิษและตกตะกอนค่า pH ของน้ำ จะเพิ่มขึ้นจนเปลี่ยนเป็นค่า pH ตามธรรมชาติมากกว่าเป็นกรด และกลไกทางชีวภาพโดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างของคอนกรีตพูนจะทำให้พังกแก่พวกจุลินทรีย์เพื่อที่จุลินทรีย์จะบริโภคสารที่ค้างอยู่ในน้ำและละลายสารนั้น

2.1.3 ข้อดีและข้อด้อยของคอนกรีตพูน

ก. ข้อดีของคอนกรีตพูน

- 1) คอนกรีตพูนมีการระบายน้ำที่ดีเนื่องจากเป็นคอนกรีตที่มีความพูนสูง
- 2) คอนกรีตพูนมีคุณสมบัติดูดซับเสียงที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อรถยนต์กับผิวถนน ซึ่งสามารถลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นได้โดยปัจจัยหลักที่ทำให้คอนกรีตพูนดูดซับเสียงได้ดี คือ ความพูน, ขนาดของรูพูนและความหนาของชั้นคอนกรีตพูน
- 3) คอนกรีตพูนสามารถลดความร้อนได้เนื่องจากน้ำสามารถผ่านรูพูนลงไปถึงชั้นดินได้ จากนั้นก็ระเหยเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้บริเวณผิวถนนมีอุณหภูมิลดลง
- 4) คอนกรีตพูนลดการสาดกระเด็นและละอองน้ำที่ขังอยู่บริเวณผิวถนนเนื่องจากคอนกรีตพูนมีการระบายน้ำที่ดี
- 5) คอนกรีตพูนควบคุมการไหลป่าของน้ำท่วม
- 6) คอนกรีตพูนสามารถลดการลื่นไถลของพื้นคอนกรีต

ข. ข้อด้อยของคอนกรีตพูน

- 1) คอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่มีลักษณะการก่อสร้างเฉพาะตัว
- 2) คอนกรีตพูนเมื่อใช้ไป ณ ช่วงเวลาหนึ่งจะเกิดการอุดตันของคอนกรีต เนื่องจากมีรูพูนมาก ทำให้ฝุ่นละอองสามารถเข้าไปอุดตันในบริเวณรูพูนได้
- 3) คอนกรีตพูนมีคุณสมบัติทางกลต่ำ เนื่องจากคอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงอัด อยู่ในช่วง 2 – 28 MPa และมีค่ากำลังรับแรงดัดอยู่ในช่วง 1 – 4 MPa จากค่ากำลังรับแรงที่ต่ำ นี้ทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานในโครงสร้างถนนที่มีปริมาณการจราจรสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตพรุน

โดยขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและการทดสอบของคอนกรีตพรุนนั้นอยู่ในข้อกำหนดตาม ACI 522.1-13 ซึ่งในข้อกำหนดนั้นบอกถึงคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนและรวมถึงการทดสอบคอนกรีตพรุนตามมาตรฐาน ASTM เป็นไปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 5 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคอนกรีตพรุน

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ		คุณสมบัติของคอนกรีตพรุน
ACI 522.1 -13	Specification for Pervious Concrete Pavement (under revision)	Material , preparation , forming , placing finishing , jointing , curing and quality control of pervious concrete pavement
ASTM C1701	Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete	Infiltration rate
ASTM C1747	Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion	Percentage mass loss ever 50 revolutions until 300 revolution in L.A. abrasion rotation without steel drum
ASTM C1754	Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete	Porosity and hardened density
ASTM C39	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens	Compressive Strength

ที่มา: Nassiri et al., (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาส่วนผสมสำหรับการใช้งานและเพิ่มความคงทนให้แก่คอนกรีตพอร์น โดยในการศึกษานี้ใช้มวลรวมหยาบทั้งหมด 2 ขนาด คือ 4 – 9 มิลลิเมตร และ 9 – 12.50 มิลลิเมตร รวมทั้งใส่ทราย , Styrene Butadiene Rubber (SBR) และไฟเบอร์ เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมและซีเมนต์นอกจากนี้ยังมีการใส่สารผสมเพิ่ม Air Entraining Agent และ High Rang Water Reducer ลงไปในส่วนผสมด้วย จากนั้นทำการทดสอบปริมาณช่องว่าง, ความหนาแน่น, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพอร์น จากการศึกษาพบว่าการใช้มวลรวมแบบ single size นั้นทำให้ได้ปริมาณช่องว่างตามที่ต้องการน้อยกว่าการใช้มวลรวมแบบคละขนาดกัน รวมทั้งการใส่ทรายนั่นทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มสูงขึ้นและการใช้ SBR ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพอร์นลดลงแต่กำลังรับแรงดึงนั้นเพิ่มขึ้น นี่จึงเป็นตัวชี้วัดว่าการใส่ SBR อาจจะช่วยทำให้คอนกรีตพอร์นต้านทานการแตกร้าวได้ดีขึ้น นอกจากนี้การใส่ไฟเบอร์ทำให้คอนกรีตพอร์นมีปริมาณช่องว่างเพิ่มขึ้นและการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก

Kim และ Lee (2010) ศึกษาอิทธิพลของการไหลของซีเมนต์และลักษณะของมวลรวมที่มีต่อคุณสมบัติทางกลและทางด้านเสียงของคอนกรีตพอร์นในการศึกษาใช้มวลรวม 2 ชนิด คือ หิน กรวดธรรมดา และหินดินดาน และใส่สารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มการไหลและเติมฟองอากาศให้กับคอนกรีต ทำการทดสอบการไหล กำลังรับแรงอัด และการดูดซับเสียงของคอนกรีตพอร์น จากการศึกษาพบว่า การไหลของซีเมนต์และการเติมฟองอากาศ (Air Entraining , AE) ไม่มีผลต่อ การดูดซับเสียงของคอนกรีตพอร์น นอกจากนี้ขนาดของมวลรวมในช่วง 4 - 19 mm มีผลค่อนข้างต่ำต่อการดูดซับเสียง ปรากฏการณ์นี้จะปรากฏเมื่อใช้มวลรวมปกติรูปร่างกลมและมวลรวมน้ำหนักเบารูปร่างวงรีอย่างไรก็ตามคอนกรีตพอร์นแบบสองชั้น จะช่วยเพิ่มการดูดซับเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตพอร์นแบบชั้นเดียว และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่ใส่ AE แปรผันตรงกับการไหลของซีเมนต์ นอกจากนี้ตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหินดินดานจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมปกติในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของช่องว่างที่ลดลง

Wu และคณะ (2011) ศึกษาการประเมินความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตพอร์นในห้องปฏิบัติการโดยในการศึกษานี้ใช้มวลรวมทั้งหมด 2 ขนาด คือ #7 และ #89 และมีการใส่ Styrene Butadiene Rubber (SBR) , Ethoxylated Di-Sec-Butylphenol Latex Modifier , และ Polypropylene Monofilament Fiber ขนาด 19 มิลลิเมตร เข้าไปเพื่อพัฒนาการยึดเกาะกันระหว่าง มวลรวมและซีเมนต์ หลังจากนั้นทำการทดสอบปริมาณช่องว่างประสิทธิผล, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, การซึมผ่านน้ำ, Cantabro abrasion และ APA abrasion จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตพอร์นที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กนั้นมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าและทนต่อการขัดสีมากกว่าคอนกรีตพอร์นที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่ และคอนกรีตพอร์นที่แทนที่ซีเมนต์ด้วย latex นั้นทำให้คอนกรีตพอร์นมีกำลังและความคงทนต่อการขัดสีมากขึ้น ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตที่ใส่ fiber นั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน นอกจากนี้การทดสอบ Cantabro abrasion และ APA abrasion มีประสิทธิภาพในการประเมินความคงทนต่อการขัดสีของคอนกรีตพูน โดยมีพารามิเตอร์ 2 ตัวในการชี้วัด คือ น้ำหนักที่สูญเสียไป และความลึกของตัวอย่างที่สูญเสียไป

Agar-Ozbek และคณะ(2013) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากำลังของคอนกรีตพูน การศึกษานี้ใช้มวลรวมที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ หินบะซอลต์และหินแม่น้ำ รวมทั้งมีการใส่สารผสมเพิ่ม 2 ชนิด คือ Superplasticizer และ Retarder เพื่อพัฒนากำลังและหน่วงปฏิกิริยาตามลำดับ โดยมีการบดอัด 2 แบบ คือ บดอัดด้วยมือโดยใช้แท่งเหล็กและบดอัดโดยใช้เครื่องบดอัด ในการศึกษานี้ทำการศึกษา ทั้ง Meso-scale และ Macro-scale จากการศึกษาพบว่าในบรรดาดัชนีแปรทั้งหมดคุณสมบัติของ มวลรวมนั้นมีผลกระทบมากที่สุดต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ขนาดละเอียดของมวลรวมและการกระจายตัวของรูพรุนมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน การลดขนาดของมวลรวมทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสและความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวม เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับซีเมนต์ในการยึดเกาะ ส่วนมวลรวมที่มีผิวสัมผัสเรียบนั้น ทำให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัสจึงทำให้คอนกรีตพูนที่ใช้หินแม่น้ำนั้นรับกำลังได้ต่ำ และการบดอัดมวลรวมด้วยเครื่องบดอัดนั้นให้คอนกรีตพูนที่มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการบดอัดมวลรวมด้วยมือ

Hariyadi และคณะ (2015) ศึกษาการใช้หินภูเขาไฟมาเป็นมวลรวมหยาบ ในส่วนของความพูน, อิลาสติกโมดูลัส, กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน จากการศึกษาพบว่าการใช้หินภูเขาไฟในคอนกรีตพูนนั้นทำให้คอนกรีตพูนมีความพูนสูงขึ้น มีอิลาสติกโมดูลัสต่ำและดูดซับพลังงานได้ดี นอกจากนี้การใช้หินภูเขาไฟยังทำให้มีกำลังรับแรงดัดที่สูงกว่า มาตรฐาน ACI แต่มีกำลังรับแรงอัดที่พอรับแรงได้

Cui และ คณะ (2017) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำและกำลังรับแรงของคอนกรีตพูน โดยใช้มวลรวมที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 4.75 และ 9.50 มิลลิเมตร และมีช่วง ของ w/c เท่ากับ 0.32 – 0.40 รวมทั้งใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ จากการศึกษาพบว่า การลด w/c ไม่ได้ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่า w/c ที่เหมาะสม คือ 0.36 จะทำให้ คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงสูงที่สุด เมื่อ w/c น้อยเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เพียงพอ และผลึกของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วมีรูปร่างที่ไม่สมบูรณ์ แต่หาก w/c มากเกินไป จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เหลวเกินไปและเกิดการไหลเยิ้มลงสู่บริเวณด้านล่างของคอนกรีตพูน กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนจะลดลงเมื่อความพูนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความพูนเพิ่มขึ้น จุดยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมและพื้นที่ยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมน้อยลงทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนจะเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นเมื่อความพูนเพิ่มขึ้น โดยความพูนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์ลดลง นอกจากนี้การซึมผ่านน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

Grubeša และคณะ (2018) ศึกษาการระบายน้ำของคอนกรีตพูน โดยใช้มวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ Dolomite , Diabase และ Steel slag และมีขนาดที่แตกต่างกัน 2 ขนาด นอกจากนั้นมีการใส่ทราย 10% เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าขนาดของมวลรวมที่ใช้มีอิทธิพลต่อความพูนของคอนกรีตพูน นอกจากนั้นความหนาแน่นของคอนกรีตพูนจะขึ้นอยู่กับความพูนและชนิดของมวลรวม โดยคอนกรีตพูนที่ใช้ Steel slag จะมีความหนาแน่นมากที่สุดรองลงมาคือ Dolomite และ Diabase ตามลำดับซึ่งความพูนของคอนกรีตพูนนั้นสอดคล้องกับการระบายน้ำของคอนกรีต พบว่าการใช้ Diabase มีการระบายน้ำที่ดีที่สุด รองลงมาคือ Dolomite และ Steel slag ตามลำดับ ส่วนกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนสามารถพัฒนากำลังได้โดยการใส่มวลรวมหยาบขนาดเล็ก โดยการใช้มวลรวมหยาบขนาด 4 – 8 mm ให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุด แต่ผลสรุปนั้นไม่ตรงกับผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยการใช้ Dolomite ขนาดเล็กนั้น ให้กำลังรับแรงอัดสูง แต่ในทางกลับกันการใช้ Diabase และ Steel slag ขนาดใหญ่นั้นให้กำลังรับแรงอัดที่สูง

Lorenzi และคณะ (2018) ศึกษาการระบายความร้อนของคอนกรีตพูนโดยทำการจำลองสร้างคอนกรีตพูนขึ้นเป็นบริเวณที่จอตลอดแล้วศึกษาอุณหภูมิของคอนกรีตพูนในแต่ละช่วงเวลา จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตพูนสามารถบรรเทาผลกระทบจากความร้อนได้โดยระบบรูพูน ซึ่งรูพูนนั้นจะป้องกันการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วโดยการนำความร้อนผ่านรูพูนสู่พื้นดิน รวมถึงการทำให้พื้นดินเย็นขึ้นโดยการระเหยของน้ำที่อยู่ใต้พื้นดินผ่านรูพูนขึ้นสู่พื้นผิวถนน

Yu และคณะ (2019) ศึกษาอิทธิพลของขนาดผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน โดยใช้ขนาดผลของมวลรวมทั้งหมด 8 ช่วงคือ 2.36 – 4.75 , 4.75 – 6 , 6 – 8 , 8 – 9.50 , 4.75 – 9.50 , 10 – 12.50 , 12.50 – 15 และ 10 – 15 มิลลิเมตร มีความพูนเท่ากับ 20% จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของมวลรวม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของมวลรวมมีขนาดเกิน 7 มิลลิเมตรการเพิ่มขนาดของมวลรวมจะไม่ค่อยมีผลต่อกำลังรับแรงอัด และพบว่าความหนาของซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบมวลรวมนั้นซับซ้อนและส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0.30 – 2.70 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มขนาดของมวลรวมจะทำให้ความหนาของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมหยาบขนาดเล็กนั้นมีพื้นที่ผิวมากทำให้ความหนาของซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบมวลรวมลดลง การยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมจึงไม่ดีทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

Leon Raj และ Chockalingam (2019) ศึกษาลักษณะของกำลังและการสึกกร่อนของคอนกรีตพูน โดยใช้มวลรวมหยาบเป็นหินแกรนิตที่มีขนาดของมวลรวมเป็นแบบมวลรวมหยาบขนาดเดียว 3 ขนาด คือ 4.75 , 10 และ 12.50 มิลลิเมตร และมวลรวมหยาบขนาดผล 3 ช่วงขนาด คือ 4.75 – 10 , 10 – 12.50

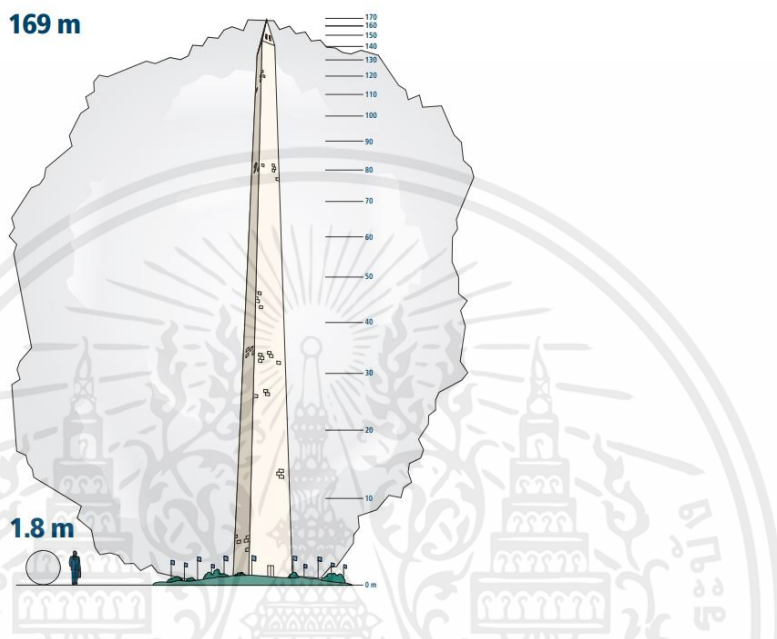
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 12.50 - 16 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดสอบปริมาณช่องว่าง , ความหนาแน่น , กำลังรับแรงอัด , กำลังรับแรงดึง และการสึกกร่อนของคอนกรีตพูน โดยวิธี Catabro Test จากการศึกษาพบว่ามวลรวมหยาบขนาดเล็กและอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ต่ำนั้น จะทำให้คอนกรีตพูนมีสมบัติทางกลและความคงทนต่อการสึกกร่อนมากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่และอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์สูง และส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดคละมีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุด เนื่องจากช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบขนาดใหญ่จะถูกแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบขนาดเล็ก ในส่วนของการทดสอบ Cantabro test พบว่าน้ำหนักที่หายไปจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการหมุนเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น มวลรวมบริเวณขอบของตัวอย่างจะหลุดออกไปทำให้ตัวอย่างมีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไมโครซิลิกา(Micro Silica) คือวัสดุปอโซลานแบบพรีเอมียม ได้มาจากการผลิต Silicon กับ Ferro silicon มีขนาดที่เล็กมากๆ ประมาณ 0.15 ไมครอน เล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่าดังภาพที่ 15 ที่ทางด้านขวาเปรียบเทียบขนาดของคนสูง 1.80 m เป็นขนาดของ micro Silica กับขนาดของ หอคอยสูง 169 m เป็นขนาดของปูนซีเมนต์

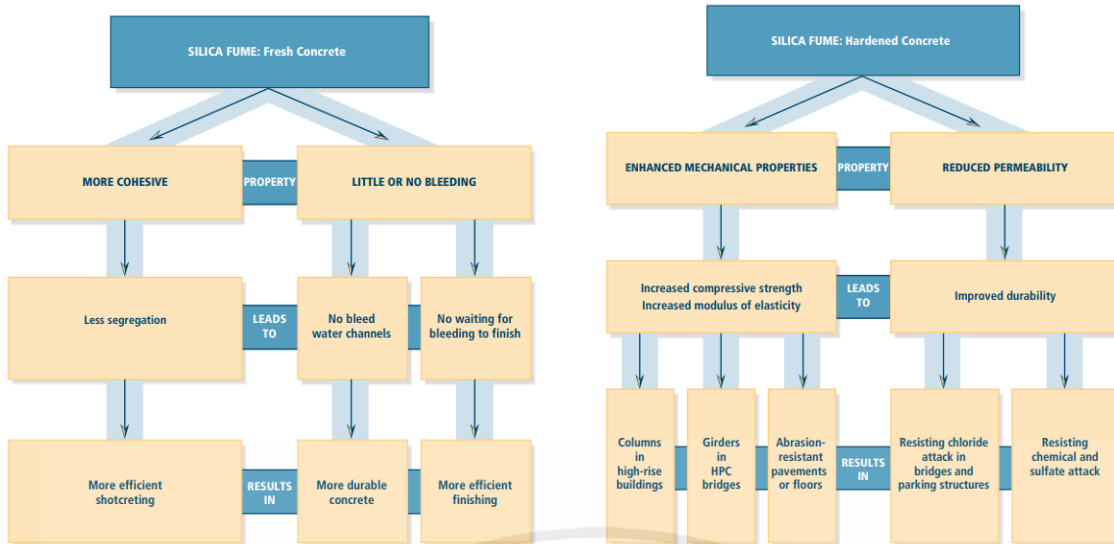


ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบขนาดไมโครซิลิกาเทียบกับขนาดของซีเมนต์
ที่มา Silica Fume User's Manual

2.3.1 ข้อดีของการใช้ Micro Silica

- 1.) Micro Silica ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตทั้งตอนเป็นคอนกรีตสดและตอนที่แข็งตัวแล้ว
- 2.) Micro Silica มีเนื้อที่ละเอียดมากดังนั้นเมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจะสามารถลดการเยิ้ม น้ำได้ เมื่อคอนกรีตไม่มีการเยิ้ม น้ำทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการสึกกร่อนของผิวหน้าคอนกรีตที่มากขึ้น
- 3.) การแยกตัวของหินกับซีเมนต์เพสต์จะต่ำไม่มีการแยกตัว
- 4.) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใส่ Micro Silica จะทำคอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้สูง

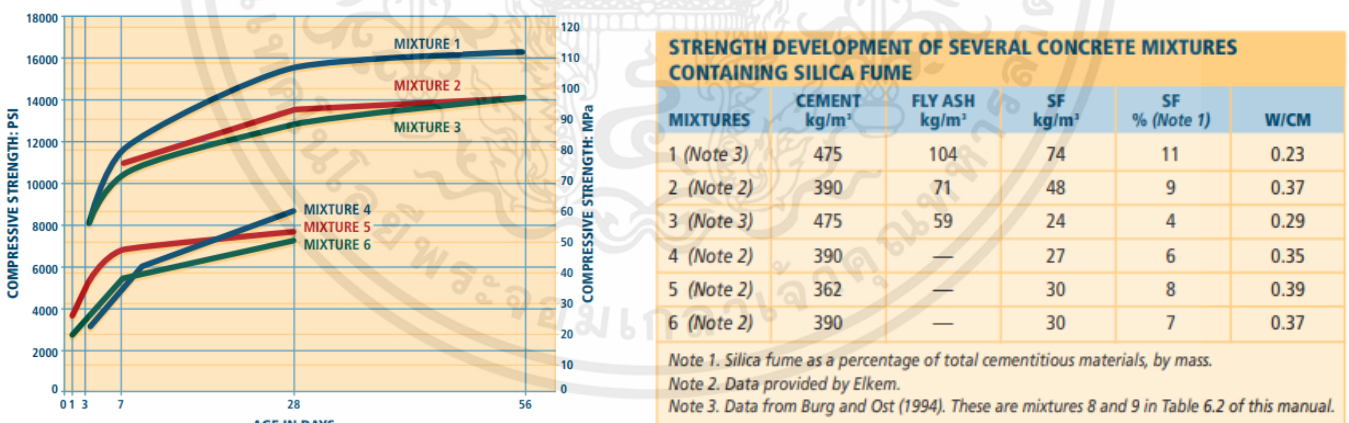
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 16 คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ผสม Micro Silica

ที่มา Silica Fume User’s Manual

จากตัวอย่างที่ทำการทดสอบ 6 ตัวอย่างในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน และตัวอย่างที่ 1,2,3 เป็นตัวอย่างที่ผสม fly ash ร่วมกับ Micro Silica ส่วนตัวอย่างที่ 4,5,6 ไม่ใส่ fly ash จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผสมกับ fly ash มี compressive strength ที่สูงไม่ว่าจะทำการบ่มคอนกรีต 28 วัน หรือ 56 วัน เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ใส่ fly ash ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การทดสอบ Compressive Strength ของคอนกรีต 6 ตัวอย่าง

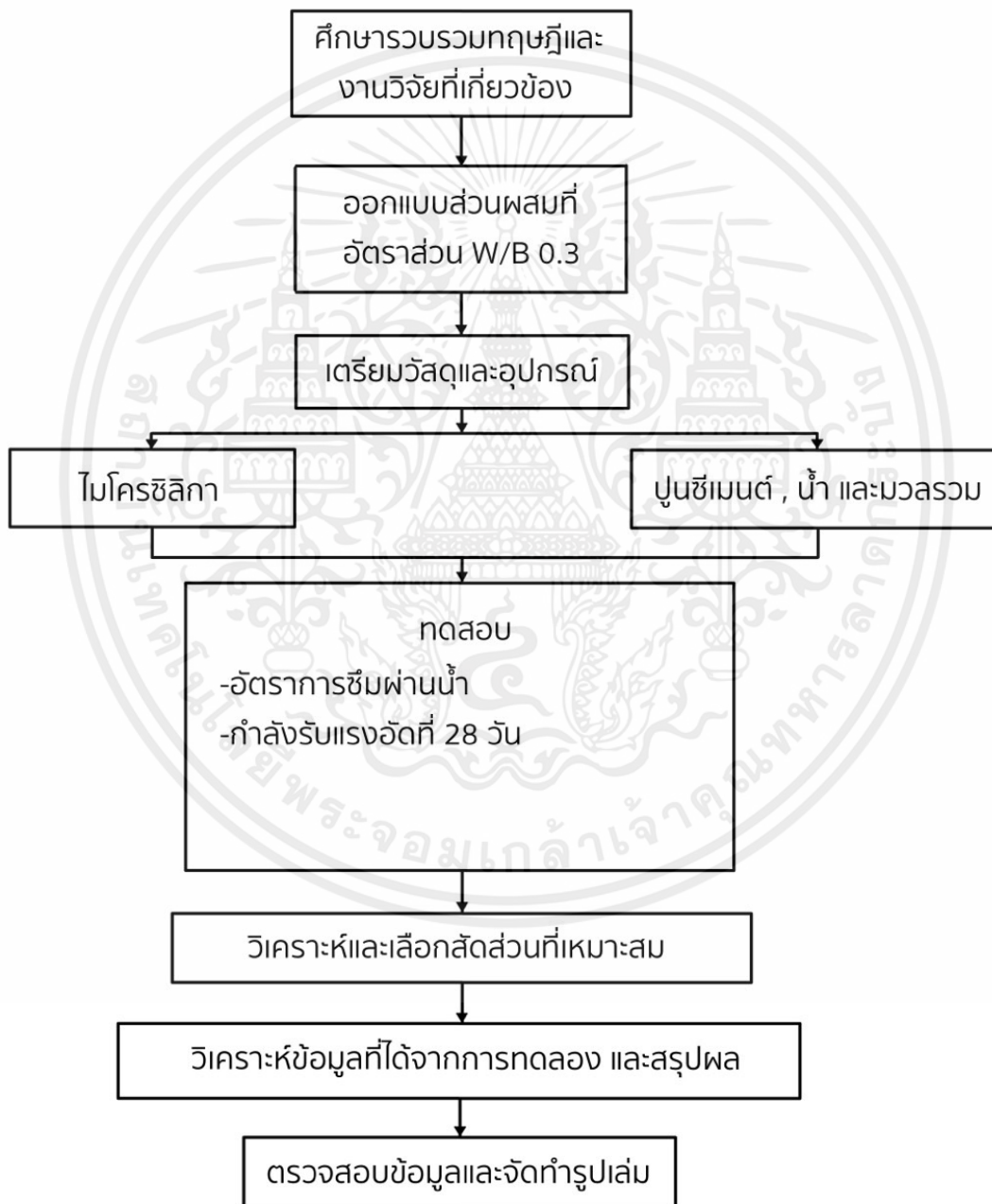
ที่มา Silica Fume User’s Manual

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาพัฒนาผ้าทอระบายน้ำชนิดคอนกรีตพอร์น ในขั้นต้นคณะผู้จัดทำได้มีการรวบรวมข้อมูล หลังจากนั้นจึงได้เลือกรูปแบบการทดสอบและส่วนผสมของวัสดุที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงดำเนินการทดสอบวิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบ ก่อนจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์เพื่อนำเสนอผลการศึกษา

Flow Chart งานวิจัย



ภาพที่ 18 แผนการดำเนินงานวิจัย

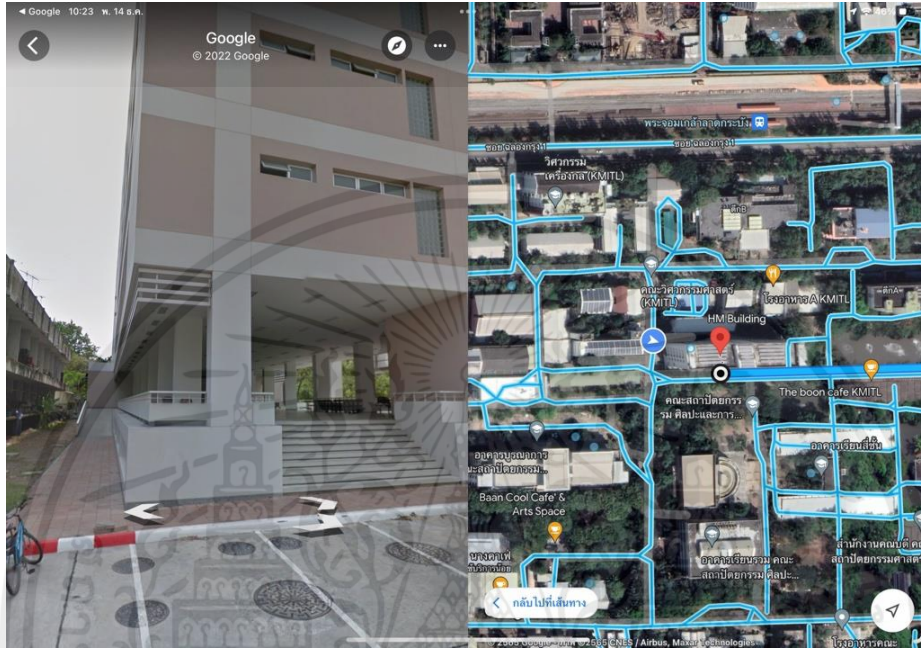
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

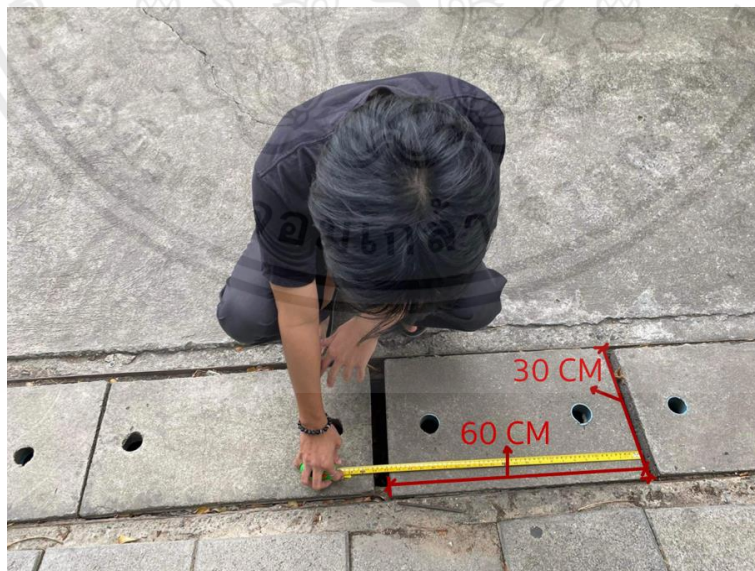
- 3.1.1. ปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
- 3.1.2. มวลรวม โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้หินก่อสร้างเป็นมวลรวมหยาบ โดยมีขนาดที่แตกต่างกัน 2 ขนาดคือมวลรวมหยาบขนาดเล็ก (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8” และค้ำงเบอร์ 4) และมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” และค้ำงตะแกรงเบอร์ 3/8”) และมวลรวมละเอียดโดยมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้ำงตะแกรงเบอร์ 100
- 3.1.3. Micro Silica โดยการนำมาใช้ในครั้งนี้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต
- 3.1.4. น้ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต
- 3.1.5. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve Shaker) เพื่อแยกขนาดของมวลรวม
- 3.1.6. ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.1.7. แบบหล่อมาตรฐาน ใช้เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 150 x 150 mm
- 3.1.8. ตู้อบลมร้อน
- 3.1.9. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (UTM)
- 3.1.10. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Infiltration Test)

3.2 การสำรวจพื้นที่

โดยการสำรวจพื้นที่เพื่อที่จะนำฝาท่อระบายน้ำคอนกรีตพูนที่ทางคณะผู้จัดทำได้พัฒนาคือภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บริเวณตึก HM โดยฝาท่อระบายน้ำมีขนาด ความกว้าง 30 cm ความยาว 60 cm และความหนา 5 cm



ภาพที่ 19 แสดงตำแหน่งที่ตั้งที่จะนำฝาท่อระบายน้ำมาทดลองใช้



ภาพที่ 20 การวัดขนาดของฝาท่อคอนกรีตที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินโครงการในครั้งนี้มีระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจนถึงจบโครงการโดยมีระยะเวลาตามตารางด้านล่างนี้

ตารางขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	เดือน (พ.ศ.2565 - 2566)									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.)ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←————→									
2.)ออกแบบส่วนผสม				←————→						
3.)เตรียมวัสดุอุปกรณ์					←————→					
4.)ทำการทดสอบ -กำลังรับแรงอัด,แรงดัด ที่ 28 วัน -การซึมผ่านน้ำ					←————→	←————→				
5.)วิเคราะห์เลือกส่วนผสมที่เหมาะสม						←————→				
6.)วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล							←————→			
7.)เขียนรายงานวิจัย								←————→	←————→	←————→
8.)ตรวจสอบข้อมูลและจัดทำรูปเล่มฉบับสมบูรณ์										←————→

ตารางที่ 6 ตารางระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ส่วนผสมของคอนกรีตพูน

ในการออกแบบส่วนผสมในการทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI 522.1 – 13 โดยมีการออกแบบส่วนผสมเหมือนคอนกรีตทั่วไป แต่ใช้ส่วนผสมในการออกแบบที่แตกต่างกัน โดยใช้อัตราน้ำต่อโปรเตอร์ที่ 0.30 ใช้หินขนาดเดียวในการทดสอบคือขนาด 3/8” ซึ่งในแต่ละส่วนผสมจะไม่มีทรายผสมอยู่ โดยในการผสมจะใช้ Micro Silica เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์ โดยจะแทนที่ร้อยละ 0% , 5% , 7% , 9% และ 15% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพูนจะเป็นไปดังตารางที่ 7

ลำดับที่		W/B	ซีเมนต์(kg)	น้ำ(kg)	หิน(kg)	MS(kg)
1	Control	0.30	323.91	97.17	1200.14	0
2	PC-MS-5	0.30	312.41	98.41	1200.14	15.62
3	PC-MS-7	0.30	308.03	98.88	1200.14	21.56
4	PC-MS-9	0.30	303.78	99.34	1200.14	27.34
5	PC-MS-15	0.30	291.70	100.64	1200.14	43.75

ตารางที่ 7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่ใช้ศึกษา

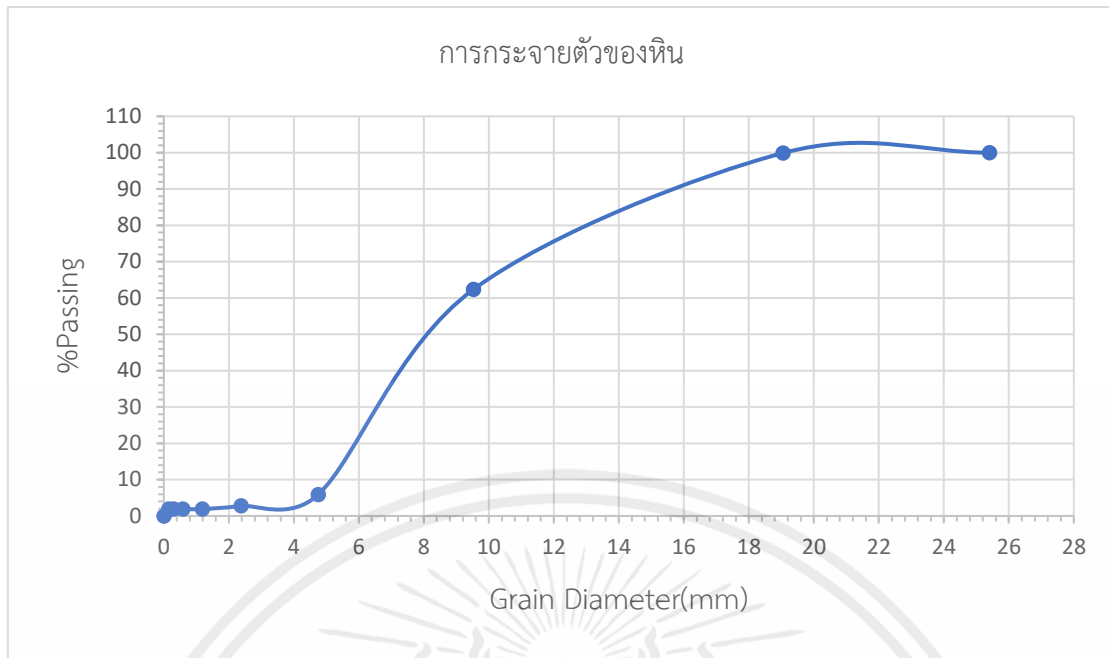
คุณสมบัติ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ
มวลรวมหยาบ	2.65	2.04

ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบ

Sieve Number	Sieve Opening (mm)	Sieve Opening ($d^{0.45}$)	Weight Retained (%)	Cumulative Retained (%)	Percent Passing (%)
1 in	25.40	4.29	0.00	0.00	100.00
3/4 in	19.00	3.76	0.10	0.10	99.90
3/8 in	9.50	2.75	37.52	37.62	62.38
No. 4	4.75	2.02	56.50	94.12	5.88
No. 8	2.36	1.47	3.10	97.22	2.78
No. 16	1.18	1.08	0.88	98.10	1.90
No. 30	0.60	0.79	0.00	98.10	1.90
No. 50	0.30	0.58	0.00	98.10	1.90
No. 100	0.15	0.43	0.00	98.10	1.90
Pan	-	-	1.90	100.00	0.00

ตารางที่ 9 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 21 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

Micro Silica ที่นำมาทดสอบได้รับมาจากบริษัท Elkem ดังภาพที่ 22 ซึ่งเป็นบริษัทที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในการผลิต Micro Silica โดยเฉพาะ ซึ่ง Micro Silica จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.15 ไมครอน และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.20 โดยมีส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 10



ภาพที่ 22 Micro Silica ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Oxide composition	Results(%)
SiO ₂	85-98
Al ₂ O ₃	1-3
Fe ₂ O ₃	0.50-2.50
O ₂	1-10
C	1-5
N	0.10-0.50
S	0.10-0.50

ที่มา Silica Fume User's Manual

ตารางที่ 10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Micro Silica

3.5 การผสมและการอัดแน่นคอนกรีตพูน

สำหรับคอนกรีตพูนที่นำมาทดสอบนั้นจะทำการผสมโดยเหมือนกับคอนกรีตธรรมดาโดยเราจะใช้ไม่ผสมคอนกรีตในการผสม ซีเมนต์ หิน Micro Silica และน้ำ ให้เข้ากัน จากนั้นนำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อทำการบดอัดตัวอย่างโดยใช้แท่งเหล็กกระทุ้งทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นคลุมตัวอย่างด้วยพลาสติกเป็นเวลา 1 วัน แล้วถอดแบบและบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยจะทดสอบ Compressive Strength ที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ โดยจะมีโมลแบบ Cube Mold ขนาด 15 x 15 x 15 cm ที่ใช้ในการทดสอบ และแบบหล่อขนาด 30 x 30 x 5 cm เพื่อทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Infiltration Test)



ภาพที่ 23 ผสมตัวอย่างทดสอบในโมผสม



ภาพที่ 24 นำคอนกรีตที่ผสมมาใส่แบบที่เตรียมไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 25 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ

3.6 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตพูน

1. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน

หากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยคอนกรีตที่ทำการทดสอบจะเป็นทรงลูกบาศก์ 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร และหากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีการแทนที่มวลรวมด้วย Micro Silica ที่ 0%, 5%, 7%, 9% และ 15% โดยคำนวณกำลังรับแรงอัดจากสมการที่

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

σ = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)

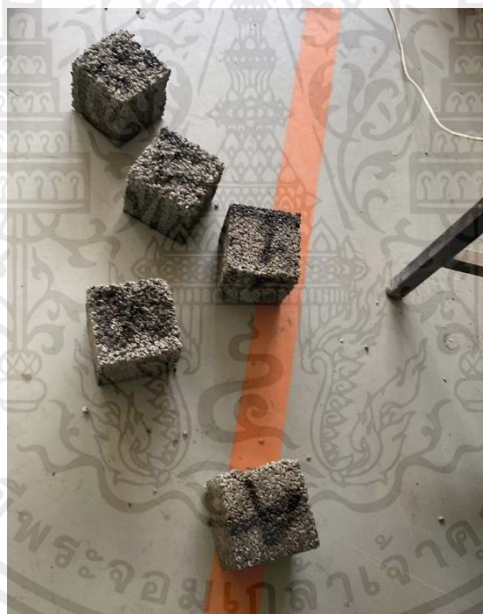
P = แรงกดที่กระทำ (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต (mm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 26 เครื่องทดสอบแรงกด (UTM)



ภาพที่ 27 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน

2. อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน

หาอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน ตามมาตรฐาน ASTM C1701 โดยวิธี Infiltration Test โดยทำการหล่อคอนกรีตพูนขนาด $30 \times 30 \times 30$ cm นำมาวางด้วยวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm แล้วอุดขอบด้วยดินน้ำมันให้แน่นเพื่อป้องกันน้ำไหลออกจากบริเวณที่ทำการทดสอบโดยจะกำหนดการเทน้ำให้ ความสูงไม่เกิน 1.50 cm โดยทำการขีดเครื่องหมายไว้ด้านในวงแหวนทดสอบจากนั้นเทน้ำ 18.14 kg ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไป เริ่มจับเวลาเมื่อน้ำกระทบพื้นผิวคอนกรีตพรุน และหยุดเวลาเมื่อน้ำซึมลงหมดจากนั้นนำมาคำนวณดังสมการที่ด้านล่าง

$$I = \frac{KM}{D^2 \times t}$$

I = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (in/hr)

M = น้ำหนักของน้ำ (lb)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนทดสอบ (in)

T = เวลาที่ใช้ในการเทน้ำ (sec)

K = 126,870 in (ค่าคงที่)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการผสมตัวอย่างคอนกรีตพูนที่มีอัตราน้ำต่อโบรเคอร์เท่ากับ 0.30 โดยใช้การแทนที่ Micro Silica ในซีเมนต์ในปริมาณ 0%, 5%, 7%, 9% และ 15% และใช้หินขนาด 3/8” ในการทดสอบหลังจากนั้น ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การซึมผ่านน้ำ และการรับกำลังแรงอัดที่อายุ 7, 14, 28 วันตามลำดับ เพื่อหาสัดส่วนผสมของปริมาณ Micro Silica ที่เหมาะสมในการนำมาทำฝาท่อระบายน้ำคอนกรีตพูน และได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

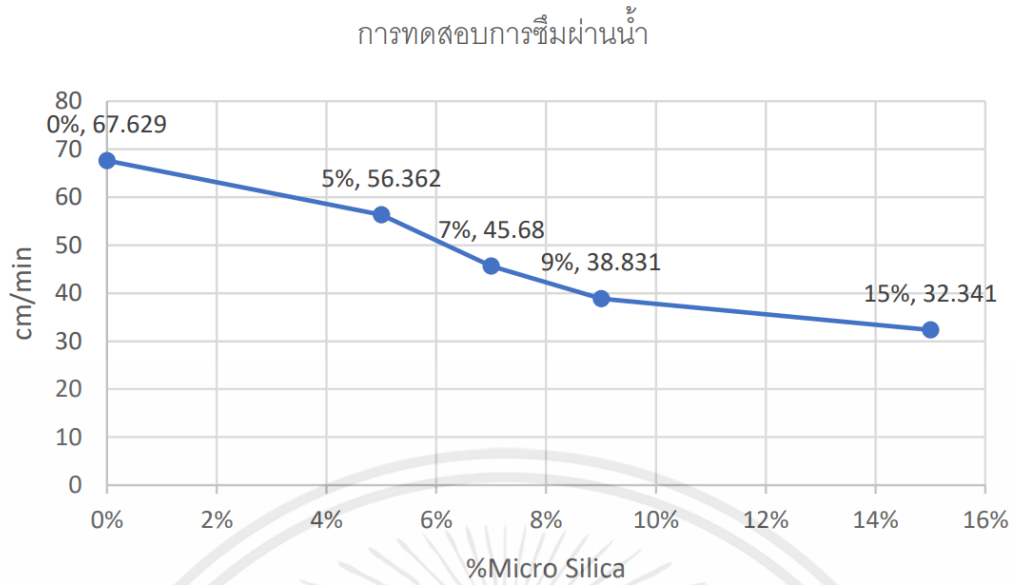
4.1 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนที่ผสม Micro Silica

เมื่อทำการผสมตัวอย่างคอนกรีตพูนขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร ตามที่ออกแบบสัดส่วนผสมแล้ว หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อายุครบ 7 วัน มาทดสอบหาอัตราการซึมผ่านน้ำโดยวิธี Infiltration Test ตามมาตรฐาน ASTM C1701 ซึ่งในตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีการใช้ Micro Silica ในปริมาณ 0%, 5%, 7%, 9% และ 15% โดยใช้ขนาดมวลรวมหยาบอยู่ที่ 3/8” ในการทดสอบพบว่าการใช้ Micro Silica ในการผสมในคอนกรีตพูน ยิ่งใส่ในปริมาณที่มากทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ความพรุนลดลง การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนจึงลดลงด้วย ในคอนกรีตพูนที่ไม่มีการใส่ Micro Silica จะได้อัตราการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 67.63 cm/min ส่วนคอนกรีตพูนที่ผสม Micro Silica 15% จะมีอัตราการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 32.34 cm/min ดังตารางที่ 11

Specimens No.	การซึมผ่านน้ำ cm/min	ข้อมูลดิบ Second
PC-SF0	67.63	22.06
PC-SF5	56.36	26.47
PC-SF7	45.68	32.66
PC-SF9	38.83	38.42
PC-SF15	32.34	46.13

ตารางที่ 11 Infiltration Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 28 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนต่อ %Micro Silica



ภาพที่ 29 การทดสอบ Infiltration Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน

เมื่อทำการผสมตัวอย่างคอนกรีตพูนรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร ตามที่ ออกแบบสัดส่วนผสมแล้ว หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตพูนที่แข็งตัวแล้วอายุ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน มา ทดสอบกำลังรับแรงอัด ภาพที่ 30 แสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน โดยในตัวอย่างทดสอบนั้นมีการใช้ Micro Silica ในการแทนที่คอนกรีตในปริมาณ 0%, 5%, 7%, 9% และ 15% โดยทั่วไปแล้วกำลังรับแรงอัด เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของคอนกรีตพูน แต่เนื่องจากคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่มีความพูนสูงกว่าคอนกรีต ทั่วไป จึงมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป จากภาพที่ 30 พบว่าคอนกรีตพูนที่ไม่ใส่ Micro Silica มี กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตพูนที่ใส่ Micro Silica โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ Micro Silica มากขึ้น กำลังรับ แรงอัดของคอนกรีตพูนก็มากขึ้นตามปริมาณของ Micro Silica แต่อัตราซึมผ่านจะน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Fu et al. (2014) , วันชัย และ ปริญญา (2560) และ Agar-Ozbek et al. (2013) โดยที่ ตัวอย่างที่ผสม Micro Silica 15% ที่ 28 วัน จะได้กำลังอัดอยู่ที่ 157.63 ksc ซึ่งมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผสม Micro Silica จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน อยู่ที่ 101.54 ksc ซึ่งผลการทดสอบจะอยู่ดังตารางด้านล่างนี้ ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน

การทดสอบ Compressive Strength

ชนิดของปูนซีเมนต์ Portland Type 1

เปอร์เซ็นต์ของ Micro Silica = 0%

วันที่ทดสอบ = 2 มีนาคม 2566 (7วัน) , 9 มีนาคม 2566 (14วัน), 23 มีนาคม 2566 (28วัน)

Speciment No.	Cross-Sectional area	Weight	Age	Max load	Compressive Strength (ksc)	
	cm ²	kg	days	kg	indiv.	Avg.
PC-SF0-A1	225	6.21	7	17349.45	77.11	77.02
PC-SF0-A2	225	6.62		16745.78	74.43	
PC-SF0-A3	225	6.65		17889.90	79.51	
PC-SF0-A4	225	6.49	14	20615.60	91.63	92.37
PC-SF0-A5	225	6.40		20229.13	89.91	
PC-SF0-A6	225	6.51		21501.74	95.56	
PC-SF0-A7	225	6.65	28	23668.63	105.19	101.54
PC-SF0-A8	225	6.58		22600.99	100.45	
PC-SF0-A9	225	6.32		22272.64	98.99	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบ Compressive Strength

ชนิดของปูนซีเมนต์ Portland Type 1

เปอร์เซ็นต์ของ Micro Silica = 5%

วันที่ทดสอบ = 23 มีนาคม 2566 (7วัน) ,30 มีนาคม 2566 (14วัน),13 เมษายน 2566 (28วัน)

Speciment No.	Cross-Sectional area	Weight	Age	Max load	Compressive Strength (ksc)	
	cm ²	kg	days	kg	indiv.	Avg.
PC-SF5-B1	225	6.61	7	21598.61	95.99	93.70
PC-SF5-B2	225	6.52		20371.89	90.54	
PC-SF5-B3	225	6.56		21274.34	94.55	
PC-SF5-B4	225	6.32	14	26138.39	116.17	108.31
PC-SF5-B5	225	6.02		23602.35	104.90	
PC-SF5-B6	225	6.68		23370.88	103.87	
PC-SF5-B7	225	6.65	28	26686.99	118.61	115.20
PC-SF5-B8	225	6.56		25862.04	114.94	
PC-SF5-B9	225	6.28		25210.44	112.05	

การทดสอบ Compressive Strength

ชนิดของปูนซีเมนต์ Portland Type 1

เปอร์เซ็นต์ของ Micro Silica = 7%

วันที่ทดสอบ = 30 มีนาคม 2566 (7วัน) ,6 เมษายน 2566 (14วัน),20 เมษายน 2566 (28วัน)

Speciment No.	Cross-Sectional area	Weight	Age	Max load	Compressive Strength (ksc)	
	cm ²	kg	days	kg	indiv.	Avg.
PC-SF7-C1	225	6.62	7	22623.42	100.55	97.00
PC-SF7-C2	225	6.60		21191.74	94.19	
PC-SF7-C3	225	6.54		21660.81	96.27	
PC-SF7-C4	225	6.62	14	25273.66	112.33	115.94
PC-SF7-C5	225	6.58		26730.84	118.80	
PC-SF7-C6	225	6.67		26251.57	116.67	
PC-SF7-C7	225	6.63	28	26496.30	117.76	119.25
PC-SF7-C8	225	6.59		27147.90	120.66	
PC-SF7-C9	225	6.55		26852.18	119.34	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบ Compressive Strength

ชนิดของปูนซีเมนต์ Portland Type 1

เปอร์เซ็นต์ของ Micro Silica = 9%

วันที่ทดสอบ = 31 มีนาคม 2566 (7วัน) , 7 เมษายน 2566 (14วัน), 21 เมษายน 2566 (28วัน)

Speciment No.	Cross-Sectional area	Weight	Age	Max load	Compressive Strength (ksc)	
	cm ²	kg	days	kg	individ.	Avg.
PC-SF9-D1	225	6.02	7	20868.49	92.75	98.02
PC-SF9-D2	225	6.30		23365.78	103.85	
PC-SF9-D3	225	6.19		21932.06	97.48	
PC-SF9-D4	225	6.24	14	26943.96	119.75	119.88
PC-SF9-D5	225	6.37		26497.32	117.77	
PC-SF9-D6	225	6.43		27475.23	122.11	
PC-SF9-D7	225	6.52	28	27351.84	121.56	123.24
PC-SF9-D8	225	6.54		27658.78	122.93	
PC-SF9-D9	225	6.64		28176.79	125.23	

การทดสอบ Compressive Strength

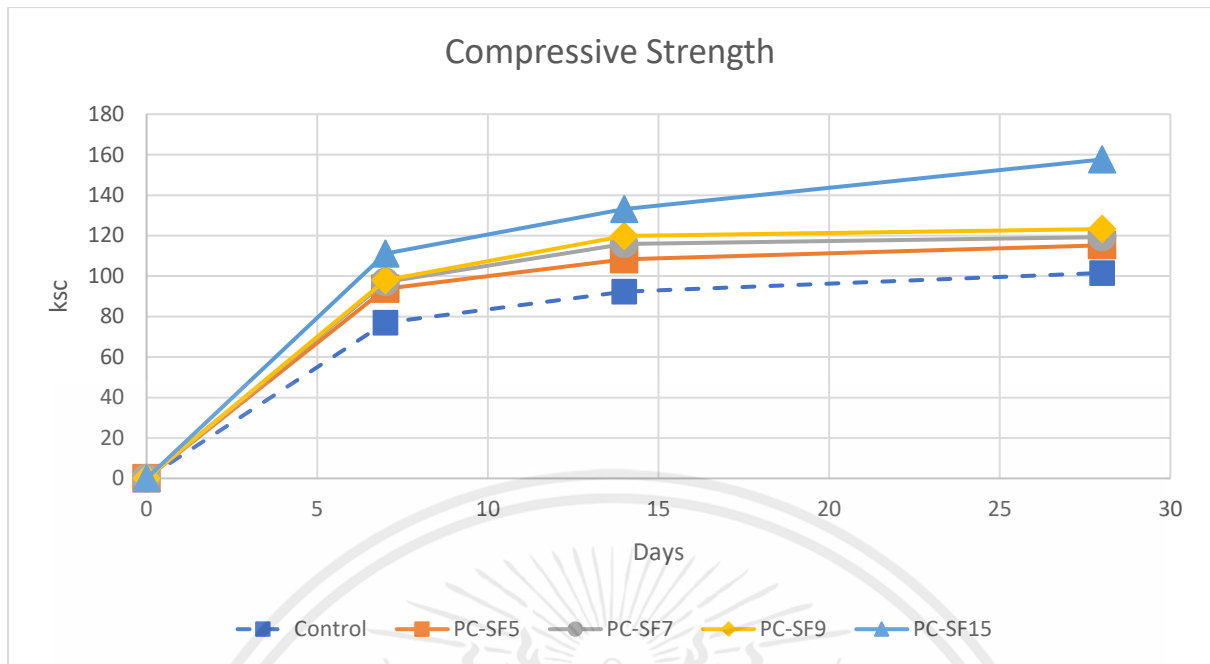
ชนิดของปูนซีเมนต์ Portland Type 1

เปอร์เซ็นต์ของ Micro Silica = 15%

วันที่ทดสอบ = 1 เมษายน 2566 (7วัน) , 8 เมษายน 2566 (14วัน), 22 เมษายน 2566 (28วัน)

Speciment No.	Cross-Sectional area	Weight	Age	Max load	Compressive Strength (ksc)	
	cm ²	kg	days	kg	individ.	Avg.
PC-SF15-E1	225	6.61	7	25044.23	111.31	111.10
PC-SF15-E2	225	6.66		25504.12	113.35	
PC-SF15-E3	225	6.53		24446.68	108.65	
PC-SF15-E4	225	6.62	14	29400.45	130.67	133.12
PC-SF15-E5	225	6.53		30043.89	133.53	
PC-SF15-E6	225	6.71		30409.97	135.16	
PC-SF15-E7	225	6.66	28	34173.74	151.88	157.63
PC-SF15-E8	225	6.69		34921.19	155.21	
PC-SF15-E9	225	6.72		37304.27	165.80	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 30 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่ผสม Micro Silica ในการแทนที่ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่องการพัฒนาคอนกรีตพูนจากการผสม Micro Silica สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการซึมผ่านน้ำเมื่อผสม Micro Silica ในปริมาณที่มากขึ้นยิ่งทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำยิ่งลดลงซึ่งจะได้มาในเรื่องของกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้นโดยถ้าเทียบกับผลการทดสอบการซึมผ่านกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่ใส่ Micro Silica กับตัวอย่างที่ใส่ Micro Silica 15% ผลคือ ตัวอย่างที่ไม่ใส่ Micro Silica จะมีอัตราการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 67.63 cm/min และกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 101.54 ksc ส่วนตัวอย่างที่ใส่ Micro Silica 15% จะมีอัตราการซึมผ่านน้ำอยู่ที่ 32.34 cm/min และกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 157.63 ksc จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้นจะทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำนั้นลดลง
2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดจากกราฟภาพที่ 30 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม Micro Silica ในปริมาณที่มากขึ้นตัวคอนกรีตพูนจะมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องมาจากตัว Micro Silica นั้นทำให้ตัวคอนกรีตมีความทึบน้ำหรือความหนาแน่นเพิ่มความทนทาน และลด permeability ลดการหดตัวรอยแตก จึงทำให้เป็นสาเหตุที่อัตราการซึมผ่านของตัวคอนกรีตพูนนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

1. จากตัวอย่างชิ้นงานขนาด 30 x 45 x 5 cm ที่มีค่าการซึมผ่านดังภาพที่ 28 ถ้าเพิ่มความหนาเป็น 10 cm ค่าการซึมผ่านจะไม่เท่าเดิมเนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆรวมถึงความพรุนและโครงสร้างของวัสดุ ในกรณีที่เพิ่มความหนาจาก 5 cm เป็น 10 cm ทางเดินที่ยาวขึ้นสำหรับให้น้ำไหลผ่านคอนกรีตจะส่งผลให้มีความต้านทานสูงขึ้น ลดการซึมผ่านของน้ำความหนาที่เพิ่มขึ้นจะสร้างระยะทางที่มากขึ้นสำหรับน้ำที่จะเดินทางซึ่งนำไปสู่โอกาสมากขึ้นสำหรับการสูญเสียแรงเสียดทานและอัตราการไหลที่ช้าลง ดังนั้น การเพิ่มความหนาจาก 5 cm เป็น 10 cm จะทำให้การซึมผ่านของน้ำลดลงเนื่องจากความต้านทานการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นเกิดจากทางเดินที่ยาวขึ้น

2. การใส่ Micro Silica เกิน 15% จะทำให้ผสมได้ยากเพราะจากคุณสมบัติของ Micro Silica ที่มีการดูดซึมน้ำลดการเยิ้มน้ำได้ในคอนกรีต ทำให้เมื่อใส่ในปริมาณมากๆตัวคอนกรีตตอนผสมจะแห้งไม่เกาะตัวกันทำให้ผสมได้ยาก อาจต้องเพิ่มปริมาณของน้ำที่มากขึ้นหรือใช้สารผสมเพิ่มอื่นๆในการช่วยผสมคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Wang,K.,Schaefer, V.R.,Kevern,J.T.,and Suleiman,M.T.(2006).Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete .NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete
- Kim, H.K.,and Lee, H.K.(2010). Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. Applied Acoustics, 71(7), 607-615
- Wu, H., Huang, B., Shu, X., and Dong, Q.(2011). Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(5), 697-702.
- Agar-Ozbek, A. S., Weerheijm,J., Schlangen, E., and Van Breugel, K. (2013). Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. Construction and Building Materials, 41, 480-490.
- Hariyadi, and Tamai, H.(2015). Enhancing the Performance of Porous Concrete by Utilizing the Pumice Aggregate. Procedia Engineering, 125, 732-738.
- Cui, X., Zhang,J.,Huang, D., Lui,Z., Hou, F., Cui,S.,Zhang,L.,and Wang,Z.(2017). Experimental Study on the Relationship between Permeability and Strength of Pervious Concrete.Journal of Materials in Civil Engineering, 29(11), 04017217.
- Grubeša,I.N., Barišić,I., Ducman, V., and Korat, L. (2018). Draining capability of single-sized pervious concrete. Construction and Building Materials, 169, 252-260.
- Yu,F.,Daquan,S.,Jue,W.,and Minjun,H.(2019).Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. Construction and Building Materials, 209, 463-475.
- Leon Raj,J.,and Chockalingam, T.(2019). Strength and abrasion characteristics of pervious concrete. Road Materials and Pavement Design, 21(8), 2180-2197.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยุวดี แซ่ตั้ง, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ,(2556).คอนกรีตพูนที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลและ
มวลรวมเบา.ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชาญชัย เงาะปก, วันชัย สะตะ,และปริญญา จินดาประเสริฐ.(2561).การดูดซับเสียงของคอนกรีตพูน ที่ใช้มวล
รวมหยาบต่างกัน. วารสารวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 19(2), 65-77.

วันชัย สะตะ,และ ปริญญา จินดาประเสริฐ.(2560).คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม.
วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก1 แบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาพผนวกที่ ก2 แบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบซึมผ่านน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ก3 แท่งเหล็กที่ใช้ในการกระทุ้งคอนกรีต

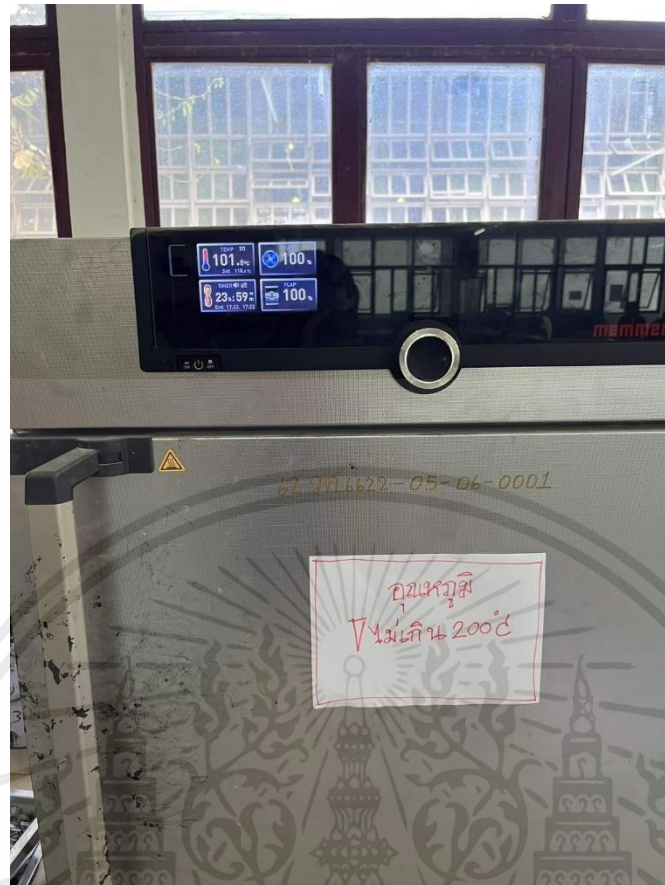


ภาพผนวกที่ ก4 เครื่องเขย่าหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ข1 ตู้อบลมบนสำหรับตัวอย่างคอนกรีตพูน



ภาพผนวกที่ ข2 การทดสอบการทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวกที่ ข3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	ชรินทร์ ทิมแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	12 ตุลาคม 2542
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	86 ม.23 ต.ปางมะค่า อ.ชาณุวรลักษณบุรี จ.กำแพงเพชร 62140
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	ตะวัน อุกฤษต์
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2541
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
ที่อยู่ปัจจุบัน	101 ม.9 ต.บางม่วง อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	ปณิธาน ภูจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	8 สิงหาคม 2542
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	40/1 ม.11 ต.ไม้ตัด อ.บางระจัน จ.สิงห์บุรี 16130
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้